

# QUELLES RECHERCHES SUR LES **SOLS AGRICOLES ?**



AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE

ANR

## Conclusions de la Consultation Scientifique Prospective sur les sols

Novembre 2012 - Avril 2013

À la demande du Comité scientifique Environnement et Développement Durable de l'ANR, du Comité de pilotage du programme AGROBIOSPHERE et de l'Alliance ALLENI, l'ANR a entrepris une consultation scientifique prospective afin d'identifier les thèmes de recherche les plus pertinents en fonction des questions qui se posent dans la société et dans les milieux scientifiques et techniques. Deux journées de séminaire ont rassemblé une vingtaine de scientifiques. Cette note en présente les principaux résultats.

La consultation portait sur les sols productifs, agricoles, forestiers et prairiaux, puis s'est élargie aux sols périurbains. Le sol y est considéré comme un des éléments de la biosphère essentiels à la vie, comme l'eau et l'air, comme une ressource qu'il convient de gérer de manière à en assurer la viabilité et de manière à assurer ses fonctions productives.

En conséquence, les résultats de cette consultation sont présentés ainsi :

- Le sol vu comme un patrimoine à gérer ;
- Le sol vu comme un lieu de multifonctionnalité ;

Mais également le sol, lieu de pratiques productives nécessitant des outils et modèles d'étude spécifiques.

Ce document a été élaboré au sein du département Environnement et Ressources Biologiques (ERB) de l'ANR. Il a été rédigé en collaboration par Antonio Bispo, Claire Chenu, Michel Griffon, Emmanuelle Lemaire, Christian Valentin et Christian Walter. Il fait suite au compte rendu des journées de réflexions pour lesquelles le groupe de travail était étendu à une vingtaine de scientifiques, consultés *intuitu personæ* : Berthelin Jacques, Billet Philippe, Chabaux François, Doelsch Emmanuel, Feller Christian, Gaillardet Jérôme, Gruau Gérard, Husson Olivier, Jocteur-Monrozier Lucile, Keller Catherine, Le Roux Xavier, Manichon Hubert, Marron Pierre-Alain, Munch Jean-Charles, Pellerin Sylvain, Reboud Xavier, Recous Sylvie, Richard Guy, Roger-Estrade Jean, Schwartz Christophe, Stokes Alexia et Thiebaut Luc.

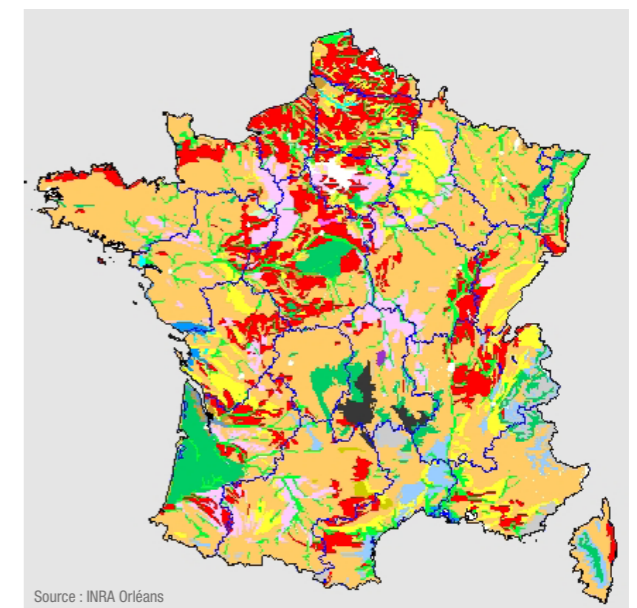
Le sol,  
un patrimoine



Parler du sol, c'est parler des sols. Ils sont en effet d'une infinie diversité résultant du substrat, du climat et de l'action des sociétés. Les sols sont des milieux en transformation perpétuelle. D'une part, ils se créent en permanence à des rythmes géologique et anthropique, d'autre part ils se dégradent à un rythme accéléré en raison des usages dont ils sont l'objet. Formation et dégradation sont les deux aspects fondateurs de la dynamique de leur évolution. Nos sociétés ont la double responsabilité de protéger les sols et de les utiliser de manière optimale, en garantissant leur viabilité tout en assurant leur vocation productive à la hauteur des besoins, c'est-à-dire en les gérant comme un patrimoine. Il conviendra donc de placer les notions de conflits d'usage des sols (land-use/land grabbing,...) au centre de ce cadre d'étude.

**TYPE DE SOL**

- ▷ Pas de sol
- ◀ Sols bruns et bruns calcaires
- ◀ Sols lessivés dégradés
- ◀ Rendzines
- ◀ Sols hydromorphes
- ◀ Sols isohumiques
- ◀ Lithosols
- ◀ Sols alluviaux
- ◀ Sols lessivés
- ◀ Sols tourbeux
- ◀ Podzols
- ◀ Sols sableux
- ◀ Sols peu évolués sur roches tendres
- ◀ Andosols
- ◀ Rankers
- ◀ Vertisols
- ◀ Planosols
- ◀ Sols salsodiques



Source : INRA Orléans

## FORMATION-DÉGRADATION : GÉRER LA PÉDOGENÈSE



**Dans cette perspective, la pédogenèse apparaît comme une dynamique de formation et de transformation des sols avec des constantes de temps plus courtes que dans l'acception habituelle, de telle sorte que l'on puisse envisager d'en contrôler en partie la dynamique. Dans ce contexte émergent les objectifs de recherche suivants :**

- ▶ Mesure de la pédogenèse :
  - Comment mesurer des vitesses de pédogenèse et flux d'éléments et de matière associés, déterminer des vitesses de réponse des sols à de nouvelles conditions ?
- ▶ Acquisition de connaissances :
  - Comprendre des processus de pédogenèse (par ex. formation de la structure du sol, bioturbation) de façon à s'adapter à la diversité des pratiques et de

leurs combinaisons. Prendre en compte plusieurs échelles de temps.

- ▶ Modélisation de la pédogenèse :
  - Comment représenter et modéliser la dynamique physico-biogéochimique d'un sol à des constantes de temps différentes ?
  - Comment modéliser les processus afin de pouvoir prévoir des évolutions dans des scénarios complexes que l'on ne pourra pas reproduire expérimentalement (ex : réaction des sols au changement climatique) ?
- ▶ Ingénierie de la pédogenèse :
  - Favoriser la pédogenèse sur des matériaux variés (ex : à partir de sols traités, de composts).
  - La cadrer par rapport à des propriétés et fonctions des services visés.

## CONTRÔLER LES MENACES SUR LES SOLS



### ÉROSION

**Quels qu'en soient les agents principaux :** pluie et ruissellement (érosion hydrique), vent (érosion éolienne), travail du sol et gravité (érosion aratoire), l'érosion en milieu agricole détruit les sols bien plus rapidement que les processus de pédogenèse, d'où un bilan négatif qui peut conduire jusqu'à la disparition complète du sol avec mise à l'affleurement de la roche. Sans aller jusqu'à ces cas extrêmes, l'érosion décape les niveaux superficiels, ceux qui concentrent la matière organique et les éléments fertilisants. Une fois le processus enclenché, la productivité du sol se réduit (moins de réserves minérales et hydriques), et les conditions de travail du sol deviennent souvent plus difficiles (plus d'argile, plus d'éléments grossiers). La valeur foncière du sol également diminue.

Les principaux champs d'investigation de recherche portent sur :

- ▶ l'analyse et la prédiction des différents processus à différentes échelles spatiales et temporelles ;
- ▶ la définition et la combinaison d'approches adaptées de conservation des sols.

Les contours de ce domaine d'étude étant déjà bien définis, elle n'a pas été traitée lors de cette consultation.



## URBANISATION

La progression urbaine (générale dans le monde) prend rarement en compte la valeur patrimoniale des sols. Cela se traduit d'un point de vue écologique par deux faits majeurs : le retrait de sols fertiles de la fonction de production agricole, et le recyclage de quantités de plus en plus grandes de résidus organiques issus des villes et épandus dans leurs périphéries.

Les priorités identifiées :

► Définir les connaissances nécessaires pour optimiser les choix d'affectation des sols à un usage donné, afin que soit prise en compte leur capacité à rendre des services écosystémiques et afin de cartographier ces services. On pourrait espérer que cela débouche sur des aménagements prenant mieux en compte la qualité des sols. La raréfaction de sols souvent aptes à une grande multifonctionnalité à proximité des villes, devrait déboucher sur une législation prévoyant une compensation écologique en cas de retrait de ces sols de la biosphère.

► La compensation écologique n'étant pas une solution en soi totalement satisfaisante pour les sols, elle devra faire l'objet d'études approfondies de manière à évaluer l'opportunité et les impacts de ce genre de mécanisme.

► L'expansion démographique combinée à l'expansion urbaine et à la densification de certaines régions (par exemple les zones de conurbation) crée progressivement une rareté économique des meilleurs sols. L'allocation des sols aux différents usages possibles (habitat, zones industrielles, infrastructures de transport, parcs, zones agricoles) est régulée avant tout par le marché et subsidiairement par les décisions publiques relatives aux aménagements territoriaux. Les sols des zones périurbaines sont toujours considérés comme des espaces disponibles pour tous usages alternatifs plutôt que comme des espaces déjà affectés à l'activité économique agricole et à la conservation de la biosphère. Leur valeur patrimoniale et leur valeur intrinsèque

s'effacent actuellement derrière la valeur de marché déterminée par la rareté. En conséquence, une réflexion sur la nature du calcul économique (au sens large) est nécessaire pour que soient prises en compte toutes les composantes du raisonnement d'affectation des sols à différents usages.

► Par ailleurs, une prospective de l'usage des sols serait à envisager de manière à renforcer les visions planificatrices.



## CONTAMINATION

En fonction de l'origine de l'apport, il est classique de distinguer les contaminations locales des contaminations diffuses. La contamination diffuse des sols est générée par un apport provenant des sources mobiles (ex : circulation automobile), de grande étendue (ex : pollution transfrontière, dépôts de sédiments) ou de plusieurs sources (ex : déjections animales, engrais, produits phytosanitaires, épandages de déchets). Par opposition, la contamination locale est généralement liée à des sources fixes. Les contaminants sont de natures diverses, il peut s'agir d'éléments traces (ex : Cu dans les traitements phytosanitaires et les lisiers, Cd dans les engrais phosphatés et les boues), de molécules organiques (ex : produits phytosanitaires comme la chlordécone, hydrocarbures aromatiques, PCBs, résidus médicamenteux dans les fumiers ou les boues) ou bien d'organismes biologiques (ex : bactéries pathogènes présentes dans les lisiers ou les boues).

La variété spatiale des sols (variété verticale – profil de sols ; latérale – bassin versant) à différentes échelles crée des variabilités spatiales et temporelles des propriétés

physico-chimiques et biologiques du sol, et par là même dans la capacité d'un contaminant apporté au sol ou un élément présent à l'état naturel (issu de la roche mère) à être effectivement transféré vers les plantes et l'eau, créant ainsi un passage d'un risque potentiel à un risque réel (en fonction de la mobilité et de la biodisponibilité des contaminants).

On retiendra différentes séries d'objectifs :

► Cerner la dynamique des pollutions : la source et sa nature, la nature du passage par le sol (par l'eau ou l'air s'il s'agit d'un dépôt). Le sol est un réacteur biogéochimique qui peut métaboliser et dégrader les contaminants organiques ou modifier la spéciation des éléments traces. En sortie du réacteur sol, le contaminant se présente intact et / ou dégradé. Le contaminant peut être adsorbé ou désorbé et peut ensuite être transféré dans les plantes et la faune. Il peut aussi migrer sous l'effet de l'érosion.

► En complément aux nombreuses études en laboratoire visant à déterminer la spéciation et la persistance des contaminants dans les sols, il apparaît essentiel de

caractériser et modéliser les interactions entre les apports diffus de contaminants et les variations spatiotemporelles des propriétés du sol, qui vont déterminer le devenir des contaminants. Ce domaine nouveau pour le sol pourrait être vu comme équivalent au domaine émergent de la santé appelé "géographie de la santé" où il s'agit d'intégrer dans les études épidémiologiques la notion de localisation spatiale du risque, localisation sans laquelle il n'y a pas de prise en compte possible réelle de l'exposition au risque.

► Les trajectoires de contamination sont encore mal connues. Les aérosols sont particulièrement peu traités actuellement. Les dynamiques des contaminants dans les sols manquent encore de connaissances, notamment sur les effets des pratiques de gestion des sols sur les contaminants (travail du sol, irrigation et plus largement gestion de l'eau, gestion des matières organiques, des épandages de produits résiduels organiques...). Ces connaissances sont nécessaires pour savoir dans quelle mesure les sols peuvent être des régulateurs de l'impact des contaminants.



## SALINISATION

**Ce phénomène concerne surtout les sols irrigués où, sans drainage, la forte évaporation dans les zones semi-arides favorise la concentration des sels en surface.** De plus, l'irrigation par pompage à proximité des côtes accentue l'intrusion d'eau marine dans les nappes phréatiques et la salinisation des sols. Les changements climatiques risquent d'accroître ces deux processus par augmentation de la température et du niveau de la mer.

Quelles recherches entreprendre ?

- ▶ Des recherches devraient porter sur la dynamique des sels sous différents scénarios climatiques. On souligne l'importance de l'évaluation anticipatrice de la concentration de sels dans les paysages, et dans une vision écosystémique adossée aux scénarios de changement climatique.
- ▶ Elles pourraient également porter sur les moyens de lutte contre la salinisation ou d'adaptation à la salinisation :
  - rôles de végétaux (favoriser l'infiltration et le drainage, la résistance au sel...).
  - techniques d'irrigation en particulier sur le goutte à goutte en s'assurant de ne pas provoquer la concentration des sels.



## Multifonctionnalité des sols



Les sols sont des écosystèmes. Leur fonctionnement s'exprime en flux de matière et d'énergie. La dynamique de ces flux se définit comme un renouvellement permanent et périodique du système en fonction des possibilités permises par le climat (eau, température). L'écologie fonctionnelle (en tant que discipline) décrit l'ensemble des relations cycliques qui caractérisent la dynamique du système : cycle de l'eau, du carbone, cycle de l'azote, du phosphore, des oligoéléments...



# LE CYCLE DU CARBONE

## DANS LES SOLS ET FLUX DE GAZ À EFFET DE SERRE (GES)

Les questions de recherche prioritaires s'inscrivent dans ce que l'on peut espérer des sols en matière de stockage de carbone.

Les besoins de recherche devraient porter d'abord sur les aspects métrologiques : mesure des stocks de carbone et des flux de GES avec des méthodes à coût faible à diverses échelles spatiales (du champ aux échelles satellitaires).

Il serait par ailleurs nécessaire de mieux comprendre les processus de stabilisation des matières organiques et de leurs éléments constitutifs dans les sols : hiérarchie des processus de stabilisation / déstabilisation ; couplages C-N-P ; relations entre communautés de décomposeurs et dynamique des matières organiques ; existence d'une capacité de stockage maximale ? ; dynamique du carbone dans la rhizosphère.

La modélisation est indispensable pour améliorer les modèles prédictifs de la dynamique des matières organiques et du stockage du carbone : intégration des mécanismes et processus dans des modèles de dynamique des matières organiques, intégration et couplage des différents éléments (C-N-P-S), meilleure intégration de la pédologie (minéralogie, pH, carbonates, conditions rédox...) ; amélioration de l'intégration du régime hydrique (alternances humectation dessiccation, anoxie) ; modélisation à l'échelle du paysage (prise en compte des particularités et des transferts de matière).

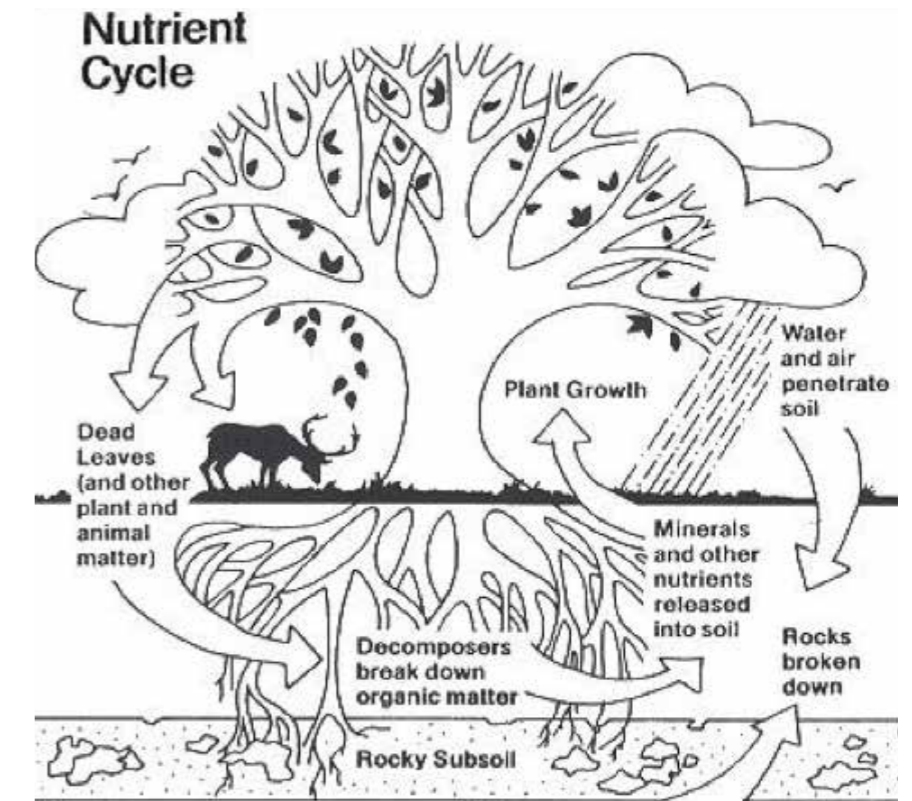
L'analyse de l'impact des systèmes de culture sur le stockage du carbone dans les sols et les émissions de GES constitue un thème clé. Il conviendrait de renseigner l'impact de pratiques nouvelles (agroforesterie, apports de biochar, couvertures végétales...), de renseigner les pratiques réelles et pas seulement celles d'essais de longue durée (par ex labour occasionnel versus semis-direct continu) d'où la nécessité de faire de la recherche en milieu réel, et d'intégrer les différents flux (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, nitrates...).

Il conviendrait aussi de développer une approche systémique étayée d'outils de bilan environnemental : développer une approche systémique, holistique et une approche intégrée par filière (par exemple BRF, biochar) ; développer une évaluation des services rendus par les matières organiques (dans une perspective de multifonctionnalité des sols) et le bilan multicritères des pratiques ; articuler avec les outils d'évaluation environnementale (ACV par exemple) en intégrant la perception sociologique des matières organiques et des pratiques ; et considérer la capacité de stockage de tous les sols autres qu'agricoles y compris ceux des villes.



Mesure de flux de GES

# LA FERTILITÉ DES SOLS ET LE CYCLE DES ÉLÉMENTS MINÉRAUX



La question nouvelle qui se pose est comment inventer une fertilisation minorant l'emploi d'engrais de synthèse ?

Les recherches nécessaires seraient les suivantes :

Le sujet de la fourniture de N minéral par les sols apparaît comme bien connu. Mais il serait nécessaire d'intégrer aux outils et raisonnements, les acquis récents sur la dynamique des matières organiques (processus, turn-over, couplages) et réfléchir aux indicateurs à proposer.

Bien que les apports en phosphore aient diminué en France, de fortes disparités existent au niveau régional et mondial. En particulier en Afrique et dans une moindre mesure en Asie, les exportations par les récoltes et l'érosion ne sont pas

suffisamment compensées, entraînant de fortes carences. Le recyclage de cette ressource s'impose.

Par ailleurs l'agriculture pilote les sols par un certain nombre de techniques culturales : travail du sol, amendements, engrais, irrigation, peuplement (enracinement, couverture), utilisation de traitements chimiques... Ces techniques ont des effets sur l'eau, la température, la vie du sol, etc, et d'une manière générale sur le statut biogéochimique du sol. Un raisonnement de pilotage de la fertilité par les paramètres biogéochimiques du sol est-il possible ? L'entrée par les actions biogéochimiques (gestion du pH, de l'activité électronique rH<sub>2</sub>, du potentiel redox Eh...) apparaît pertinente et trop peu étudiée.



## COMMENT OPTIMISER LE FONCTIONNEMENT DE LA ZONE RACINAIRE ET DES ZONES D'INTERFACE ?



La rhizosphère est le lieu où s'effectuent la transformation du substrat minéral, la nutrition des plantes, la structuration (en partie) du sol et de nombreuses régulations biologiques. Comment optimiser ces différentes fonctions dans une perspective d'accroissement de la production de biomasse ?

Plusieurs pistes à explorer :

- L'amélioration des semences : enrobage avec des microorganismes symbiotiques, PGPR ;
- Les voies de contrôle inter-spécifiques de plantes via les microorganismes du sol, par exemple via la disponibilité du fer et des sidérophores microbiens ;
- Développer une typologie des systèmes racinaires de plantes cultivées et de service dans un contexte de diversification des intercultures et plantes de couverture (architecture, biomasse, exsudation).

## ENRICHIR LA BIODIVERSITÉ DES SOLS



Le travail mécanique du sol, les faibles restitutions organiques ou au contraire l'apport de produits résiduels organiques, l'évolution des conditions biogéochimiques qui font évoluer le pH (par exemple sous l'action des engrais), les apports de produits phytosanitaires et d'autres contaminants... modifient la composante biologique des sols et donc la biodiversité qu'ils hébergent.

Cette évolution est particulièrement inquiétante, car le sol constitue un réservoir très important de biodiversité. Comment préserver la biodiversité de la faune, de la flore et des microorganismes du sol et même l'améliorer ?

- Développer de nouvelles façons d'étudier la biodiversité dans le sol résolument ancrées sur les fonctions assurées par les organismes (recyclage des nutriments, stockage de C...). La métagénomique pure est utile mais peut constituer une aventure sans fin. On peut envisager des voies de compartimentation de

la diversité microbienne par rapport à des traits fonctionnels, comme cela se pratique pour la faune du sol.

Plusieurs axes à développer :

- La connaissance des organismes et des chaînes trophiques ;
- L'importance fonctionnelle de la biodiversité des organismes sols. Une approche incorporant les concepts de traits fonctionnels est encouragée ;
- L'impact d'événements extrêmes sur la biodiversité des sols et l'évaluation de la résilience des sols et des facteurs qui la modulent ;
- L'exploration des voies de restauration de la biodiversité fonctionnelle des sols ;
- La "manipulation" / "orientation" / "pilotage" de la biodiversité des sols pour limiter les intrants chimiques (fertilisants et pesticides), dans une perspective d'agroécologie.



## COMMENT AVANCER SUR LA NOTION DE **MULTIFONCTIONNALITÉ DES SOLS ?**



Les services écosystémiques assurés par les sols sont bien identifiés : infiltration des eaux versus ruissellement, conservation des eaux du sol, filtration des eaux, métabolisation de molécules polluantes, stabilisation structurale et lutte contre l'érosion, esthétique du paysage... Ces services constituent des aménités lorsque les pratiques culturales des agriculteurs ou plus généralement les usages des sols respectent les fonctionnalités écologiques correspondantes, et constituent, inversement des externalités négatives lorsque les pratiques culturales ou usages des sols ne les respectent pas (érosion, non alimentation des nappes phréatiques, eaux polluées...).

Quels besoins de recherche ?

► L'analyse des concepts relatifs aux sols dans ce domaine : services écosystémiques, capital sol, qualité des sols, et de leurs potentiel et limites ;

- L'évaluation économique des externalités négatives et des aménités (coûts ou avantages publics), comparées aux coûts des pratiques culturales (coûts privés), de manière à comprendre les coûts et avantages économiques des différents agents et à mesurer leur motivation pour produire des aménités plutôt que des nuisances ;
- L'évaluation des mesures d'incitation de politique publique pour inciter les agents économiques à aller dans ce sens : information, formation, subventions, aide aux investissements, taxes et mesures fiscales... ;
- L'analyse des conflits d'usage des sols entre différents services attendus des sols, environnementaux, de production ou culturels, en vue d'identifier des convergences (par ex. risques de pollution en zone de captage, érosion et dommages en aval dans des bassins versants...).



# LES PRATIQUES PRODUCTIVES ET LA PERTURBATION DES SOLS

**Dans la perspective d'une simplification du travail du sol, comment les pratiques relatives aux sols peuvent-elles garantir un milieu favorable aux cultures ?**

- ▶ Actualiser les bilans de l'alternative "non labour" en prenant en compte une gamme de conséquences importantes : structure du sol, biologie, disponibilité des éléments nutritifs, flux de GES, stockage de carbone, lutte contre les ravageurs et devenir des produits phytosanitaires... ;
- ▶ Prendre en compte les pratiques véritables des agriculteurs, les essais monofactoriels étant insuffisants. Les pratiques réelles vont vers une grande diversification ; elles comprennent par exemple des labours "correctifs" quand apparaissent des difficultés de gestion de la parcelle. Cela amène, là encore, à faire des recherches en dehors du cadre classique des essais de longue durée et à pratiquer également des enquêtes et suivis de réseaux d'agriculteurs ;
- ▶ Évaluation économique des services écosystémiques ; les notions de pratiques, usages et principes du travail du sol doivent être étudiés sous l'angle de la sociologie politique.



© A. Bispo



© A. Bispo

## OUTILS, MÉTHODES ET MODÈLES : QUELLES NÉCESSITÉS ?

D'un point de vue plus fondamental, la question de la connaissance de la diversité spatiale des sols reste centrale : comment gérer des sols et prévenir les menaces de dégradation sans connaissance de leur diversité ? Cette question renvoie au besoin de nouvelles métrologies de la caractérisation des sols et au développement de méthodes de cartographie numériques, mobilisant les sources d'information quasi exhaustives à présent disponibles. Mais également au développement de méthodes d'agrégation/désagrégation permettant d'adapter l'information qualifiant les sols aux besoins des modèles.

- Utiliser des observatoires afin de documenter les pratiques d'usage des sols sur des périodes longues. Pour cela, il apparaît nécessaire de continuer à s'appuyer sur des SOERE multi-sites, instrumentés et soutenus autant que nécessaire afin de donner plus de généralité ;
- Développer des activités dans le domaine de la modélisation, y compris avec des démarches de type "sol virtuel", en s'efforçant de tenir compte de la diversité des sols et des processus qui y prennent place. La représentation des sols, actuellement très pauvre dans différentes modélisations devrait être améliorée ; par exemple dans les modèles climatiques globaux comme dans les modèles économiques à caractère décisionnel ;
- Mettre en place des dispositifs de suivi de l'état des sols, de leur bilan genèse/érosion, de leur teneur et stock de carbone et de leur émission de GES avec les instrumentations nécessaires à différentes échelles.



© A. Bispo



[www.anr.fr](http://www.anr.fr)



Twitter@agencerecherche •



ANR

agencezebra.com

Direction du développement, de l'information et de la communication

