

Les sols, des milieux vivants très fragiles

QU'EST-CE QU'UN SOL ?

Le sol provient de la décomposition et de l'altération des roches par l'action de l'eau, de l'air et des êtres vivants. Au cours du temps, le sol s'épaissit et se modifie ; il acquiert des constituants (matières organiques, argiles...) et des structures (couleurs, agrégats, horizons...) qui lui sont spécifiques.

Le sol est divers : ses caractéristiques et ses propriétés changent en fonction des roches, des reliefs, des climats, des végétations, de leurs âges. Le sol est très mince par rapport au diamètre du globe terrestre : de quelques centimètres à quelques mètres. Le sol est l'épiderme vivant et vital des continents de la Terre.

Le sol se forme lentement, mais ses propriétés évoluent rapidement. La fabrication du matériau qui deviendra le sol par altération des roches est un phénomène lent : l'échelle est celle du siècle et du millénaire. Cependant, les principales propriétés des sols peuvent évoluer très vite : c'est le cas de la structure, de la porosité, de l'activité biologique, des teneurs en certains éléments nutritifs.

Le sol a pris naissance avec la vie, il y a très longtemps, bien avant l'Homme. Et depuis que l'Homme existe, le sol l'accompagne : des civilisations se sont construites et détruites en fonction de l'évolution anthropique des sols.

Pour les Hommes, le sol est présent au quotidien. Il est sous nos pieds, sous nos logements, sous nos routes et chemins : il supporte les habitats et les infrastructures liées aux activités et aux loisirs des sociétés humaines. Il constitue nos champs. Mais il est aussi devant nos yeux : les paysages cultivés sont colorés par les sols, les coupes de routes révèlent l'intérieur des sols...

LES FONCTIONS DU SOL

Le sol nourrit le monde. Il produit, contient, accumule, tous les éléments nécessaires à la vie (azote, phosphore, calcium, potassium, fer, oligoéléments...), y compris l'air et l'eau. Le sol joue un rôle de garde-manger, plus ou moins grand et plus ou moins rempli. Les sociétés humaines, qui se nourrissent des plantes et des animaux, sont totalement dépendantes des sols.

Le sol est un composant fondamental du cycle des eaux continentales. Après une pluie, les sols poreux évitent le ruissellement ; ils contribuent donc à l'alimentation des nappes phréatiques. La porosité des sols détermine la proportion de l'eau qui ruisselle et de l'eau qui s'infiltre dans les sols. Le sol régule donc le régime des cours d'eau et le remplissage des nappes souterraines.

Le sol filtre et épure les eaux qui le traversent. Il en influence la composition chimique et biologique. Cette capacité a cependant des limites : les sols gravement pollués (par des activités industrielles ou agricoles) transmettent une partie de leur pollution aux eaux qui les traversent.

Le sol influence la composition de l'atmosphère. En particulier, il stocke et relâche des gaz à effet de serre. Le sol est un puits pour le carbone : certains modes de gestion des sols accumulent le carbone dans les sols. Or, accumuler du carbone dans les sols (principalement dans la matière organique) est généralement bénéfique pour la fertilité agricole des sols et pour diminuer la richesse en CO₂ de l'atmosphère : le sol est l'un des acteurs majeurs des évolutions climatiques.

Le sol est lieu de vie. C'est un passage obligé pour de nombreuses espèces animales et végétales ; de nombreux cycles biologiques passent par le sol, qui est donc partie prenante de nombreux écosystèmes. Beaucoup d'antibiotiques sont produits par des champignons du sol.

Le sol est une vaste réserve génétique. Il abrite et influence une grande partie de la biodiversité terrestre. Mais, à l'inverse, les activités biologiques sont essentielles à la construction des sols, à leur fonctionnement et à leur fertilité. La vie fait le sol... et le sol fait la vie.

Le sol fournit les matériaux que l'Homme utilise pour construire routes et bâtiments et pour ses activités industrielles, artisanales, culturelles ... Il contient des ressources minérales (or, aluminium, fer...). Il fournit des colorants utilisés pour la peinture.

Le sol est un véritable livre d'histoire. Il conserve les traces de l'histoire, souvent très longues (jusqu'à plusieurs millions d'années), de sa formation : en étudiant les sols on peut y découvrir quelles furent certaines des conditions climatiques et biologiques du passé. Mais aussi, le sol conserve les témoins de l'histoire de l'humanité : c'est lui que l'on creuse en archéologie.

Le sol, objet culturel et religieux, est un lien puissant entre les Hommes et les milieux. À titre d'exemples, on peut citer : la religion shintoïste (au Japon) qui déifie le sol ; dans les Andes, le peuple Quechua qui respecte la «Pachamama» la terre-mère.

LES RECHERCHES DE L'IRD ET DE SES PARTENAIRES

Les ingénieurs du sol, moteurs de son fonctionnement

Les sols jouent un rôle majeur dans la fourniture des services et biens fournis aux humains par les écosystèmes. Situés à l'interface entre l'atmosphère, la lithosphère, l'hydrosphère et la biosphère, ils participent aux grands cycles nécessaires à la vie sur Terre : cycle de l'eau et des nutriments majeurs (carbone, azote, phosphore...). Ils supportent la plupart des systèmes de production agricoles, sylvicoles et pastoraux et participent à la régulation du climat (en contrôlant les émissions de gaz à effet de serre et la séquestration du carbone), au contrôle de l'érosion, à la détoxification.

L'importance des sols dans la définition des services écosystémiques réside dans leur fonctionnement biologique (ou biofonctionnement des sols). Le biofonctionnement des sols regroupe l'ensemble des fonctions assurées par les organismes vivants du sol qui, en interaction avec les composantes physiques et chimiques du sol, permettent la dynamique de la matière organique, le recyclage des nutriments et la dynamique de l'eau. Ces fonctions sont assurées par des organismes de taille variable comprenant les microorganismes (bactéries, champignons, protozoaires) et les invertébrés.

Une extraordinaire diversité taxonomique

Les invertébrés du sol présentent une extraordinaire diversité taxonomique (on estime qu'ils représentent 23 % des espèces vivantes actuellement décrites). Ils comprennent des organismes de petite taille (moins de 0,2 mm, la microfaune) comme les nématodes, qui vivent dans les films d'eau autour des particules de sol, des organismes de taille intermédiaire (entre 0,2 et 2 mm, la mésofaune) comme les acariens et les collemboles, et enfin, des organismes de grande taille (plus de 2 mm, la macrofaune) comme les vers de terre et l'essentiel des larves d'insectes.

Les invertébrés de la macrofaune jouent un rôle clé dans le fonctionnement des sols. Ils décomposent la litière et l'incorporent au sol, ils construisent et maintiennent la structure du sol en creusant des galeries et en modifiant l'agrégation du sol, ils contrôlent en partie la diversité et les activités microbiennes, ils protègent les plantes contre les maladies et les pathogènes. Ces ingénieurs du sol fonctionnent dans le cadre d'interactions multiples complexes avec les autres composantes biologiques du sol. 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. L'action importante, cumulée et répétée de ces ingénieurs du sol participe ainsi à la mise en place des services écosystémiques du sol. En modifiant l'agrégation et la porosité du sol, en décomposant la matière organique, ces organismes participent à l'infiltration et au stockage de l'eau dans les sols, au recyclage des nutriments, à la régulation du ruissellement de l'eau, au stockage du carbone. Ces processus écosystémiques sont à la base des services écosystémiques.

Pourtant le rôle bénéfique de ces organismes dans le fonctionnement des sols et la fourniture de services écosystémiques est encore mal connu et peu utilisé par les gestionnaires du sol (agriculteurs...). Ils sont pourtant des indicateurs de la qualité des sols et doivent être considérés comme une ressource permettant de mieux gérer et améliorer la fourniture de services fournis par les agro-écosystèmes.

Le rôle des vers de terre

Les vers de terre, depuis longtemps, sont connus pour leur rôle joué sur la structure du sol et la dynamique de la matière organique. Le célèbre Charles Darwin, père de l'évolution, a publié son dernier ouvrage en 1881. Il s'agit d'un ouvrage sur les vers de terre, où l'auteur montre que ces animaux sont responsables de la formation des sols (en mélangeant matière organique et matière minérale), de la libération d'azote pour les plantes, de l'enfouissement et de la protection des vestiges archéologiques. Ce travail approfondi sur ces animaux a réellement été à la base des travaux futurs sur l'écologie des sols et sur le rôle des organismes dans le fonctionnement des sols. Depuis Darwin, les vers de terre ont été l'objet d'un nombre très important d'études (sûrement l'un des animaux les plus étudiés) que ce soit dans les milieux tempérés ou tropicaux.

Dans les zones tempérées, les peuplements sont dominés par les vers de terre anéciques qui construisent des galeries verticales à sub-verticales. Ces galeries ont un rôle particulièrement important dans les flux de gaz et d'eau entre le sol et l'atmosphère.

Dans les zones tropicales, ce sont les vers de terre endogés qui dominent les peuplements. Ces organismes sont capables d'ingérer de grandes quantités de terre. Ainsi, un individu peut consommer jusqu'à 35 fois son propre poids de terre (Lavelle, 1978). Les quantités ingérées annuellement par un peuplement sont alors impressionnantes : jusqu'à 2600

tonnes de terre par hectare et par an pour la valeur la plus élevée, ce qui est l'équivalent d'une couche de terre de 20 cm qui passerait chaque année dans le tube digestif des animaux (Blanchart et al., 1999). Ces vers de terre sont donc en grande partie responsables de la formation et du maintien de la structure observée dans les sols de différents écosystèmes (Blanchart, 1992). De plus, des recherches ont pu montrer que les vers de terre avaient différents effets sur la structure du sol.

Certaines espèces augmentent la densité apparente des sols, on les appelle des « compactants », alors que d'autres diminuent cette densité apparente, on les appelle des « décompactants » (Blanchart et al., 1997). L'effet sur la structure du sol dépend également des propriétés inhérentes aux sols (texture, minéralogie). Par exemple, les vers de terre peuvent modifier la structure des sols ferrallitiques tropicaux, mais ne vont pas affecter la structure d'autres sols comme les vertisols (Blanchart et al., 2004a). Les conséquences de l'action des vers de terre sur le fonctionnement du sol sont alors très variables, notamment vis-à-vis de l'érosion (Blanchart et al., 2004a).

Diversité des micro-organismes du sol

Trop souvent considéré comme un environnement minéral, le sol est aussi un lieu de vie. Il héberge une très forte diversité d'espèces (23 %), des vers de terre aux amibes qui participe à son fonctionnement et à la fourniture de services écosystémiques nécessaires à notre survie (production végétale, épuration des polluants etc.). Parmi ces espèces, les microorganismes sont, sans conteste, les plus nombreux et les plus divers. Composés de bactéries, d'archaebactéries et de champignons, ils assurent des fonctions essentielles comme la biodégradation de la matière organique, la production de nutriments pour les plantes, la fixation d'azote, la dégradation des polluants, etc. Les cycles biogéochimiques comme le cycle du carbone de l'azote ou du phosphore sont sous la dépendance (à plus de 90 %) des microorganismes. Ils sont ainsi responsables de l'émission des gaz à effet de serre comme le CO₂, le N₂O et le CH₄.

Pourtant, malgré cette importance écologique, ils restent très mal connus. Cette méconnaissance du monde microbien du sol a de multiples origines, mais la principale est d'ordre méthodologique. En effet, seul 1 % des bactéries du sol sont cultivables, or, jusqu'à récemment, la culture sur un milieu spécifique constituait la seule méthode de caractérisation des espèces microbiennes. Ce verrou méthodologique a été levé grâce à l'essor des outils moléculaires qui permettent de caractériser et dénombrer les microorganismes dans leur milieu naturel sans passer par l'étape de la culture. Grâce à ces techniques, on a pu montrer qu'un seul gramme de sol peut héberger jusqu'à 10 000 espèces bactériennes différentes et près d'un milliard de bactéries. La plupart appartiennent à des embranchements (ou phylum) pour lesquels n'existe aucun ou quelques rares représentants cultivés, d'où l'impossibilité de déterminer précisément leurs rôles. D'autant plus, qu'une espèce peut assurer plusieurs fonctions et inversement une même fonction peut être réalisée par plusieurs espèces différentes. Pourquoi une telle diversité ? Pourquoi plusieurs espèces pour une seule fonction ? Une telle diversité est-elle nécessaire au fonctionnement du sol ? Ces questions sont au centre du débat actuel.

Une mosaïque de micro-habitats

Une des origines supposées de cette diversité provient de la nature profondément hétérogène du sol qui pourrait s'apparenter à une mosaïque de différents micro-habitats (agrégats et pores de tailles différentes) dont les conditions environnementales sont variées. Dans certains de ces habitats (ex : micropores), les microorganismes seraient relativement isolés et préservés de la compétition, de la prédation et de la dessiccation.

En règle générale, le sol représente un milieu difficile où les nutriments sont rares ou peu accessibles. C'est pourquoi les microorganismes sont la plupart du temps dormants ou très peu actifs dans ce milieu. Grâce à des mécanismes de résistance sophistiqués, qui leur permettent d'attendre des conditions plus favorables pour croître, certaines bactéries peuvent être actives une fois tous les 10 ans ! Immobiles, minuscules, ayant besoin d'eau, les microorganismes sont donc tributaires d'autres composants du sol comme les racines des plantes, les litières ou la faune du sol, pour être réactivés. C'est pourquoi l'étude de la diversité des microorganismes et de leurs rôles dans le fonctionnement du sol doit être étudié en tenant compte des interactions qu'ils développent avec les autres acteurs du sol comme les racines des plantes (la rhizosphère), la litière (la résidusphère) et la faune du sol. Ces interactions constituent l'objectif de l'écologie microbienne des sols.

Le sol est lieu de vie

L'exemple de l'Amazonie

Le sol est un habitat pour de nombreux organismes animaux et végétaux ; à ce titre, il est un compartiment des écosystèmes, intervenant dans les cycles biogéochimiques (eau, carbone, azote, phosphore, potassium, etc.) ; parmi les organismes, les racines et les invertébrés, « ingénieurs » du sol, jouent un rôle essentiel.

Particulièrement dans le contexte de l'agriculture familiale amazonienne où les apports de fertilisants minéraux et le

travail du sol sont quasiment exclus pour des raisons économiques, l'activité biologique dans le sol est une composante essentielle de sa fertilité. Au sein des peuplements de faune du sol, les termites, fourmis et vers de terre (macroinvertébrés « ingénieurs ») jouent un rôle important dans le fonctionnement du système sol-plante. D'une part, ils modifient la structure du sol et, par là même, contrôlent la biodisponibilité de l'eau et des éléments chimiques utiles ou toxiques pour les plantes ; d'autre part, ils établissent une relation mutualiste avec la microflore du sol qui permet la décomposition des matières organiques.

Alors que les botanistes n'ont pas observé, sinon peu (herbacées uniquement) d'influence du sol sur la composition spécifique des divers types de végétations (forêts, pâturages, etc.), un effet plus notable (statistiquement significatif) a été mis en évidence par Jérôme Mathieu (maître de conférences à Paris VI) pour la faune du sol, tous groupes confondus, en particulier dans les pâturages : la richesse spécifique diminue des ferralsols (sols ferrugineux tropicaux et sols ferrallitiques) aux cambisols, c'est-à-dire, en première hypothèse, en fonction de la profondeur du sol, laquelle détermine le régime hydrique du sol et l'enracinement des plantes. Cependant, d'autres facteurs peuvent être en cause, par exemple la quantité de matières organiques plus élevée dans les ferralsols, ou bien leur texture plus argileuse.

La nature du sol a toutefois un effet bien moindre sur la biodiversité que l'usage du sol, autrement dit la transformation de la couverture végétale par les agriculteurs. Dès la première culture de riz pluvial sur brûlis de la forêt, une forte chute de la densité et de la diversité des organismes du sol est observée. Les jachères sont des milieux favorables à une recolonisation par la faune du sol. Dans une moindre mesure, les pâturages le sont aussi puisque leur richesse spécifique augmente avec le temps. Cependant, la recherche montre que la distribution de la faune n'y est pas uniforme : richesse spécifique et densités des invertébrés sont plus élevées sous les troncs d'arbres morts et sous les touffes de graminées et autres herbacées que sous le sol nu entre les touffes de graminées. Les espèces échantillonnées sous les touffes de graminées apparaissent plus inféodées à ce micro-habitat que celles échantillonnées sous les troncs. En conséquence, le maintien de troncs au sol dans les parcelles favorise la recolonisation du sol par des peuplements diversifiés de faune. A cet égard, le brûlis annuel des pâturages n'est pas une pratique appropriée.

LES SOLS SONT FRAGILES

Tout usage des sols par les sociétés humaines modifie le sol et ses fonctions. Cela concerne les couleurs, les teneurs en matières organiques, les teneurs en particules fines (argiles), les structures, les porosités, les teneurs en éléments nutritifs ou toxiques (sodium, métaux lourds...), les fonctions vis-à-vis de l'eau, de l'air et de la vie. Ces modifications sont en général réversibles, mais plus ou moins rapidement.

Aujourd'hui, tous les sols du Monde sont modifiés par les activités humaines.

Les sociétés humaines ont souvent su bien gérer les sols dont elles avaient besoin pour vivre : les versants transformés en terrasses, l'aménagement de polders, les bocages, les apports d'amendements organiques... en sont des exemples parmi d'autres.

Souvent aussi, cependant, les sociétés humaines ont gravement dégradé les sols et leurs fonctions : diminution de la fertilité des sols, dérèglements des régimes hydrologiques, atmosphériques, biologiques. À plusieurs reprises les dégradations ont conduit à l'effondrement de sociétés humaines, de civilisations.

Le XX^e siècle a été tout particulièrement destructeur des sols, partout dans le monde. Pauvreté pour les uns, productivisme (capitaliste ou collectiviste) pour les autres, ont contribué à accélérer la dégradation des sols : appauvrissements en matières organiques, destructurations, appauvrissements en éléments minéraux, érosions, pollutions...

Les principales améliorations des sols du fait des activités humaines sont :

- * L'amélioration de propriétés chimiques (la « fertilité ») grâce à la fertilisation minérale (phosphore, potassium...) ou/et grâce à une gestion durable (assolements adaptés, gestion attentive de la matière organique...);
- * L'amélioration de certaines propriétés physiques, grâce au travail du sol (labours...), aux amendements (organiques, chaulage...), au drainage...
- * La mise en terrasses dans les zones de pentes (ex: Cévennes, Afrique du Nord, Asie).
- * L'épierrage par construction de murets et accumulation de pierriers, le concassage des éléments grossiers ;
- * L'irrigation...

Les principales dégradations des sols du fait des activités humaines sont :

- * La baisse des taux de matières organiques, de l'activité biologique, de la biodiversité.
- * La destructuration de la partie supérieure des sols, accompagnée d'une baisse de porosité (tassement).

- * L'appauvrissement en nutriments ;
- * L'appauvrissement en particules fines argileuses ;
- * La salinisation et l'alcalinisation ;
- * L'acidification ;
- * Les pollutions minérales, organiques, radioactives ;
- * L'érosion, la sédimentation, les glissements de terrain ;
- * L'enterrement, voire la destruction, par les constructions urbaines, industrielles, touristiques, routières...
- * Les inondations des basses terres côtières en conséquence des changements climatiques.

On estime que 40 à 50 % des sols du monde sont déjà dégradés du fait des activités humaines. Les dégradations des sols ont des conséquences considérables sur les milieux en relation avec les sols.

- * L'hydrosphère : les régimes hydrologiques changent (crues, inondations, cycles plus courts) et les eaux se polluent ;
- * L'atmosphère : elle s'enrichit en gaz à effets de serre ;
- * La biosphère : elle est modifiée sur et dans les sols ;
- * L'anthroposphère : les dégradations des sols ont des conséquences sur l'alimentation et sur la santé des sociétés humaines et sur leurs habitats.

Le sol est menacé de disparition :

- * Quand l'érosion va plus vite que l'altération des roches : l'altération, qui fournit le matériau minéral du sol, est un phénomène lent, séculaire ; l'érosion, en revanche, est souvent très rapide, visible à l'échelle de la minute : le sol peut disparaître ;
- * Quand l'urbanisation se développe : le sol disparaît sous les constructions.

L'objectif que les sociétés humaines doivent se donner le plus souvent possible est l'utilisation durable des sols : il s'agit d'utiliser les sols.

- * Sans freiner leur formation (sans freiner l'altération des roches) ;
- * Sans accélérer les érosions ;
- * Sans diminuer, voire en augmentant, les teneurs en matières organiques des sols ;
- * En veillant à la biodiversité, dans et sur les sols ;
- * En maintenant une bonne structuration et une bonne porosité des sols ;
- * En évitant les pollutions des sols ;
- * En évitant les appauvrissements nutritifs des sols.

LES RECHERCHES DE L'IRD ET DE SES PARTENAIRES

Les recherches en Amazonie

Les recherches entreprises en Amazonie s'intéressent au tassement du sol, à l'une de ses causes, la perte de biodiversité, et à l'une de ses conséquences, l'érosion.

Le système d'élevage extensif dominant sur le front pionnier amazonien modifie, directement ou indirectement, via les changements de biodiversité, les propriétés physiques (structure, porosité) et hydrodynamiques du sol (infiltration). Ces modifications accroissent l'érosion et l'hydromorphie des sols. Ces deux processus naturels de transformation des sols amazoniens sont amplifiés par l'homme, au point que le sol peut parfois disparaître, ou au moins perdre tout ou partie de ses fonctions. Il importe donc de promouvoir de nouvelles pratiques, voire de nouveaux systèmes de production agricole, pour conserver l'intégralité des fonctions du sol.

Le tassement du sol

Le tassement du sol est une diminution de sa porosité qui résulte :

- * des contraintes mécaniques qui s'exercent sur le sol : par exemple les pressions exercées par des véhicules, par des outils de travail du sol ou par le bétail ;

* de l'activité biologique : certaines espèces de vers sont compactantes dans certaines conditions (texture, humidité) du sol ;

* de l'action destructurante (désagrégante) d'agents atmosphériques, de la pluie en particulier : les particules solides désagrégées, individualisées par les gouttes de pluie (leur énergie cinétique est proportionnelle à leur masse), s'assemblent à nouveau pour former des « croûtes » plus ou moins compactes.

Un tassement n'affecte pas tous les pores avec la même intensité, selon la localisation et la nature ou l'origine de ces pores. On distingue en particulier deux grandes classes de pores : les pores texturaux et les pores structuraux. Les premiers résultent de l'assemblage des particules élémentaires d'argile, de limons, de sables, et de matière organique, formant des agrégats, et en premier lieu des microagrégats argileux contenant des « micropores » de taille comprise entre quelques nanomètres (nm) et quelques dixièmes de microns (μm). Les seconds résultent de l'activité biologique et de mécanismes physiques (phénomènes de retrait-gonflement au cours des alternances de dessiccation-humectation) ; les pores structuraux (ou « macropores ») forment un réseau de tubes et fissures plus ou moins continus et interconnectés dont les tailles sont très variables (de $0,1 \mu\text{m}$ à plusieurs mm).

La déforestation mécanisée en Amazonie dans la région de Manaus, sur des plateaux présentant des sols très argileux (plus de 90% d'argile de nature kaolinique), est une bonne illustration de ce phénomène. Nos résultats montrent que les contraintes exercées par les bulldozers ne réduisent pas la porosité texturale, constituée dans ces sols de micropores très fins entre les particules de kaolinite. Le tassement affecte cependant toute la porosité structurale, et d'autant plus intensément à proximité de la surface du sol où les pressions sont appliquées. L'importance du tassement dépend de l'humidité du sol, comme de nombreux travaux l'ont montré, mais aussi de la constitution du sol. Les sols de la région de Manaus, « latosols jaunes » selon la classification brésilienne, sont particulièrement sensibles à ce phénomène de tassement, en raison de leur pauvreté en oxydes de fer. Lorsqu'ils sont abondants, ces oxydes se localisent entre les particules de kaolinite et assurent une plus forte cohésion des microagrégats argileux ; c'est le cas des latosols rouges du sud du Brésil. Au contraire, les microagrégats des latosols jaunes offrent une faible cohésion, ils sont donc facilement déformables sous l'effet d'une contrainte mécanique et se rapprochent les uns des autres. La structure fragmentaire initiale tend à devenir massive, lorsque toute porosité structurale a disparu.

Or, la porosité structurale joue un rôle primordial dans le fonctionnement du système sol-plante, car c'est elle qui assure les transferts d'eau et d'air, et le stockage de l'eau utilisable par les plantes. L'eau retenue au sein des microagrégats argileux ne permet pas de satisfaire les besoins en eau des plantes, car celles-ci n'ont pas la capacité d'exercer des succions suffisantes pour extraire l'eau retenue entre les particules d'argiles dans des pores de quelques dizaines de nm. Un sol argileux d'Amazonie tassé peut être très humide, sans pour autant que cette eau soit « utile ».

L'exemple du front pionnier amazonien

Le rythme d'implantation des pâturages est aujourd'hui plus rapide sur les fronts pionniers d'Amazonie orientale qu'il n'a été une vingtaine, voire une dizaine d'années auparavant. Une seule culture vivrière (roça), le riz pluvial étant la plus fréquente, précède ou accompagne la plantation de la graminée fourragère. Ce fait est caractéristique d'une transition technique entre l'agriculture sur brûlis et l'élevage extensif, deux systèmes relativement incompatibles. En effet, l'implantation d'un pâturage limite, sinon empêche, la régénération d'une jachère, dont l'absence prive l'agriculteur de cultures vivrières annuelles.

En outre, dans les pâturages, la couche superficielle du sol a tendance à se tasser rapidement. Ce tassement est beaucoup plus fort dans les premiers 5 cm, mais il reste significatif jusqu'à 20 cm de profondeur, aussi bien pour les ferralsols que pour les cambisols. Les sols sous roças et jachère ne sont par contre pas significativement plus compacts, en moyenne, que sous forêt.

Le sol perd le quart de la porosité totale de sa couche superficielle. Comme dans la région de Manaus, cette perte concerne la majeure partie de la porosité structurale.

Le changement de structure du sol associé à ce tassement est très visible. Alors que les turricules rejetés par les vers de terre sont très abondants sous forêt, une croûte compacte se forme entre les touffes de graminée dans les pâturages. L'augmentation de la compacité du sol se traduit par une diminution de 10 à 20 fois de la vitesse d'infiltration de l'eau.

Le tassement des sols des pâturages amazoniens a été décrit dans différents contextes. Des processus distincts impliquant l'évolution des peuplements de faune du sol peuvent être invoqués : dans la région de Manaus, nous avons observé localement l'envahissement temporaire par une espèce de ver compactante (Chauvel et al, 1999) ; à Benfica, c'est la migration, vers des niches écologiques plus favorables, d'espèces décompactantes présentes sous forêt, qui semble en cause : l'activité biologique n'est plus alors assez intense pour limiter le tassement du sol provoqué par le piétinement du bétail et les fortes averses. Ainsi, l'évolution biologique du sol, apparaissant dès le brûlis de la forêt, y précède-t-elle la dégradation physique du sol. Les propriétés chimiques ont en revanche tendance à s'améliorer, et de manière durable

dans des pâturages anciens.

L'une des conséquences du tassement du sol est l'amplification des deux processus d'évolution du sol actifs en Amazonie en conditions naturelles : l'érosion et l'hydromorphie. Ces deux processus dépendent du régime pluviométrique et des conditions de transferts de l'eau dans le sol, autrement dit de la structure du sol, sensible aux changements de biodiversité et aux pratiques culturales.

Une autre conséquence est la baisse progressive de productivité du pâturage, trop peu considérée dans un système extensif qui « consomme » des terres plutôt que de chercher à les gérer de manière durable.

Salinisation et sodisation des sols

Le sodium représente 2,27 % du nombre d'atomes de la croûte terrestre. Élément mobile sous sa forme soluble, il est nécessaire à la vie des êtres vivants qui l'utilisent pour réguler l'hydratation de leur milieu interne ainsi que pour la transmission des influx nerveux. Dans les sols, le sodium peut s'adsorber sous forme ionique à la surface des argiles et s'accumuler à la faveur de l'évaporation, sous forme de solution concentrée et/ou de cristaux de sels. La salinisation est le processus qui accroît la quantité de sels dans les sols : lorsque celle-ci est trop élevée, la plante subit un stress qui ressemble à celui provoqué par une sécheresse. L'alcalinisation se produit lorsque le pH du sol augmente à des valeurs supérieures à 8.2. Elle est souvent accompagnée du processus de sodisation : lorsque le sodium est l'élément majoritaire adsorbé sur les argiles, il produit un cortège d'effets physiques et chimiques préjudiciables pour le sol et la plante.

Salinisation et alcalinisation peuvent se cumuler ou se produire indépendamment. Selon la FAO, 6.4% des terres émergées sont affectées par une salinité et/ou une alcalinité excessives pour leur mise en culture. Ces étendues considérables comprennent essentiellement des terres marginales que la salinité et/ou l'alcalinité rendent difficilement exploitables depuis longtemps. En revanche, du fait de l'activité de l'homme, des étendues de plus en plus larges sont actuellement rendus stériles par ces deux fléaux : les parties basses de certaines régions ayant subi une forte déforestation ainsi que certains secteurs irrigués.

Salinisation et alcalinisation des sols participent donc à la désertification.

Salinité et sodicité des terres marginales

Les terres marginales sont des zones où le sol est impropre aux grandes cultures. De forts contenus en sel ou en sodium échangeable du sol peuvent empêcher cette mise en culture et s'ajouter à la contrainte d'exploitation que constitue l'aridité sous des climats arides ou semi-arides. Le sel qu'on trouve à l'intérieur des continents provient des évaporites : des couches sédimentaires constituées par de grandes épaisseurs de sels accumulées lors des transgressions marines au cours de l'histoire géologique. Les zones de sols salés naturels se trouvent principalement dans les points bas de bassins endoréiques arides ou semi-arides appelés playa, laguna, chott ou sebkra, comme au Mexique, au Chili, sur la plaque Arabique et en Asie. Indépendamment du climat, les sols côtiers subissent également une salinité issue du contact avec les eaux saumâtres des deltas, ou des lagunes côtières, ou par le biais des marées et des embruns. Au total, les surfaces concernées seraient de l'ordre de 830-930 millions d'hectares.

351 millions d'hectares de terres sont définies comme « saline » (salées, salines), car une fois le sol saturé d'eau, leur solution présente des conductivités électriques supérieures à 4 dS m⁻¹ ce qui correspond au seuil de concentration en solutés au delà duquel la plupart des espèces végétales non résistantes au sel ne peuvent pas se développer. Les sols salés favorisent le développement d'une végétation naturelle spécifique : les halophytes (2% des espèces végétales connues seraient halophytes) il s'agit par exemple des palétuviers qui forment les mangroves côtières des pays tropicaux, des salicornes des prés salés de la Méditerranée ou de l'Atlantique.

581 millions d'hectares de terres présenteraient un caractère « sodic » (sodique) déterminé par une proportion élevée d'ions sodium fixée sur la phase échangeable des argiles (>15%), ce qui implique des qualités physiques défavorables à la culture. Leur formation provient d'anciens sols salés qui ont été lessivés, ou bien du produit de transformation d'une roche mère à minéraux silicatés sodiques dominants, voire du lessivage par des eaux de pluies à teneur en sodium dominante.

Milieus fragiles, support d'une biodiversité souvent endémique, les sols naturellement salés ou sodiques sont très sensibles à toute mise en culture¹ ou introduction de l'irrigation. Le changement climatique en cours aura très certainement une influence sur leur distribution, particulièrement pour les sols côtiers du fait de la montée du niveau océanique.

Salinité et déforestation, l'exemple de la Thaïlande

Selon la FAO, les pertes mondiales de superficies boisées entre 2000 et 2005 se sont élevées à 73 000 km² par an. Une conséquence peu connue de ce changement brutal d'usage des terres est l'augmentation de l'infiltration de l'eau dans les

sols des versants causée par la diminution de l'évapotranspiration que produit le remplacement des arbres par des plantes saisonnières. Cette perturbation du cycle hydrologique peut conduire à une augmentation des niveaux d'eaux salées dans les plaines, et à la salinisation de vastes surfaces de sol : c'est notamment le cas du continent australien où plus de 20 000 km² de terres se sont brutalement salinisées et où il est prévu que cette surface double d'ici 25 ans.

Depuis 2001, L'IRD et ses partenaires s'attachent à étudier le cas particulier du Nord Est de la Thaïlande où une déforestation similaire s'est produite dans les années soixante, pendant l'introduction massive des cultures de rentes. La salinité s'est étendue dans les plaines et affecte plus de 11 000 km² de cultures traditionnelles de riz collant destinées à l'autoconsommation ce qui fragilise les communautés villageoises. Contrairement à ce qui se produit en Australie et dans d'autres parties du monde, la salinisation n'intervient pas pendant la saison sèche mais pendant la saison des pluies à la faveur d'une « poussée » des eaux souterraines salées qui envahissent les sols des casiers de riz inondés. Dans ce contexte, la maintenance d'une tranche d'eau douce supérieure à 10 cm dans le casier est susceptible de protéger de la remontée saline. Avec ces constatations, la maintenance et la gestion du réseau de diguettes deviennent un élément central de prévention et de lutte contre l'extension des zones affectées.

L'apport de matières organiques sur les taches salines est une méthode traditionnelle de réhabilitation des parcelles affectées par la salinité. Si, aux dires des exploitants, la méthode est efficace sur le long terme, les processus sont très peu documentés scientifiquement. L'étude au champ sous conditions paysannes montre que le contrôle du pH du sol est l'un des premiers effets bénéfiques accompagnés d'incidences importantes sur la formation du sol et la stabilité des argiles. De même, de manière surprenante, l'emploi de cette méthode a peu d'effet sur les taux d'émission de méthane.

Depuis quelques années, l'implantation des cultures d'hévéa dans le Nord-Est de la Thaïlande est favorisée par les prix élevés du latex. Le retour à une couverture arborée des versants, s'il était généralisé, rendrait théoriquement possible un retour du cycle hydrologique aux conditions initiales ce qui motive l'étude actuelle centrée sur l'impact de l'implantation des cultures d'hévéa.

Salinité et sodicité des terres irriguées

L'irrigation est une pratique en pleine extension : environ 8,1 millions d'hectares étaient irrigués en 1800, 41 millions en 1900, 105 millions en 1950 et plus de 222 millions d'hectares aujourd'hui. Cette pratique, en offrant des rendements accrus et la possibilité de plusieurs récoltes par an, permet d'assurer 40 % de la production vivrière mondiale¹. Mais plusieurs menaces planent sur ce succès, en effet, 21 % des terres irriguées souffrent d'engorgement, de salinité et/ou d'alcalinisation qui réduisent leurs rendements. De même, 1 à 2 % des surfaces irriguées sont perdues chaque année du fait de ces deux derniers fléaux, enfin des ressources en eau limitées réduisent leurs possibilités de développement.

Le processus de salinisation est dû à la mauvaise combinaison d'une forte évaporation et d'un apport inadapté d'eau d'irrigation en relation avec son contenu en sels dissous. Plus l'aridité est forte, plus l'irrigation est incontournable à la culture et plus son usage est risqué.

- Si les apports sont réduits par rapport à une forte évaporation, toute l'eau d'apport sera évaporée et les sels dissous s'accumulent irrémédiablement en surface du sol. Des techniques de goutte-à-goutte permettent cependant de jouer sur la répartition de la salinité qui se distribue en auréole autour du point d'apport, en préservant la zone proche du système racinaire de la plante.
- Si les apports d'eau d'irrigation sont en excès par rapport à l'évaporation et que ces excès ne s'évacuent pas suffisamment, le niveau des eaux souterraines s'approche alors de la surface. Il menace à son tour, pendant les périodes où l'irrigation est inactive, de contribuer par évaporation à la salinité de la surface. Enfin, même si les excès s'évacuent en aval, ils constituent des sources potentielles de contamination salines pour les systèmes d'irrigation en contrebas. Car si l'eau d'irrigation contient trop de sel en solution, son usage pour la culture de plantes non-halophyte est impossible.

Les processus de sodification et d'alcalinisation peuvent se produire dans les zones irriguées sans faire intervenir des solutions très chargées en solutés. La détérioration des perméabilités du fait de la sodification rend difficile la désalinisation des parcelles par lessivage des sels. De même, une eau d'irrigation, avec un faciès bicarbonaté sodique peut rendre un sol sodique et augmenter son pH.

Mis à part, le contre exemple camarguais, la France dispose de peu de secteurs irrigués où la salinisation et/ou l'alcalinisation des sols menacent la production agricole. En revanche, les pays du sud de la Méditerranée présentent de larges surfaces irriguées qui sont affectées : soit des zones côtières comme la basse vallée du Nil, soit encore dans les terres, comme au Maroc ou en Tunisie. Ces pays sont demandeurs d'un renforcement de ces recherches.

La dégradation des sols par salinisation ou alcalisation

La dégradation des sols par salinisation ou alcalinisation apparaît comme toile de fond à tous les aménagements hydro-agricoles en zone aride ou semi-aride. Ce sont là les types de dégradation les plus fréquentes, et souvent liées à la désertification.

La dégradation des sols par salinisation

La salinisation est l'augmentation de la quantité de sels solubles dans la zone racinaire et qui entraîne par conséquent une baisse des rendements.

Les sources de sel sont variables :

* Le matériau géologique, par le biais de l'altération, peut libérer les éléments nécessaires à la formation des sels solubles (altération de minéraux primaires riches en sodium, de roches volcaniques, des produits de l'hydrothermalisme riches en soufre et en chlore, ou encore dissolution des évaporites, qui sont des accumulations salines anciennes).

* L'eau de mer est, bien entendu, une source principale de sel en milieu côtier. La salinisation peut alors être un phénomène permanent lié aux marées (salinisation marine), ou encore due à la présence de lentilles d'eau sursalées lorsque les zones basses sont isolées de la mer par un colmatage alluvial (salinisation lagunaire – exemple du Lac Rose au Sénégal).

* Une nappe phréatique, d'origine continentale et salée par héritage géologique, peut contaminer le sol par ascension capillaire.

* L'eau d'irrigation, on parle alors de salinisation anthropique. Elle peut être très rapide et se manifester à l'échelle de l'année, de la dizaine d'année (cas du delta intérieur du Niger au Mali) ou de quelques siècles (cas de l'Euphrate et de la Mésopotamie). Ce type de salinisation est la conséquence de pratiques agricoles ou d'aménagements inadaptés. La remontée de la nappe phréatique peut atteindre plusieurs dizaines de mètres comme dans le cas du Kouroumari au Mali (40 m en 20 ou 30 ans). Le risque de salinisation dépend de la charge en sel de l'eau d'irrigation, mais, même si les eaux d'irrigation sont de bonne qualité, très peu chargées en sel, il faut garder en mémoire que ces sels peuvent malgré tout s'accumuler au sein de la zone racinaire à chaque irrigation sous l'influence de l'évaporation.

Il n'existe pas de profil morphologique type de sols salés, car le sel vient en général se surimposer à un profil de sol déjà existant.

Les problèmes rencontrés sont :

* D'ordre osmotique : l'augmentation de la pression osmotique dans la solution du sol empêche la pénétration de l'eau dans la plante, provoque une plasmolyse des cellules, parfois irréversible et qui peut aboutir à la mort du végétal.

* D'ordre de toxicité (chlorure, sodium, bore, etc. s'accumulent dans les feuilles et peuvent provoquer des dommages métaboliques).

* D'ordre microbiologique : la salinisation diminue l'activité microbienne du sol, la nitrification et la production de CO₂. Les produits organiques formés changent. On observe une augmentation des composés organiques solubles et une diminution des composés humiques polycondensés.

Gestion et réhabilitation des sols salés

L'objectif est de ramener la salinité du sol à une valeur tolérée par les cultures. Ce travail comprend trois étapes :

* Il faut isoler la zone à réhabiliter de la source de sel. Par exemple, si la source est une nappe salée à faible profondeur, un abaissement de la nappe suffisant pour sortir de sa zone d'influence sera nécessaire avant réhabilitation ;

* Il faut évacuer les sels présents ;

* Puis il faut réaliser un contrôle permanent de l'évolution postérieure à la réhabilitation, particulièrement le système sol-nappe lorsque les sols sont valorisés par l'irrigation. Cela nécessite l'application d'une fraction de lessivage, c'est-à-dire un apport supplémentaire d'eau d'irrigation qui va se charger au cours de la percolation, et va exporter les sels en profondeur, plus loin que la zone racinaire. Cette fraction de lessivage doit être suffisante, mais doit également être calculée au plus juste car l'eau est une denrée rare dans les zones arides ou semi-arides.

La dégradation des sols par alcalinisation

Si on appelle généralement les sols alcalins — caractérisés par un pH élevé, souvent au-dessus de 9, et une forte proportion de sodium sur le complexe d'échange supérieure à 15 % aux sols salés, c'est parce qu'ils résultent eux aussi d'une dégradation suite à une concentration de la solution du sol. Mais deux points les distinguent des sols salés. Ce sont :

* La composition chimique de la solution du sol à nette prédominance bicarbonaté-sodique ;

* Une dégradation des propriétés physiques des sols qui peut survenir très tôt dans le processus de concentration, bien avant l'apparition de problèmes osmotiques ou de toxicité. Aussi, dans les environnements cultivés, la chute des rendements survient-elle bien avant la présence d'efflorescences salines à la surface des sols.

Le profil chimique particulier de ces sols peut être de cause naturelle (altération de roches cristallines dans un contexte aride, par exemple) ou bien anthropique (causé par une irrigation mal gérée avec une eau elle-même déséquilibrée vers le pôle carbonaté).

Le processus d'alcalinisation

Au cours de la concentration de la solution du sol, le premier sel à précipiter est la calcite (CaCO_3). Dans un contexte géochimique où l'alcalinité de la solution est supérieure à la teneur en ions calcium, l'alcalinité augmente, menant à des valeurs de pH élevés, rapidement au-dessus de 9. Parallèlement, les teneurs en calcium dissoutes dans la solution s'effondrent même si l'on observe fréquemment des précipitations de calcite dans les profils de sol. Cette réserve en calcium n'est pas disponible dans la solution du sol. Les proportions de sodium échangeable augmentent, et peuvent atteindre des valeurs de 40 % ! Le seuil des 15 % de sodium échangeable, considéré comme la limite pour la perte de structure du sol, est largement dépassé et la structure s'effondre. Exceptionnellement, des teneurs en sodium échangeable supérieures à 60 % ont été observées à l'état naturel dans les sols autour des lacs alcalins tropicaux — Rift africain, delta de l'Okavango (Afrique australe), Pantanal, Nhecolândia (Amérique du sud), etc. Lorsque la solution du sol est très concentrée, on peut alors observer des efflorescences de carbonates-bicarbonates de sodium de différents types à la surface des sols. Le pH des sols est alors voisin de 11.

Parallèlement à cela, dans ce genre d'environnement géochimique, le magnésium est contrôlé par la précipitation de silicates magnésiens, et ce à peu près au même facteur de concentration que le contrôle du calcium par la calcite, c'est à dire très tôt dans le processus de concentration. Le magnésium ne peut donc pas jouer le rôle d'ion bivalent pour remplacer le calcium sur le complexe et maintenir ainsi une bonne structure du sol.

Les sols alcalins évolués présentent généralement une différenciation morphologique. Elle consiste en :

- * Un horizon superficiel A sableux.
- * Un contact abrupt.
- * Un horizon B très dur, à structure généralement massive, et colonnaire dans sa partie supérieure.

Les problèmes rencontrés dans les sols alcalins

C'est donc le jeu de processus chimiques qui va conditionner de très mauvaises caractéristiques physiques des sols. Ceux-ci deviennent pratiquement imperméables, se prennent en masse en séchant empêchant la pénétration des racines et deviennent impossibles à travailler même avec une mécanisation puissante. Une croûte très dure se forme en surface qui empêche la germination et l'émergence des jeunes plants. Les problèmes structuraux s'expliquent essentiellement par le comportement et la distribution des charges autour des particules d'argiles.

En outre, il existe des problèmes secondaires induits par la chimie de la solution du sol. L'asphyxie des sols provoque l'immobilisation de certains éléments (cuivre, zinc...) et donc des carences, notamment en éléments n'ayant pas de forme réduite dissoute. Le fort pourcentage de saturation en sodium réduit d'autant la disponibilité pour les autres éléments sur le complexe d'échange. On peut donc voir des carences en calcium, dans des sols qui paradoxalement présentent de la calcite dans le profil. Enfin, le pH alcalin diminue l'assimilation de nombreux éléments nutritifs par les plantes.

Gestion et réhabilitation des sols alcalins

Le traitement pour la réhabilitation des sols alcalins ou sols sodiques est différent de celui des sols salés, car bien souvent ces sols ne sont pas salés mais présentent une forte proportion de sodium sur le complexe d'échange. On peut agir principalement à deux niveaux, d'une part sur les cations échangeables, d'autre part sur le pH. Parmi les différents modes de réhabilitation, il existe des méthodes chimiques parfois violentes, et des méthodes biologiques, particulièrement adaptées à certains pays pauvres. Il faut garder en mémoire que le seul vecteur de l'amélioration est l'eau, et que l'eau ne circule pas dans ces sols. Par exemple, au cours d'une expérimentation au Niger, le front d'humectation des sols a atteint 70 cm de profondeur après 7 mois de submersion ! C'est pour cette raison que les sols alcalins ont été considérés pendant longtemps comme irrécupérables dans les conditions économiques des pays pauvres.

Réhabilitation chimique

Parmi les apports pour le rééquilibrage du complexe d'échange, il y a :

* Les apports en calcium. L'apport de calcite serait inopérant car la solution du sol est déjà à l'équilibre vis à vis de ce sel, et il resterait sous forme solide, sans se dissoudre. Dans les sols les moins concentrés, on peut tenter des apports de gypse, sel un peu plus soluble que la calcite. Il faut cependant rester modéré, car l'imperméabilité des sols tend à maintenir le stock de sel apporté à la surface. On risque donc de créer un horizon supérieur salé sur un sol alcalin. L'apport de chlorure de calcium est beaucoup plus efficace car il s'agit d'un sel plus soluble, mais il est également beaucoup plus coûteux. Il existe des variantes sous la forme d'application de phosphogypse, un résidu de l'extraction des phosphates par l'acide chlorhydrique. Ce phosphogypse contient encore des phosphates mais reste très riche en métaux lourds et en fluor. Dans les sols alcalins, le fluor n'est pas contrôlé à des niveaux bas, comme dans la plupart des sols, justement parce que les teneurs en calcium en solution sont très faibles et que l'équilibre avec la fluorine est atteint pour des teneurs en fluor beaucoup plus fortes. La présence de fluor peut, à son tour, renforcer le contrôle des teneurs en calcium à un niveau très bas en solution.

* Les apports de sources d'acidité. Le soufre et ses composés peuvent être introduits de différente manière. Dans l'eau d'irrigation, ils permettent la fabrication d'acide sulfurique, qui réagit en combattant l'alcalinité. L'alcalinité diminuant, la calcite présente dans le sol se dissout et libère de l'alcalinité et du calcium en quantité équivalente, les taux de calcium peuvent être ainsi rééquilibrés. Il se fixe sur le complexe d'échange, éjectant le sodium. L'acide sulfurique peut être introduit directement. Cela a été le cas en Arménie, où l'acide sulfurique était un produit dérivé des industries. Un chantier spectaculaire a permis la réhabilitation de milliers d'hectares. Le terrain a été plané, aménagé, avec des canaux d'irrigation et de drainage, des drains enterrés, etc. Après un rabattement régional de la nappe à composition bicarbonatée-sodique, l'acide sulfurique a été acheminé par la construction d'une voie de chemin de fer dans des conteneurs spéciaux. L'acide a ensuite été déversé en submersion sur les parcelles à traiter.

Ce sont là les apports les plus courants auxquels il faut ajouter parfois le polysulfure de calcium (Ca18S5O2 , 14H2O) les sulfates de fer et d'aluminium (FeSO4 ou Al(SO4)3)...

L'apport de matière organique est un plus car elle augmente les taux de CO2 dans le sol, permettant la dissolution d'un peu de calcite.

Réhabilitation biologique des sols alcalins, un exemple au Niger

Une réhabilitation biologique de sols alcalins sur les bords du fleuve Niger (au Niger) a été tentée par des chercheurs du CIRAD et de l'IRD. Elle consiste à cultiver un fourrage semi-aquatique local sur en submersion des petites parcelles. Ce fourrage, *Echinochloa stagnina*, est dénommé localement le Bourgou.

Dans son environnement naturel, il est particulièrement adapté aux dépressions argileuses périodiquement inondées lors de la crue du fleuve Niger. Il s'agit d'une plante à forte production de biomasse et à photosynthèse en C4 , qui présente un puissant système racinaire fasciculé.

La culture de cette plante est facilitée par l'imperméabilité des sols alcalins qui permet de les maintenir en submersion après construction de petites diguettes. A l'issue d'une année de culture, le caractère alcalin des sols a disparu et l'analyse détaillée en croisant plusieurs types de traceurs permet d'avancer que 85 % de la réhabilitation provient du lessivage du sodium, facilité par le système racinaire, et 15 % provient du fonctionnement propre du fourrage et de son action acidifiante.

La gestion permanente pour éviter une alcalinisation anthropique revient généralement à rééquilibrer la qualité chimique de l'eau d'irrigation. On agit donc sur celle-ci, soit au niveau des canaux d'irrigation soit au champ lors de la percolation, par des apports permettant soit d'augmenter légèrement les teneurs en calcium, soit de diminuer l'alcalinité.

LA DIVERSITÉ DES SOLS

Les sols sont très divers, à l'échelle continentale et à l'échelle locale ; cette diversité est fonction des facteurs de formation des sols :

- * Les sols naissent à partir des roches : les sols sont donc divers en fonction de la diversité des roches ;
- * Les sols sont le produit de l'altération des roches par l'action de l'eau et par l'action de la vie : les sols sont donc divers en fonction des climats et en fonction des couverts végétaux ;
- * Les sols contribuent à la formation des reliefs : les sols ne sont pas les mêmes à l'amont et à l'aval d'un versant ;
- * Les sols évoluent au cours de leur histoire : les sols ne sont pas les mêmes selon leur âge ;

* Les sols sont utilisés de manières diverses par les sociétés humaines : ils ne sont pas les mêmes selon les sociétés humaines qui les utilisent et leur durée d'utilisation.

Au sein d'un paysage, par exemple un bassin versant, des sols très différents peuvent être reliés entre eux de manière fonctionnelle. L'utilisation de l'un a donc des conséquences sur les autres.

Il faut apprendre à utiliser les sols en tenant compte de leur diversité. On ne doit pas vouloir faire tout partout pareil, sinon on ne valorise pas les potentiels des sols, voire on les blesse.

LES RECHERCHES DE L'IRD ET DE SES PARTENAIRES

Diversité du sol dans le paysage : l'exemple de Benfica, en Amazonie orientale

L'IRD et ses partenaires ont étudié la diversité du sol dans le paysage dans le but d'analyser son influence sur la distribution spatiale des espèces de plantes et de faune du sol. Les scientifiques se sont limités à une approche morphologique du sol pour décrire sa variation le long de toposéquences. Ils n'ont donc pas mis en œuvre tous les outils dont dispose le pédologue au laboratoire - pour des analyses minéralogiques et géochimiques - l'objectif n'étant pas d'étudier la pédogenèse.

Le paysage de la localité de Benfica

Ce paysage est constitué de collines allongées d'extension kilométrique et de quelques dizaines de mètres de dénivelée ; ce paysage est typique des formations géologiques anciennes (Paléoproterozoïque) des boucliers brésiliens et guyanais. La différenciation de la couverture pédologique dépend de la nature de la roche-mère. Deux roches magmatiques distinctes y ont été mises en évidence : une granodiorite et un monzogranite, la seconde étant associée à un paysage généralement plus accidenté (pentes plus fortes, vallées plus étroites).

Sur monzogranite, cette étude met en évidence l'amincissement progressif du sol, de l'amont vers l'aval, avec le rapprochement de la surface des matériaux d'altération de la roche-mère (altérites) peu à pas structurés et donc peu perméables, ainsi que le développement de l'hydromorphie à la faveur de pentes faibles, dans les bas-fonds et sur des replats (figure 1). On observe ainsi le passage classique en Amazonie, sur les formations des boucliers brésiliens et guyanais, de ferralsols à des cambisols, puis à des sols hydromorphes (gleysols). Les ferralsols argileux dominent les paysages, mais leur épaisseur varie de 3 à 1 m ; leur couleur passe de brun vif à brun jaunâtre, voire brun grisâtre, traduisant un changement de régime hydrique, plus précisément un drainage vertical de l'eau déficient lorsque le sol s'amincit et que la pente est faible. Sur granodiorite, les sols sont plus variés (figure 2) : on observe en particulier une plus grande extension des sols sableux, dont le degré d'hydromorphie augmente dans les parties les plus basses du relief ; en outre, les versants longs à pentes faibles sont dépourvus de cambisols et présentent par contre des ferralsols très profonds à mi-versant, sans doute parce que les conditions de formation, de développement, de ces sols y sont plus favorables.

La profondeur du sol et le degré d'hydromorphie sont deux critères essentiels qui déterminent les conditions de l'exploration du sol par les racines, de drainage de l'eau excédentaire et de rétention de l'eau utilisable par les plantes. L'épaisseur du sol et sa couleur ont donc été les deux premiers critères, d'accès facile sur le terrain, retenus pour tester l'influence du sol sur la biodiversité.

MIEUX CONNAÎTRE LES SOLS

L'essentiel concernant les sols est connu à l'échelle mondiale : ce qu'ils sont, leur grande diversité, leurs fonctions vis-à-vis de l'eau, de l'air, de la vie, leur fertilité agricole, leur dégradation en conséquence des activités humaines. Le XX^e siècle a été le siècle de la découverte scientifique et technique des sols.

Il reste beaucoup à découvrir à l'échelle détaillée de l'utilisation des sols par les sociétés humaines, à l'échelle de l'agriculteur, qui est le principal utilisateur des sols, mais aussi à l'échelle des autres utilisateurs des sols, qui sont de plus en plus nombreux : les villes, les industries, les voies de communications, les forêts, les espaces de loisirs...

Comment créer la nécessaire cohérence entre la diversité des sols et la diversité des utilisations humaines ? On est encore loin de bien comprendre tout ce que recouvre la diversité des sols, mais aussi les concordances et les discordances entre les activités humaines et la diversité des sols.

De graves erreurs de gestion des sols ont été commises au cours du XX^e siècle. La priorité, pour la science du sol naissante, fut de contribuer à nourrir un monde en croissance rapide, puis de contribuer à gérer des environnements qui se dégradent. Pour cela, on a dû privilégier des recherches à court terme afin de développer l'utilisation des sols, sans se donner le temps de bien les connaître. D'où un certain nombre d'erreurs graves (par exemple des excès de fertilisation

chimique, des techniques agricoles qui ont détruit la structure de la surface des sols, des stratégies de mise en valeur qui ont dramatiquement appauvri les sols en matière organique...).

Il devient urgent de mieux connaître les sols par l'observation et par l'analyse. Il faut maintenant prendre le temps de développer la recherche fondamentale sur ce que sont réellement les sols, de façon à rendre plus solides les recherches finalisées et les décisions prises à partir des résultats de ces recherches finalisées.

Parmi les questions scientifiques à résoudre, on peut citer :

- * Ce que sont et comment se différencient les divers types de couvertures pédologiques ?
- * Comment, et surtout à quelle vitesse, les propriétés des sols évoluent-elles et se transforment-elles ? Cette vitesse conditionne la durabilité des sols par rapport aux activités humaines.
- * Comment les activités humaines interviennent-elles dans les transformations des sols, sachant que les modifications sont de plus en plus profondes ?
- * Quelles sont les relations entre la diversité spatiale et temporelle des propriétés des sols et la diversité de leurs fonctions (alimentaire, biologique, hydrologique, atmosphérique, mécanique...) ? La connaissance de ces relations est fondamentale pour mieux planifier l'utilisation des sols (les divers types d'agriculture et d'élevage ; les forêts ; les extensions urbaines ; les voies de communication ; les industries ; les loisirs...).

LES RECHERCHES DE L'IRD ET DE SES PARTENAIRES

Impact de l'érosion hydrique sur le cycle du carbone, une étude menée en Afrique du Sud

La dégradation de la ressource en sol affecte non seulement la fertilité des terres, les différents services écologiques ou écosystémiques rendus par les sols mais aussi le cycle du carbone dont les conséquences sur le réchauffement de la planète et ses différentes conséquences ne sont plus à démontrer.

Les travaux de l'IRD et de ses partenaires en Afrique du Sud visent à améliorer notre connaissance de l'impact de l'érosion hydrique des sols sur le cycle du carbone et le réchauffement climatique. Les sols constituent le plus grand réservoir terrestre de carbone (plus de deux fois le réservoir de carbone de l'atmosphère). Or l'érosion hydrique redistribuerait chaque année entre 0.3 à 0.4% de ce stock (4 à 6 Gt) soit l'équivalent de la quantité de carbone émise annuellement par l'utilisation des combustibles fossiles (~4Gt).

En dépit de son importance majeure, l'érosion du carbone organique (Co) des sols reste méconnue. Un besoin de connaissance existe en particulier pour évaluer le devenir du Co érodé à l'échelle des paysages, à savoir s'il est décomposé pour retourner vers l'atmosphère sous forme de carbone inorganique, s'il est piégé au sein des versants dans des sédiments ou bien s'il est exporté vers le réseau hydrographique. Ce projet se propose de répondre à deux des questions majeures soulevées :

- * Quelles sont les quantités et les formes de Co susceptibles d'être détachées, sédimentées ou exportées ?
- * Quelles sont les conséquences de l'érosion sur la décomposition du Co au niveau du profil de sol, dans les eaux de ruissellement et dans les zones de dépôt ?

Une étude menée au cours de trois saisons des pluies

Les recherches seront menées à l'échelle du versant là où se produit l'essentiel des redistributions de Co dans les écosystèmes terrestres. Les quantités et les formes de Co détachées, sédimentées ou exportées seront évaluées au cours de trois saisons des pluies, après chaque événement érosif. Le Co détaché des sols sera estimé au moyen de placettes de 1m², disposées au sein du versant, celui exporté au moyen d'une station limnologique tandis que le Co sédimenté sera estimé grâce à un réseau d'observations ponctuelles. Les différentes formes de Co seront évaluées par des analyses chimiques fines (spectroscopie, chromatographie gazeuse, fumigation-extraction).

L'évaluation des conséquences de l'érosion sur la décomposition du Co sera quantifiée au laboratoire par incubation en conditions contrôlées de matériel érodé et collecté à différentes positions du versant, de sol érodé ainsi que de sol en place non érodé. Pour chacune de ces situations, les émissions de CO₂ leurs teneurs en 13C et âge 14C seront comparées avec celles du Co avant et après incubation.

L'utilisation de ces données au travers de la modélisation et d'un SIG devrait permettre de prédire les temps de résidence moyens du Co dans les versants et de quantifier l'impact de l'érosion hydrique sur les flux de carbone entre le sol et l'atmosphère. Enfin, nous attendons de ce projet qu'il renforce une équipe de chercheurs aux compétences complémentaires qui a acquis l'expertise requise pour étudier les interactions entre érosion et dynamique du Co à l'échelle du paysage.

L'Amazonie brésilienne et son exceptionnelle richesse biologique

L'Unité Mixte de Recherche Biosol a choisi l'Amazonie brésilienne comme l'un de ses chantiers principaux. L'exceptionnelle richesse biologique de cette région est affectée par la transformation très rapide des écosystèmes sur les « fronts pionniers ». L'agriculture familiale est un acteur principal de cette transformation depuis la construction des grands axes routiers qui ont favorisé dans les années 1970 la migration de populations en quête de terres.

Un peu d'histoire

Au sujet de l'Amazonie, les scientifiques et l'opinion publique du « Nord » s'inquiètent des répercussions de la déforestation sur le climat global et la biodiversité, mais s'interrogent rarement sur les acteurs et les déterminants de la transformation des systèmes écologiques. Dans les années 60-70, les gouvernements brésiliens décidèrent, pour des raisons géopolitiques, la construction de routes reliant Brasília à Belém au Nord et à Porto Velho à l'Ouest, ainsi que la Transamazonienne, axe Est-Ouest. Il s'agissait d'une part d'affirmer la souveraineté du Brésil sur ses territoires amazoniens peu peuplés, d'autre part d'attirer vers ces territoires des populations sans terre plutôt que de mettre en œuvre une réforme agraire dans les régions du sud et du nord-est. Ces migrations ont fortement accru et diversifié la population amazonienne. Elle a quadruplé en 30 ans pour atteindre aujourd'hui 18 millions d'habitants d'origines, cultures et projets divers, comme leurs savoirs et savoir-faire qui ont le plus souvent été acquis dans d'autres milieux.

Le front pionnier de la Transamazonienne

Le territoire choisi pour ces recherches est le front pionnier de la Transamazonienne, autour des villes de Marabá et d'Altamira, dans l'état du Pará (cf carte). Ce territoire présente une diversité de situations intéressantes à comparer, liée tant au milieu physique, qu'à l'origine des colons et aux conditions de la colonisation. C'est aussi une région stratégique pour l'économie brésilienne, avec le barrage de Tucuruí sur le Tocantins et les mines de Carajás. Plusieurs dizaines de milliers de familles de petits agriculteurs s'y sont installées depuis 30 ans.

Les petits agriculteurs ont tendance à reproduire leur exploitation par des déplacements successifs vers les terres les plus vierges, après avoir vendu celles qu'ils ont défrichées et transformées en pâturages peu productifs à de grandes exploitations d'élevage extensif. Le rythme d'implantation des pâturages est aujourd'hui plus rapide : une seule culture vivrière précède, voire accompagne, la plantation de la graminée fourragère. Pour les agriculteurs disposant de peu de capital de départ, cette orientation est celle qui valorise au mieux le travail familial et la terre disponible. Malgré les mesures gouvernementales incitant les agriculteurs à rester sur leur lot en préservant le couvert forestier et en diversifiant leur production, et bien que les conditions du milieu physique soient favorables à une diversification, on assiste encore à une dynamique rapide de transformation de la forêt en pâturages, suivant une logique de déprise et de concentration foncière, résultant de l'utilisation « minière » des ressources naturelles.

Importance de l'agriculture familiale

Si les préoccupations environnementalistes ne sont pas absentes au Brésil, elles sont renforcées par la reconnaissance dans les années 1990 de l'importance sociale et économique de l'agriculture familiale, qui se traduit par la mise en place de politiques publiques : régularisations foncières, accès au crédit, financement d'infrastructures et de services, assistance technique, etc. L'enjeu de ces politiques est la reproduction sur place des exploitations agricoles familiales. C'est une condition nécessaire au ralentissement de la déforestation et à la conservation de la biodiversité. Ce dernier objectif ne doit pas se limiter à la mise en réserve d'îlots d'écosystèmes forestiers. Il doit aussi être recherché dans les écosystèmes transformés par les activités humaines, car l'extrême simplification des paysages que l'on observe en arrière des fronts pionniers s'accompagne d'une forte diminution de la biodiversité, génératrice de dégradations des services écosystémiques (notamment la régulation des cycles biogéochimiques : de l'eau, du carbone entre autres éléments, mais aussi les productions de bois, d'aliments etc.). Il convient donc de promouvoir des modes de gestion des milieux qui valorisent durablement leurs ressources et fonctions, et assurent des conditions de vie satisfaisantes aux populations.

Ces recherches abordent les deux objectifs de conservation de la biodiversité et de promotion de modes de gestion durable des milieux amazoniens, avec la conviction qu'ils sont indissociables et ne peuvent être atteints indépendamment. Elles se fondent en particulier sur l'hypothèse que le maintien d'une activité biologique diverse et intense dans le sol est un facteur de durabilité des agrosystèmes.

Une recherche pluridisciplinaire

Dans un premier programme, notre objectif général était de mieux comprendre les interactions entre la biodiversité, qu'elle soit épigée (végétation) ou endogée (faune et microflore), et le fonctionnement du sol. De 2002 à 2006 la recherche a été réalisée dans une localité d'agriculture familiale située à 100 km à l'Ouest de Marabá : « Benfica » (5°16'

S ; 49°50' W), qui regroupait en 2003, sur 6000 hectares, 135 familles sur des lots d'une cinquantaine d'hectares. Un grand nombre de chercheurs de l'IRD de diverses disciplines, y compris de sciences humaines, y ont travaillé avec leurs étudiants. Pour en finir avec certaines controverses, notre volonté a été d'amener sur le même terrain divers spécialistes pour qu'ils confrontent leurs analyses.

Depuis 2007, dans le cadre des programmes AMAZ, dirigés par Patrick Lavelle, à la suite des travaux engagés dans le cadre de la Zone Atelier Amazonie (CNRS) résolument interdisciplinaire, nous cherchons à combler les lacunes dans nos connaissances, soulignées par de récentes publications (Mattison et Norris, 2005), par la mise au point d'indicateurs, et par l'exploration statistique et la modélisation des relations entre les déterminants socio-économiques — sur lesquels peuvent agir les politiques publiques —, la composition et la structure du paysage, la biodiversité et les autres services écosystémiques. Nous comparons trois localités au Brésil et trois localités en Colombie.

Vers un simulateur informatique des sols

La compréhension et l'analyse des propriétés relatives à l'activité biologique et de transport de fluides des sols constituent un élément essentiel pour l'étude de leur fertilité et de leur implication dans les questions de variabilité climatique. Ces aspects incluent en particulier les données écologiques liées au changement climatique et à la séquestration du carbone. Depuis maintenant une vingtaine d'années, les compagnies pétrolières mènent des recherches visant à relier les caractéristiques géométriques et structurelles des sols avec les ressources géologiques.

Par exemple, la technique d'imagerie appelée « sismique réflexion », abondamment utilisée notamment pour la prospection offshore, permet d'obtenir de véritables radiographies du sol. Ces images peuvent être analysées au moins semi-automatiquement grâce à des outils sophistiqués de traitement d'images par ordinateur.

Explorer les sols en 3 dimensions

Cependant, une analyse fine des propriétés biologiques des sols requiert une analyse de leurs caractéristiques structurelles au niveau microscopique. Une telle analyse demande la mise en œuvre d'outils d'investigation permettant d'explorer le sol en trois dimensions avec des résolutions de l'ordre de quelques microns. Les premières approches dans ce sens (années 1990) utilisaient des coupes du sol (lames minces) à l'image de la création des premiers atlas anatomiques du corps humain.

Ensuite, durant cette dernière décennie les techniques d'imagerie de tomographie tridimensionnelle se sont considérablement développées notamment dans le contexte d'applications médicales et industrielles. Aussi, depuis quelques années, des images tomographiques tridimensionnelles d'échantillons de sol avec de résolutions fines (3 à 10 μm) commencent à être exploitées par les chercheurs en sciences du sol. Le challenge consiste à mieux comprendre les propriétés d'hétérogénéité des sols qui était surtout perçu comme un média plus ou moins homogène sur lequel on effectuait des mesures globales.

L'introduction de ce nouveau moyen d'observation des structures microscopiques tridimensionnelles du sol devrait permettre à terme de mieux typer, en tout cas de manière plus déterministe, le fonctionnement biologique des sols. Par exemple, une analyse fine des propriétés géométriques de l'espace poral (espace libre) devrait permettre de mieux appréhender la spatialisation de l'activité microbienne. Il est clair que ces nouvelles approches induisent la mise en œuvre d'outils sophistiqués de mathématiques et d'informatique assez nouveaux en sciences du sol. Par exemple, la caractérisation de la géométrie des structures clés pour le fonctionnement du sol (espace poral,...) pose des problèmes encore ouverts de vision par ordinateur (géométrie algorithmique...) voire de mathématiques pures (géométrie algébrique...).

Au croisement de l'informatique, des mathématiques et des sciences de la vie

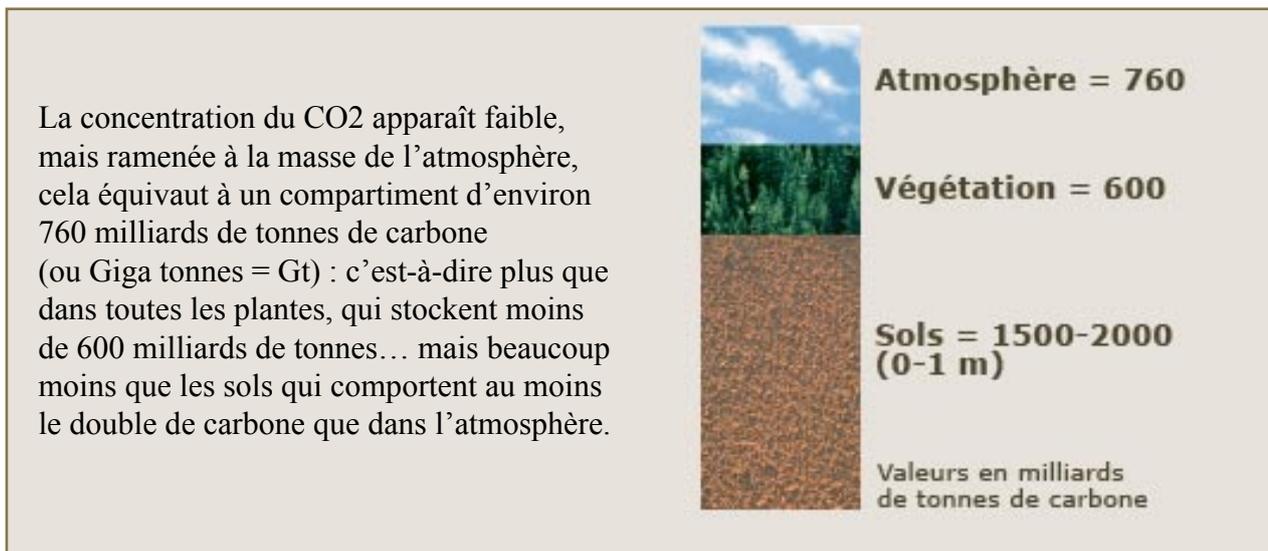
Les chercheurs de l'Unité GEODES de l'IRD développent cette nouvelle direction de recherche depuis maintenant plusieurs années. Cette problématique à l'intersection de l'informatique, des mathématiques, et des sciences de la vie s'inscrit dans le nouveau domaine des Sciences de la Complexité qui constitue le cadre scientifique de GEODES.

L'objectif à terme est de mettre en œuvre un simulateur informatique de sol qui permettrait d'évaluer différents scénarios sans avoir recours à des expérimentations classiques beaucoup plus lourdes à mettre en œuvre et donc plus limitées dans leur diversité.

Les données d'entrée seraient des images tomographiques tridimensionnelles et différentes informations sur la nature du sol ainsi que des scénarios (précipitations, disséminations d'engrais...). Les données de sortie du simulateur seraient les propriétés de fonctionnement biologiques du sol en termes de rétention d'eau, de séquestration du carbone... Ce type d'approche devrait aussi permettre à plus long terme de mieux prévoir les propriétés du sol liées à l'activité biologique en fonction de sa structure interne.

Sols et changements climatiques

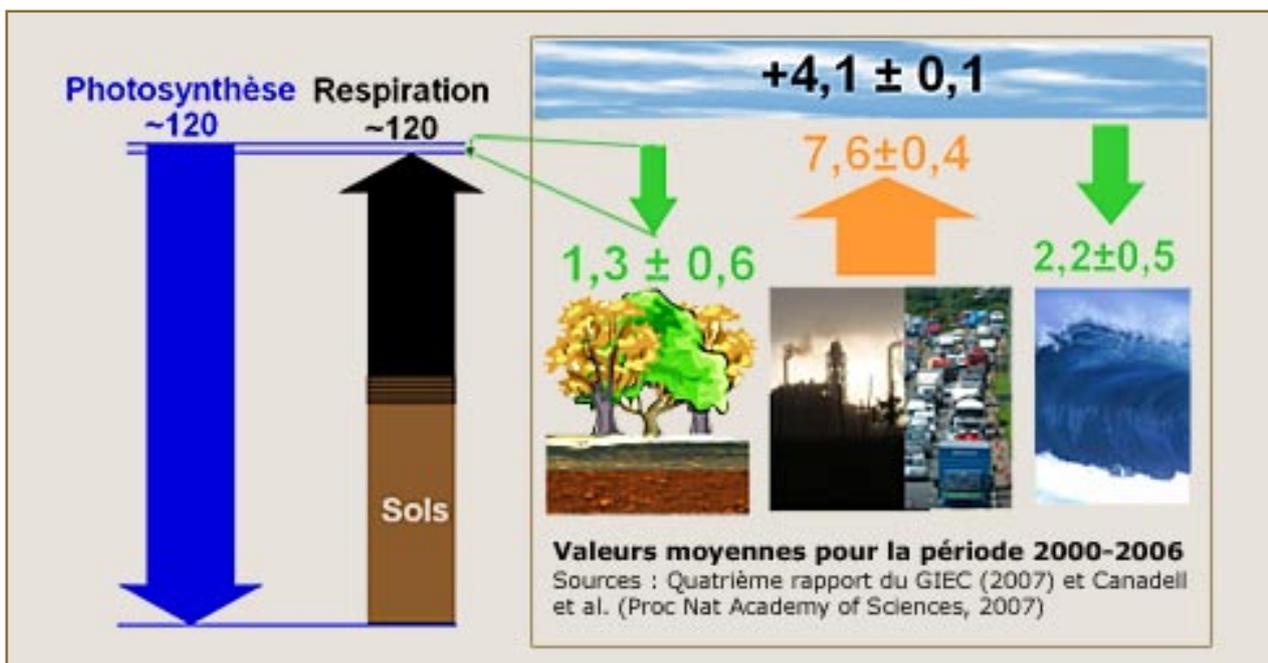
Au premier abord le lien entre les sols et la composition de l'atmosphère, en particulier les concentrations des gaz à effet de serre, n'est pas évident ! Pourtant les sols sont au cœur du cycle du carbone, qui compte deux importants gaz à effet de serre : le CO₂, ou dioxyde de carbone qui est, après la vapeur d'eau, le gaz à effet de serre le plus important en concentration dans l'atmosphère avec 380 ppm, et le CH₄ ou méthane.



La respiration du sol

Tout irait bien si ces compartiments étaient isolés les uns des autres ! Mais, ces compartiments imposants échangent en permanence du carbone.

Ainsi la végétation retire annuellement et globalement de l'atmosphère environ 120 Gt de C via la photosynthèse, soit plus d'un atome de carbone atmosphérique sur 6. Mais dans le même temps, les plantes respirent et rendent à l'atmosphère environ la moitié de ce qu'elles ont retiré. Le reste retourne lui aussi presque entièrement dans l'atmosphère selon un processus appelé la « respiration du sol ». En fait sous ce terme de « respiration du sol » deux principaux processus sont réunis : la respiration autotrophe racinaire et la respiration hétérotrophe qui domine le plus souvent. Au final, actuellement, la photosynthèse est légèrement supérieure à la respiration des plantes et du sol c'est-à-dire que les écosystèmes terrestres retirent du CO₂ de l'atmosphère. Ce puits de carbone est de l'ordre de 1 à 1,5 Gt de C par an — ce qui permet de freiner l'augmentation annuelle de CO₂ dans l'atmosphère — une partie des rejets de CO₂ dus aux activités humaines est ainsi absorbée par les océans et par les écosystèmes terrestres.



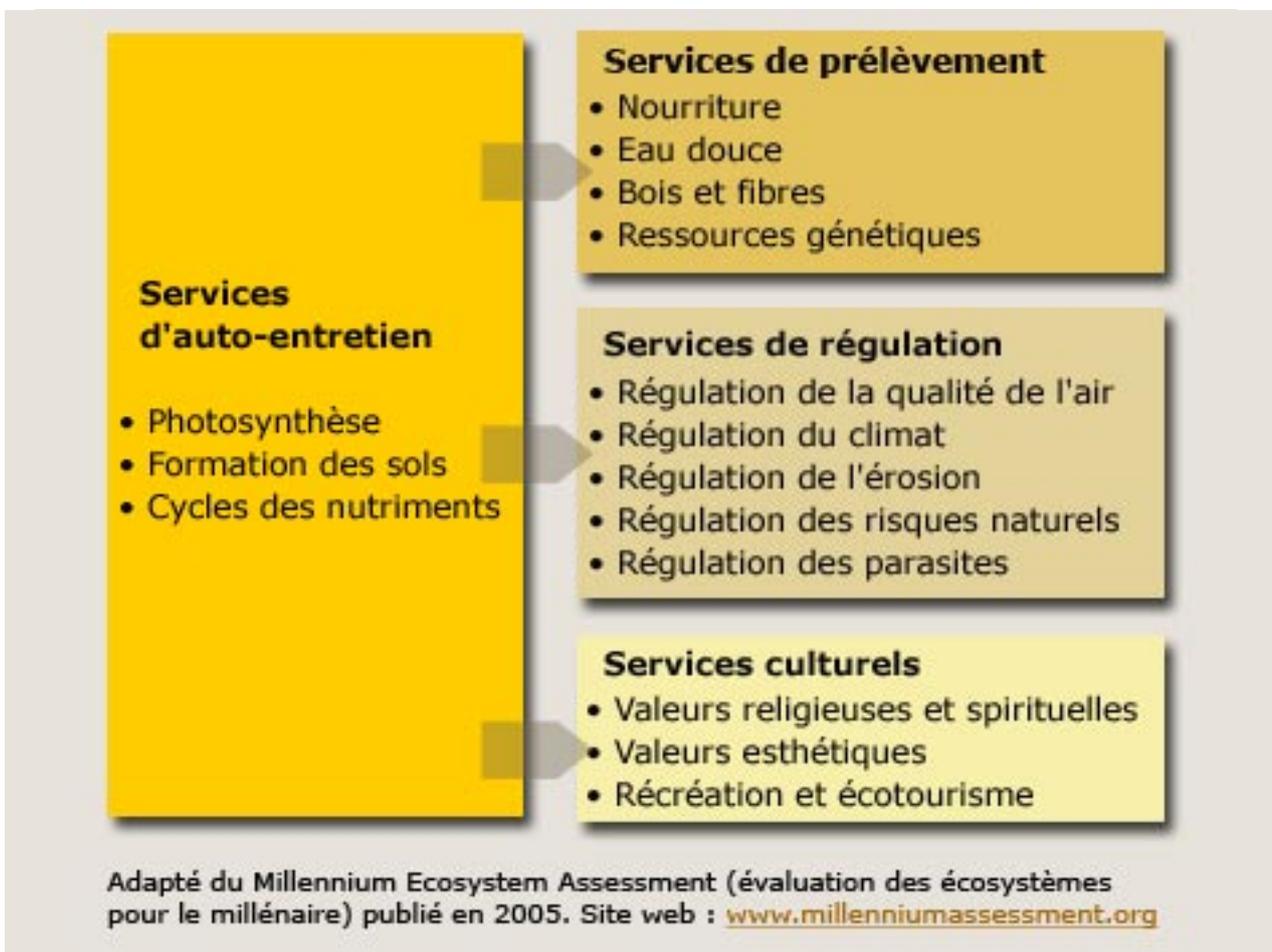
Le carbone retiré de l'atmosphère par les plantes (parfois il est dit que ce carbone est « séquestré », puisque retiré pour un temps relativement long) se retrouve stocké dans les sols sous la forme de matière organique plus ou moins évoluée.

Il apparaît donc que les modes de gestion des sols, qui permettent de préserver le carbone dans les sols, sont primordiaux pour le contrôle de la composition atmosphérique. Des modifications d'usage des terres et des pratiques agricoles inadaptées peuvent conduire à une libération nette de carbone des sols dans l'atmosphère, aggravant les problèmes liés aux gaz à effet de serre.

En revanche, les mesures ayant pour résultat des augmentations de contenu de carbone peuvent contribuer à l'atténuation des changements climatiques. En outre le maintien voire l'augmentation du carbone organique est primordial pour une gestion agronomique durable et la prévention ou la récupération des terres agricoles dégradées et donc le maintien de la sécurité alimentaire.

Les services écosystémiques rendus par les sols

Le carbone organique est le constituant principal de la matière organique du sol qui est un des déterminants importants de la fertilité du sol, de la capacité de stockage en eau et de l'activité biologique. Ainsi les pratiques qui maintiennent et augmentent le carbone organique sont presque toujours synonymes de réhabilitation et durabilité de la gestion des terres. La matière organique du sol et donc le carbone du sol assurent ou permettent de nombreux services écosystémiques indispensables à nos sociétés.



Dans un premiers temps, depuis la conférence des Nations Unies sur l'Environnement à Rio de Janeiro en 1992, et l'ouverture à signature de la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques, les préoccupations des sociétés relayées dans les programmes de recherches ont tout d'abord concerné les flux des gaz à effet de serre en termes de quantification des flux globaux, identification et quantification des sources et des puits, mais surtout réduction des sources et augmentation des puits. Ces deux derniers aspects sont regroupés sous le vocable de « mitigation ».

La vulnérabilité des écosystèmes

Plus récemment, après la publication du 3e rapport d'évaluation du Groupe Intergouvernemental d'Experts sur le Climat

en 2001 et du Millennium Ecosystem Assessment en 2005, la vulnérabilité des écosystèmes a pris une dimension de plus en plus centrale dans les débats et questionnements de la société et de la communauté scientifique. En effet, les sols et leurs cortèges biotiques vont être aussi soumis aux changements climatiques qui concerneront principalement les températures et les précipitations. Mais ce sont surtout les événements extrêmes comme des vagues de chaleur ou des sécheresses prolongées qui perturberont fortement les écosystèmes et leur capacité d'adaptation, en particulier dans les régions les plus vulnérables comme le bassin méditerranéen.

L'augmentation globale des températures perturbera le cycle du carbone, en particulier la respiration hétérotrophe. Or, tout changement dans ce flux peut avoir des conséquences très importantes. La composante hétérotrophe résulte de l'activité des microorganismes et de la faune du sol qui décomposent la matière organique. Cette composante représente plus de 50% de la respiration totale du sol. Le cycle du carbone manque d'études à la fois fonctionnelles et holistiques qui prennent en compte les interactions entre les différents acteurs biotiques. Certains auteurs (Raich et Schlesinger, 1992) ont estimé qu'une augmentation globale des températures de seulement 0,3°C par an se traduirait par une augmentation de la respiration du sol de 2 milliards de tonnes de C par an, soit une annulation du puits biosphérique actuel.

La sensibilité du carbone organique et de la respiration hétérotrophe par rapport à une augmentation de température fait l'objet d'un intense débat. Le seul consensus est que les taux de décomposition obtenus à partir d'observations et d'expériences avec les conditions actuelles sont inadéquats pour prévoir les effets des changements climatiques sur le stock global de carbone du sol. Ce débat recoupe les préoccupations actuelles sur le « priming effect », en effet des études récentes semblent indiquer qu'une augmentation des entrées de matière organique fraîche (via les résidus ou la rhizodéposition) peut entraîner une minéralisation accrue sur le court terme de matière considérée comme plus ou moins stable.

Une seule certitude demeure, les sols présentent un capital non renouvelable à l'échelle humaine et doivent être préservés. Le principal défi actuel est de mettre en place des systèmes de culture permettant à la fois une économie des intrants chimiques par valorisation des ressources naturelles et une intensification des pratiques pour accroître la productivité. Tout ceci implique de diminuer la déforestation et la dégradation des sols et surtout de prendre en compte les impacts environnementaux (érosion, lixiviation, pertes en biodiversité, gaz à effet de serres, etc.).

FAIRE CONNAÎTRE LES SOLS

La "Terre" est connue... le «sol» ne l'est pas. Telle est la situation en ce début de XXI^e siècle. Le sol n'étant pas ou très peu enseigné aux enfants et dans les universités, les citoyens ne le connaissent que très mal. Ils n'en ont souvent qu'une vision très réductrice :

- * Ce n'est que la couche superficielle cultivée, du champ ou du jardin
- * Ce n'est que la terre d'un chantier de construction
- * Ce n'est que la terre qui salit les vêtements des enfants
- * Ce n'est que la terre des cimetières...
- * Et heureusement qu'il y a les vers de terre pour rappeler que le sol est vivant...

Le réveil des responsables politiques et techniques est en cours depuis quelques années. La bonne gestion, durable, des sols, devient une priorité. On en parle, on lance des programmes de recherche et d'actions... mais attention, beaucoup de ceux qui, maintenant, parlent des sols avec conviction, ne connaissent pas vraiment les sols, si ce n'est sous la forme de banalités (l'humus, les latérites, l'érosion ...) et de quelques chiffres très réducteurs (taux de matière organique, teneur en sels solubles et en métaux lourds...).

Le sol est un milieu naturel, un corps naturel, qu'il faut apprendre à découvrir, à regarder, à comprendre par le regard et par le toucher. Ceci doit être enseigné, dès l'école primaire. Il y a urgence.

Les priorités de l'éducation au sol :

- * Où est le sol ?
- * Comment voir le sol ?
- * Comment comprendre le sol en le décrivant ?
- * Les fonctions du sol
- * Les relations entre les sols et les Hommes
- * La diversité des sols
- * L'histoire des sols
- * L'importance des sols pour l'avenir des sociétés humaines et pour l'avenir de l'ensemble des grands milieux du Monde : l'atmosphère, l'hydrosphère, la biosphère.

LES RECHERCHES DE L'IRD ET DE SES PARTENAIRES

Afrique du Sud : une école d'été pour mieux comprendre les sols

L'IRD a organisé une école d'été sur la caractérisation hydro-pédologique des terres dégradées du 15 au 30 juin 2007 dans la Province de KwaZulu Natal, une province largement défavorisée d'Afrique du Sud.

Cette formation intensive visait à former de jeunes scientifiques, des acteurs du monde agricole et du développement local à une meilleure reconnaissance de la dégradation des terres et à ses conséquences sur la durabilité des ressources en sol et en eau. Cette formation a bénéficié des expérimentations de terrain menées dans le bassin versant de Potshini (Nord ouest de la province) par l'IRD et l'Université de Kwazulu natal pour poursuivre des objectifs scientifiques devant aider à la meilleure conservation voire à la réhabilitation des sols.

Une plus grande prise de conscience par les jeunes scientifiques ou acteurs locaux du développement durable des interactions au sein des écosystèmes terrestres favorisera le développement durable de la région concernée.

Le bassin versant expérimental de Potshini

La formation a eu lieu dans le bassin versant expérimental de Potshini (2 km²), un petit bassin versant agricole de la partie amont de la province du KwaZulu-Natal en Afrique du Sud. Il fait partie du bassin de la Thugela (30 000 km²) l'un des plus grands d'Afrique du Sud.

Le site est situé en amont de ce bassin, à 250 km au Nord de l'Université de Kwazulu Natal. Il est étudié par les équipes de l'IRD et de la SBEEH (School of Bioresources Engineering and Environmental Hydrology) dans le cadre d'un projet international financé sur les innovations à petite échelle et leur impact sur la ressource en eau et reconnu par l'UNESCO comme ayant une importance stratégique pour tous les habitants de ce bassin. Ce site est équipé de collecteurs de ruissellement de surface, de stations de mesures météorologiques et d'évapo-transpiration.

L'innovation à petite échelle (SSI Small Scale Innovation) est un projet international financé pour deux sites (Afrique du Sud et Tanzanie) afin d'améliorer l'agriculture à petite échelle et pour estimer les perturbations des ressources en eau dans le bassin où de vastes étendues sont consacrées à de l'agriculture à petite échelle et aux techniques de collectes de l'eau. Comprendre les mécanismes à une échelle localisée et de bassins versants conduit à améliorer les estimations des ressources en eau à une échelle plus globale et internationale.

Les enjeux de la formation

– La description des sols

L'école d'été a repris la démarche classique de description des sols fondée essentiellement sur des observations de profil pédologiques, l'identification de caractères significatifs spécifiques à la dégradation des terres et la réalisation d'un diagnostic

L'observation du sol en place conduit à identifier des caractères qui sont utilisés pour faire des diagnostics. Ces diagnostics intéressent : la cartographie, la pédogenèse, le fonctionnement du sol, sa classification, son utilisation agronomique, sa protection, sa réhabilitation... Suivant les objectifs, les caractères pris en compte sont différents. Les diagnostics sont souvent l'occasion de questionnements donc de retour à l'observation. Dans certains cas, le diagnostic est remis à plus tard, en attendant des informations complémentaires telles que analyses, mesures hydrauliques, etc. La démarche est donc longue et précise. Le spécialiste, fraîchement descendu dans une fosse pédologique est dans la position du garagiste face à une voiture en panne : il lui arrive parfois de comprendre tout de suite ce qu'il voit mais, le plus souvent, il doit réaliser de nombreux tests pour établir ses diagnostics. Le sol se révèle seulement à celui qui se donne le mal de l'examiner de près.

– L'évaluation de l'hydrodynamique des sols

La simulation de pluie est un outil privilégié pour la recherche sur les transferts de matière car elle permet d'apprécier et de quantifier rapidement, et en conditions contrôlées, l'influence des différents paramètres impliqués dans les processus intervenant à la surface et dans les premiers décimètres du sol lors d'une pluie (infiltration, battance, ruissellement, érosion et transport de particules et de polluants organiques ou minéraux). Les simulations de pluie se fondent sur l'utilisation de microplacettes de 1m² insérées dans le sol et l'utilisation d'un simulateur de pluie développé par une équipe de chercheurs de l'Orstom-IRD permettant de reproduire toutes formes d'averses et d'étudier la dynamique de l'eau à la surface du sol.

Le sol : une ressource non renouvelable

La dégradation des terres, c'est-à-dire la perte de la ressource en sol et de productivité des sols de toutes sortes, touche

jusqu'à un milliard de personnes dans le monde. Cette dégradation est le résultat d'un ensemble de facteurs, dont la sécheresse et les pratiques d'agriculture et d'aménagement forestier non durables. Elle peut mener à la rareté de la nourriture, la pénurie d'eau, la perte de revenus, des conflits portant sur l'utilisation des ressources et la dégradation de l'environnement.

L'Afrique est souvent la plus durement touchée par ce phénomène. Ceci est particulièrement vrai dans les zones semi-arides comme les zones pentues situées au nord de la province de KwaZulu Natal en Afrique du Sud où la combinaison entre un climat agressif et des pratiques culturales (principalement le surpâturage) induisent une dégradation forte des terres.

Dans cette région comme dans beaucoup de régions du monde, il existe un lien étroit entre la pauvreté et la dégradation des terres. Celle-ci touche en grande majorité les pauvres en milieu rural, puisque la terre est essentielle à leur survie. Les pauvres en milieu rural doivent souvent se faire concurrence entre eux pour des ressources naturelles en diminution. Les sols s'épuisent de plus en plus, ce qui perpétue le cycle de la pauvreté.

MIEUX UTILISER LES SOLS

Les sols étant mieux connus, il faut se donner un certain nombre d'objectifs majeurs :

Planifier l'utilisation des sols en fonction de leurs caractéristiques et en fonction des objectifs de développement : il s'agit de mettre en adéquation les caractéristiques des sols et les utilisations que l'on veut en faire (agriculture, routes, lotissements urbains...). Il est, par exemple, aberrant d'élaborer des Plans Locaux d'Urbanisme et des Schémas de Cohérence Territoriale sans tenir compte des sols et de leurs propriétés : c'est pourtant ce qui se fait, dans la majorité des cas, en France et ailleurs.

Pour ce qui est de l'agriculture, il ne faut plus dépasser les capacités des sols à retenir les engrais et les pesticides, quitte à produire un peu moins à l'hectare. Il faut également tenir compte de leurs limitations à régénérer leur structure, leur porosité, leur teneur en matière organique, leur activité biologique. Ainsi, l'appauvrissement de la surface des sols, l'érosion et les pollutions seront considérablement réduits.

Les techniques agricoles, mais aussi les techniques de construction des bâtiments et des routes ou les techniques d'épandage des déchets, doivent être adaptées à la diversité des sols : il n'y a pas de solution technique unique applicable à tous les sols.

Enfin, et c'est un point délicat, il y a nécessité de pouvoir contrôler l'action de chacun concernant les sols dont il a la propriété, c'est-à-dire la responsabilité. En effet, la modification d'un sol en un lieu donné peut avoir des conséquences graves sur d'autres sols, sur les eaux, sur la faune, sur des constructions situées à plus ou moins grande distance et aussi dans le temps. On ne peut donc pas continuer à laisser aux propriétaires le droit de faire ce qu'ils veulent de leurs sols. Des législations sont nécessaires; elles existent déjà dans certains pays comme l'Allemagne et la Suisse.

Il faut définir des règles de gestion des sols afin d'éviter les conflits entre les divers utilisateurs des sols :

- * Conflits pour l'appropriation des «meilleurs» sols, des «bonnes terres» pour tel ou tel usage ; conflits entre les divers types d'utilisateurs (agriculture, urbanisation, industries, épandage de déchets...);
- * Conflits résultant de l'utilisation inadaptée des sols (érosion, sédimentation, pollutions...);
- * Conflits quant à l'utilisation de nouvelles terres, en particulier pour l'agriculture (Amazonie, régions péri-polaires, régions péri-désertiques...).

Ces conflits peuvent être locaux, mais ils peuvent également concerner plusieurs pays.

LES RECHERCHES DE L'IRD ET DE SES PARTENAIRES

L'exemple du front pionnier d'Amazonie orientale

Nos études de localités du front pionnier d'Amazonie orientale montrent que la mise en culture des exploitations ne tient pas compte, le plus souvent, de la diversité du sol. Celle-ci est découverte progressivement par les agriculteurs. La dynamique de transformation en « tout-pâturage » semble davantage déterminée par le contexte socio-économique que par les potentialités du milieu physique.

A l'échelle régionale, pour donner aux agriculteurs les mêmes chances de réussite, la localisation et l'aire des lots attribués devrait tenir compte de l'hétérogénéité du milieu physique. A l'échelle de l'exploitation, la recherche d'alternatives au modèle dominant de mise en valeur, en particulier l'introduction de cultures pérennes, devrait considérer les potentialités variables du milieu, dans l'espace, et dans le temps en fonction des pratiques. La variation du sol au sein d'une

exploitation d'une cinquantaine d'hectares est importante. La profondeur et le degré d'hydromorphie des sols sont deux critères essentiels de leur aptitude culturale, puisque les conditions d'enracinement des cultures, de drainage de l'eau excédentaire et de rétention de l'eau utilisable par les plantes en dépendent.

Les agriculteurs tirent souvent parti des zones de bas-fonds restant humides en saison sèche, en y implantant une graminée tolérant l'excès d'eau en saison des pluies. Les sols les plus argileux, qui sont aussi les plus profonds, et les mieux drainés en conditions naturelles, se compactent dans les pâturages et sont pour cette raison peu appréciés, alors qu'ils seraient adaptés à des cultures fruitières pérennes.

Contact auteurs :

Conseiller scientifique : **Roland Poss** [roland.poss@ird.fr]

Les auteurs :

Alain Ruellan [ruellan@agropolis.fr]

Éric Blanchart [eric.blanchart@ird.fr]

Alain Brauman [alain.brauman@ird.fr]

Michel Grimaldi [michel.grimaldi@ufra.edu.br]

Olivier Grünberger [olivier.grunberger@ird.fr]

Laurent Barbiero [barbiero@lmtg.obs-mip.fr]

Vincent Chaplot [vincent.chaplot@bondy.ird.fr]

Olivier Monga [olivier.monga@ird.sn]

Martial Bernoux [martial.bernoux@ird.fr]