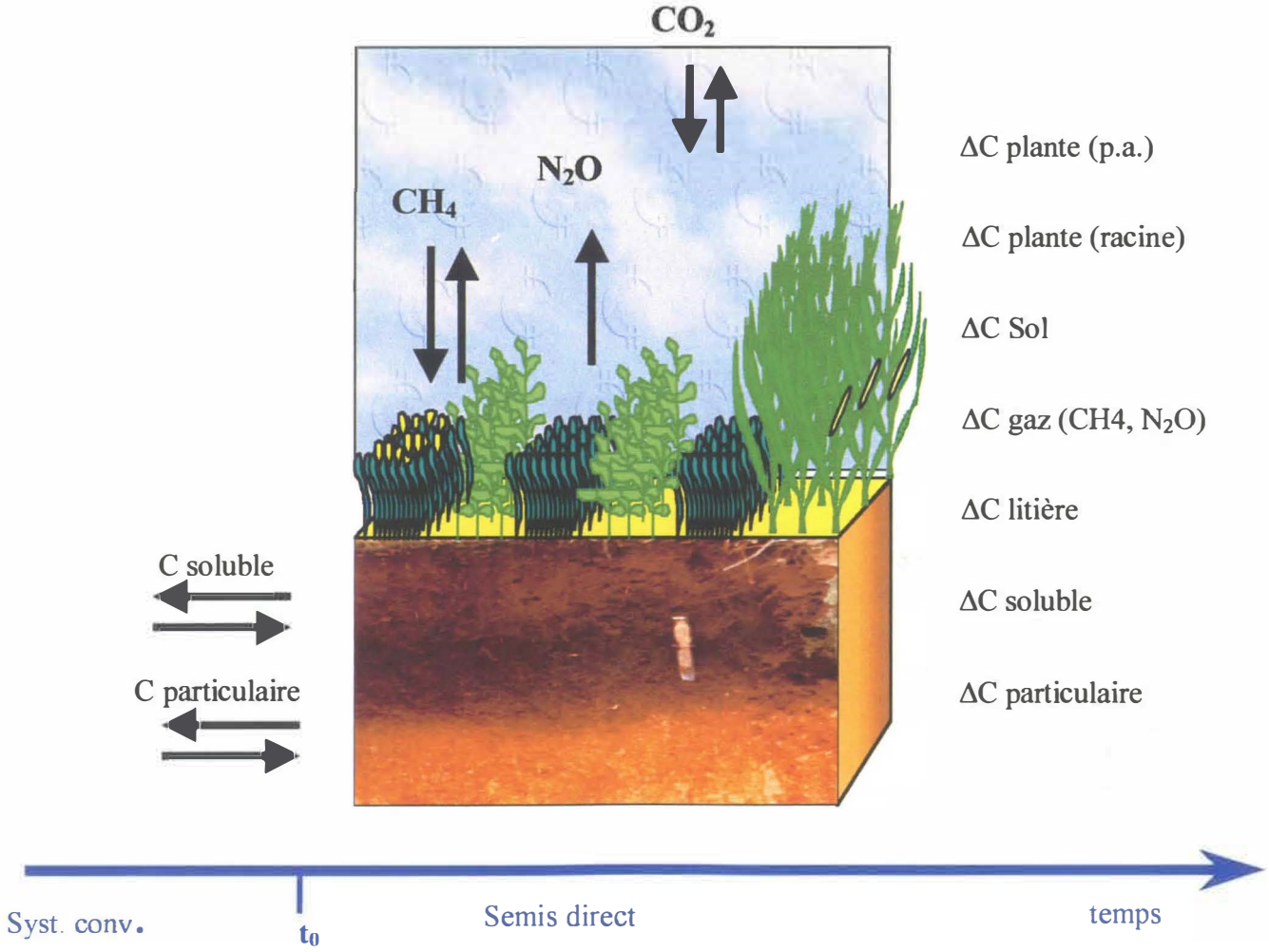
PLAN D'ACTION AGRO-ECOLOGIE
ATELIER METHODOLOGIQUE SUR LES MESURES DE STOCKS DE CARBONE ET EMISSIONS DE N2O

Compte-rendu de la réunion de Montpellier 29-30-octobre 2001



Approche du bilan de carbone (en équivalent C-CO_2)

schéma C. Feller

COMPTE-RENDU DE L'ATELIER METHODOLOGIQUE SUR LES MESURES DE STOCKS DE CARBONE ET EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE

(Christian Feller – Dominique Rollin)

PROGRAMME ET LISTE DES PARTICIPANTS

LISTE DES PRESENTATIONS

Compte-Rendu des

« Journées Méthodologie » (29-30/10/2001, IRD-Montpellier)

du Projet FFEM :
« Bilan comparé des émissions / séquestration des gaz à effet de serre dans les systèmes de culture agroécologiques (semis direct sous couverture végétale) et les systèmes de culture traditionnels »

par

Christian Feller et Dominique Rollin

Remarque liminaire
Par simplification, dans la suite du texte, ce Projet sera intitulé « Projet FFEM SeqC ».

Participants

Directeur de l'IRD-Montpellier : Antoine CORNET

Représentant CIRAD-CA : Francis FOREST (CIRAD-CA Montpellier)

Comité Scientifique Projet FFEM SeqC et représentants des organismes donateurs : Martine BLATIN (MAE), Michel ROBERT (Ministère de l'Environnement), Robert BARBAULT (Université Paris VI), Christophe DU CASTEL (FFEM Paris)

Participants du CIRAD, et partenaires, au Projet : Dominique ROLLIN (CIRAD-CA Montpellier), Michel RAUNET (CIRAD-CA Montpellier), Francis GANRY (CIRAD-AMIS Montpellier), Jacques GIGOU (CIRAD-CA Montpellier), Bertrand MULLER (CIRAD-CA Montpellier), Eric SCOPEL (CIRAD-CA Brésil Montpellier), Michel FORTIER (CIRAD-AMIS Montpellier), Robert OLIVER (CIRAD-AMIS Montpellier), Alexandre CARDOSO (EMBRAPA Brésil), Jose Aloísio Alves MOREIRA .

Participants de l'IRD, et partenaires, au Projet : Christian FELLER (IRD/CENA Brésil), Bernard BARTHES (IRD Montpellier), Alain ALBRECHT (IRD/ICRAF Nairobi), Pascal PODWOJEWSKI (IRD Bondy), Vincent ESCHENBRENNER (IRD/CENA Brésil), Eric BLANCHART (IRD Martinique), Sylvain HUON (Université Paris 6)

Experts invités : Raul PONCE-HERNANDEZ (Programme Environnemental, Département Géographie, Canada, FAO), Dominique ARROUAYS (INRA Orléans), Jean Claude GERMON (INRA Dijon), Jérome BALESDENT (INRA/CEA/CNRS Cadarache), Eric GOZE (CIRAD-CA Montpellier).

Organisation des Journées

Rappelons que ce Projet est une recherche d'accompagnement sur les bilans de C dans le système sol-plante dans le cadre du « Plan d'Action Agroécologie » réunissant de nombreux bailleurs de fonds (CIRAD, AFD, MAE, FFEM).

Les trois objectifs principaux de ces journées étaient les suivants :

- présenter au Comité Scientifique du Projet FFEM SeqC, les quatre zones ateliers retenues pour financements (Brésil, Laos, Madagascar, Mali) et les recherches qui s'y dérouleront (Journée 1, matinée),
- introduire les discussions méthodologiques de la Journée 2 par des exposés transversaux intéressant potentiellement les différentes zones ateliers (Journée 1, après-midi),
- discuter entre les acteurs de cette recherche d'une plate-forme méthodologique commune sur les aspects suivants : mise en place des dispositifs agronomiques contrôlés, mode de prélèvement et d'analyses des sols (Journée 2).

Par ailleurs, au cours de la Journée 1, furent présentés aussi 2 exposés complémentaires concernant la séquestration du carbone :

- le projet GESSOL-Martinique visant à évaluer les stocks de carbone des sols de la Martinique (Eric Blanchart, IRD),
- la méthodologie mise en place par la FAO pour l'évaluation de la séquestration du carbone dans la cas d'études en Amérique Latine (Raül Ponce-Hernandez, FAO).

Les matériaux utilisés pour la présentation de la majorité des exposés sont sur le site QuickPlace.

Matinée de la Journée 1

Après une allocution de bienvenue par Mr A. Cornet, directeur de l'IRD-Montpellier, Mr F. Forest (CIRAD) a introduit la journée en rappelant que dans le Plan d'Action Agroécologie, l'approche est de type « système de culture », celui-ci étant pris comme objet de recherche. Les enjeux et les objectifs du Projet, en relation avec la problématique de l'effet de serre et dans le cadre des négociations internationales, ont été ensuite rappelés et développés par Mme M. Blatin (MAE).

Mr M. Robert, président du Comité Scientifique du Projet FFEM SeqC, a ensuite développé les aspects scientifiques et économiques, concernant la séquestration du carbone dans les agroécosystèmes. Il a aussi mentionné quelques autres programmes français sur les bilans de carbone.

Avant la présentation spécifique de chaque zone atelier, Mr D. Rollin (CIRAD) a présenté le Plan d'Action Agroécologie et les caractéristiques générales biophysiques et agroéconomiques des différents chantiers du dispositif.

La présentation par zone atelier s'est ensuite déroulée de la manière systématique suivante :

- une présentation par un agronome du CIRAD sur le contexte agricole des sites étudiés, ainsi que sur les expérimentations existantes ou envisagées, et les parcelles en milieu réel (chronoséquences par exemple), à étudier,
- une présentation par un pédologue de l'IRD, ou partenaire de l'IRD (S. Huon), des mesures envisagées sur les différents sites retenus, étant entendu que sur chaque zone atelier, un minimum commun doit être fait concernant l'évaluation de différents compartiments du C (plante, sol, litière), mais que chaque équipe développera des recherches plus pointues sur certains compartiments ou processus, selon ses compétences,

telles que : flux de gaz à effet de serre, flux de C érodé ou solubilisé, rôle de la faune dans l'agrégation et protection du C dans les agrégats, formes et dynamiques du C séquestré, etc.

Les intervenants furent pour :

- le Brésil, MM. E. Scopel (CIRAD) et C. Feller (IRD)
- Madagascar, MM. B. Muller (CIRAD) et A. Albrecht (IRD)
- le Mali, MM. D. Rollin (CIRAD) et B. Barthès (IRD)
- le Laos, MM. M. Raunet (CIRAD) et S. Huon (Univ. Paris-6) et P. Podwojewski (IRD), représentant C. Valentin (IRD, excusé).

Il est ressorti, pour chaque situation (i) des niveaux d'avancement de la mise en place des dispositifs expérimentaux, ou du choix des situations, relativement différents selon les zones ateliers (cf. Journée 2), (ii) des approches qui seront bien complémentaires sur les aspects de la séquestration du C étudiés.

De cette présentation par zone atelier est apparue l'existence de trois grands types de dispositifs/parcelles à étudier, chacune avec ses spécificités et ses contraintes :

- les dispositifs agronomiques à mettre en place,
- les dispositifs agronomiques déjà existants,
- les parcelles en milieu réel, chez les agriculteurs.
-

Après-midi de la Journée 1

Les exposés suivants ont été présentés :

- D. Arrouays. Sur les méthodes d'évaluation des stocks organiques des sols prenant en compte les variabilités spatiales. Exemples en milieu tempéré.
- V. Eschenbrenner. La variabilité spatiale des stocks organiques des sols, de la région à la parcelle élémentaire. Exemple en Amazonie brésilienne.

Ces deux exposés ont permis une excellente introduction aux problèmes méthodologiques d'échantillonnage qui furent traités au cours de la Journée 2. Nécessité, dans certains cas, d'une approche géostatistique.

- J.C. Germon. Mesures des émissions de N_2O.

Cet exposé a montré (i) l'importance des éventuelles émissions de N_2O dans le bilan exprimé en équivalent CO2, (ii) le peu d'informations quantifiées que nous avons à ce jour sur ce problème. La nécessité de la modélisation. Exemple du modèle NEMIS.

- A. Albrecht et E. Blanchart. Faune, agrégation et stockage du carbone.

Importance de prendre en compte, de manière intégrée, ces aspects pour l'analyse des processus de la séquestration du carbone dans les sols.

- S. Huon. Flux de carbone liés à l'érosion à l'échelle de micro-bassins versants. Intérêt des traceurs en abondance naturelle ^{13}C et ^{137}Cs.

Présentation d'une approche, avec exemples en milieux tropicaux, pour mieux cerner l'origine et le bilan, à l'exutoire, du carbone érodé et soluble.

- C. Feller. Les compartiments de carbone dans les sols.

Les différentes approches existantes pour séparer des compartiments de carbone des sols à temps de renouvellement très différenciés : fractionnements de type granulométrique, densimétrique, ou fractionnements en agrégats.

- J. Balesdent. Modélisation de la dynamique du carbone.

Un exemple de modèle : le modèle MORGANE. Comment fonctionne-t-il ? que peut-on en attendre ?

La conclusion générale de la Journée 1 a été faite par M. Robert, en mettant l'accent essentiellement sur 2 points :

- sa satisfaction de voir ce projet en réseau débuter dans de bonnes conditions, avec une complémentarité d'approche et une très forte intégration d'équipes IRD et CIRAD,
- la nécessité de particulièrement bien cerner les problèmes d'échantillonnage et de mesure des stocks de carbone dans les sols, selon les types de situations étudiées. Avec la perspective que ceci puisse conduire à un document diffusable à d'autres utilisateurs, au-delà de ce Projet. Ce deuxième point a fait l'objet d'une grande partie des discussions de la Journée 2.

Journée 2

Cette journée a donné lieu à des débats sur 4 aspects :

- choix des systèmes de culture à étudier par situation, avec, en conséquence, type d'essais à mettre en place,
- modes de prélèvements des sols pour connaître et tenter de s'affranchir de la variabilité spatiale,
- méthodes de mesure de densité apparente, carbone et azote,
- aspects financiers et conventions à signer par rapport à FFEM.

1. Choix des systèmes de culture à étudier et essais à mettre en place

De manière générale, il a été envisagé, pour les nouveaux dispositifs agronomiques à mettre en place, des protocoles de type « bloc » avec au minimum 4 répétitions/traitement.

Brésil (présentation E. Scopel) :

- un essai déjà en place à Goiania (CNPAF), mais avec une distribution non aléatoire des 3 répétitions/traitement, et posant donc problème pour une comparaison statistique des traitements. Parcelles de 10x50 m. Ce dispositif vise à comparer une rotation riz/soja avec 3 traitements :
    - semis direct (SD),
    - offset (travail aux disques lourds),
    - labour profond avec enfouissement ;
- un nouvel essai à Rio Verde (Etat de Goias) venant de se mettre en place avec distribution aléatoire des 3 répétitions/traitement. Parcelles de 15x50 m. Les traitements sont :
    - Soja avec travail aux disques lourds (5 répétitions),
    - Soja avec SD, sans couverture (3 répétitions),
    - Soja avec SD, avec couverture (3 répétitions),
    - Soja avec SD et Maïs (3 répétitions).

Laos (présentation M. Raunet) :
Rien n'est encore décidé. Il faut une discussion entre équipes CIRAD et IRD pour définir le/les systèmes à mettre en place, soit sur des bassins versants déjà étudiés par l'IRD, soit instrumentaliser des essais déjà en place du CIRAD, soit envisager complètement un nouveau dispositif. Les systèmes devraient correspondre à une couverture permanente en saison sèche pour pâturages, alternant avec riz en saison des pluies.

Madagascar. Cas des Hautes Terres, région d'Antsirabe.
En référence à un système traditionnel paysan répandu, essai à mettre en place avec 4 traitements et 4 répétitions/traitement (parcelles de 10x10m) :
- Traditionnel : rotation maïs-haricot, labour à l'angady (bêche),
- même rotation maïs-haricot en SD,
- succession maïs-légumineuse 1 en SD,
- succession maïs-légumineuse 2 en SD,

Les légumineuses 1 et 2 pourraient être semblables, mais exploitées différemment: pâture ou fauche.
La mise en place est envisagée, soit pour la prochaine saison, soit pour novembre 2002.

Mali (présentation D. Rollin). Systèmes cotonniers dans les régions de Koutiala ou Sikasso
Essai à mettre en place sur parcelles de vieille culture, comprenant 4 traitements avec 4 répétitions/traitement (parcelles de 15x50m) et comparaison avec situation Savane :
- rotation céréale-coton avec labour,
- rotation céréale-coton avec SD,
- rotation céréale+légumineuse-coton avec labour,
- rotation céréale+légumineuse-coton avec SD.

Ce protocole n'est pas encore complètement définitif.

2. <u>Prélèvements pour étude de la variabilité spatiale des teneurs et stocks de carbone</u>

La réflexion, qui faisait suite logique avec les exposés de D. Arrouays et V. Eschenbrenner, a été développée selon les 3 types de dispositifs étudiés :
- Essai agronomique à mettre en place,
- Essai agronomique déjà en place,
- Parcelles en milieu paysan.

Essais agronomiques à mettre en place

Pour limiter au maximum, la variabilité spatiale initiale du futur dispositif, la démarche est (i) d'abord de type géostatistique afin de pouvoir délimiter une superficie relativement homogène pour la mise en place des blocs et parcelles, (ii) puis de type statistique « classique » avec un nombre imposé de répétitions par parcelle. Les étapes sont les suivantes :

- *Phase 1 : mise en place du dispositif*

- choisir un terrain d'au moins 2 Ha (de 2 à 3 Ha), en fonction de son aspect (observations visuelles, étude des documents cartographiques divers existants, visites et « dires d'experts ») et de ses antécédents culturaux,
- observations visuelles et quelques observations à la tarière (recommandées) pour appréciation générale de son homogénéité, mise à l'écart éventuelle de certaines zones,
- caractérisation spatiale sur toute la surface retenue des teneurs en carbone (et éventuellement texture, par une méthode simplifiée, cf. phase 2) sur la base de prélèvements systématiques selon une maille de 50 points à l'hectare (1 point pour 200 m^2; on peut utiliser un maillage plus serré si nécessaire ou possible). Suivant le terrain (2-3 Ha) on aura donc de 100 à 150 points au minimum,
- prélèvements géoréférencés de sol sur 0-0,1 m et 0,1-0,2 m (au minimum). Analyse géostatistique des résultats; élaboration de cartes de carbone (et éventuellement de texture, par une méthode simplifiée, cf. phase 2),
- implantation des parcelles en fonction des résultats avec choix des zones les plus homogènes pour installer les blocs. Disposition des parcelles aléatoirement au sein des blocs. Privilégier les dispositifs factoriels par rapports aux divisions successives de parcelles.

Les couches à prélever pour cette caractérisation spatiale générale à caractère exploratoire sont 0-0,1 m et 0,1-0,2 m.

- *Phase 2 : variabilité spatiale au sein du dispositif*

La détermination des stocks nécessite des mesures des teneurs en carbone et des densités apparentes. Il faut prévoir les mesures initiales (t_0) et finales (t_4 ou t_5, après 4 ou 5 ans) des teneurs en carbone et de densités à la même époque de l'année, situées pareillement par rapport aux cycles des cultures et interventions (travaux du sol) afin d'être dans des conditions comparables vis à vis des dynamiques intra-annuelles de minéralisation du carbone.

Pour caractériser les stocks de carbone au sein d'une parcelle, on recommande un minimum de 6 répétitions (6 points de mesures géoréférencés), avec des prélèvements de sol et des mesures de densité sur au moins les 5 horizons suivants: 0-0,05 m ; 0,05-0,1 m ; 0,1-0,2 m ; 0,2-0,3 m ; 0,3-0,4 m.
Soient donc 30 prélèvements de sol pour analyse et mesures de densité pour une parcelle.

Sur les mêmes échantillons, et au minimum pour les profondeurs jusqu'à 20 cm, il faut faire une détermination de texture. On peut envisager, (i) une détermination simplifiée pour chaque répétition, de type argile+limon fin (0-20µm), (ii) pour chaque parcelle, et sur un composite des 6 répétitions, une analyse mécanique complète : sables grossiers et fins, limons grossiers et fins, argile.

Dans la pratique il faudra travailler "bloc par bloc" : finir un bloc avant de commencer le suivant.

Essais agronomiques déjà en place

On appliquera la méthodologie décrite ci-dessus pour la *Phase 2*.

Parcelles en milieu paysan (chronoséquences, etc.)

On subdivisera virtuellement les parcelles réelles, selon leur taille, en un minimum de 4 parcelles élémentaires dans lesquelles on fera 6 répétitions/parcelles, selon le protocole défini en *Phase 2* des essais à mettre en place.

Quand et où faire les prélèvements et mesures : problèmes des hétérogénéités créées par le système de culture ?

Pour les dispositifs agronomiques, il faut prévoir de faire les mesures initiales (t_0) et les mesures finales (t_4, t_5), à la même époque dans l'année.

La localisation des prélèvements/points de mesure est *a priori* aléatoire (tirage), mais peut-être organisée par rapport aux rangs et inter-rangs et par rapport à des billons éventuels (cas du coton au Mali), si cette hétérogénéité est induite par le système de culture.

A ce sujet, il a été proposé de prélever, dans la parcelle élémentaire, les 6 répétitions mais de manière que l'ensemble de l'hétérogénéité soit couvert par l'ensemble des 6 répétitions. Par exemple, réaliser 2 séries de 3 mesures disposées sur un rang, un milieu d'inter-rang, et une position intermédiaire entre eux.

3. Méthodes de mesure, préparation des échantillons

On préconise d'effectuer les déterminations des stocks de carbone à partir des échantillons prélevés en cylindres. Cette procédure permet en effet une appréciation directe de l'erreur sur les quantités de carbone et non pas une appréciation de l'erreur à partir des erreurs combinées sur la densité apparente d'une part et la teneur en carbone d'autre part.

Densité apparente

A chaque fois que possible, le mesures seront faites au cylindre.
D'un point de vue pratique on sait qu'il est beaucoup plus facile et précis de faire les mesures de densités dans un sol humide, donc en saison des pluies. En cas de prélèvement en saison sèche on n'a donc pas d'autre solution que de mouiller préalablement le sol, le laisser commencer à se ressuyer, puis prélever rapidement. Pour des sols à argile 1 :1 (kaolinite) en milieu semi-aride, il a été montré (comm. pers. Feller) que ce type de prélèvement donne des estimations identiques à celles obtenues sur sol sec par le système à densitomètre à membrane. Un problème éventuel, si prélèvement retardé après humectation, est la création rapide d'une macroporosité sous l'effet de la faune du sol.

Le mesures seront faites, à partir de mini-profils de sol, en enfonçant le cylindre verticalement sur la profondeur souhaitée à partir d'une surface plane.

Noter que les prises de sol pour densité apparente vont nécessiter l'ouverture d'un mini profil d'environ 40x40 cm ce qui va perturber fortement le sol. Il est donc nécessaire de bien géoréférencer ces prélèvements, pour ne pas retomber, 4 ans plus tard, sur la même zone perturbée.

Pour les horizons 0-5 et 5-10 cm, on utilisera des cylindres (de préférence en inox) de 5 cm de hauteur, et pour les horizons 10-20, 20-30 et 30-40 cm des cylindres de 10 cm de hauteur, autant que possible des cylindres de grand volume (de l'ordre de 0.25 et 0.5 L).
Noter, que les cylindres 0-5 cm correspondent à un volume de 100 cm^3, soient 100 g de sol, ce qui est peu, si d'autres déterminations que C et N devaient être faites sur ces échantillons. Il y aurait donc peut-être intérêt pour ces prélèvements 0-5 et 5-10 cm à les faire en double pour récupérer plus de sol des horizons de surface, les plus concernés par les changements potentiels sous l'effet des pratiques culturales.

Le contenu de chaque cylindre est transféré dans un sac plastique.
Au laboratoire, l'échantillon humide est pesé, puis le sol est mis à sécher à l'air et pesé de nouveau. Une aliquote est prélevé pour détermination de l'humidité à 105°C. La densité apparente est ensuite calculée.

Teneurs en carbone (C) et azote (N)

Le sol sec à l'air des cylindres est ensuite préparé de la façon suivante :
- tamisage manuel doux à 2 mm, enlever les débris végétaux et débris importants de racines; les récupérer pour séchage et pesage éventuels; de même récupérer les éléments supérieurs à 2 mm (graviers, pierres) pour détermination volume et densité,
- quartage,
- pour C et N, broyage d'une aliquote (20 g minimum) au broyeur planétaire ou broyage manuel, à 200 µm.

Au cours de la réunion, dans un souci d'homogénéité et de qualité des résultats, il avait été décidé que les teneurs en carbone à t_0 et t_4-t_5 seraient toutes déterminées au laboratoire du CIRAD à Montpellier. Toutefois, au cours de discussions ultérieures, il est apparu diverses contraintes sur cet aspect, tant sur le plan financier, que sur la comparabilité des mesures faites, d'une part, au Cirad, d'autre part, avec un grand nombre d'autres mesures faites par ailleurs dans chaque laboratoire. La question est actuellement en discussion.

Les échantillons qui seront analysés au CIRAD pour C, N et autres déterminations, devront être préparés sur place par les équipes, pour éviter de trop grosses manipulations (et délais) sur Montpellier, et pour diminuer les coûts.

Les autres analyses (texture, éléments, pH, etc.), seront faites sur un composite par parcelle et par profondeur : envoyer 200 g par échantillon séché (air ou étuve 40°C) et préparé (manuel, doux, etc.) à 2 mm (non broyé).

Remarques :
a) les échantillons ne sont <u>jamais</u> stockés dans sac en papier, afin d'éviter des contaminations de carbone,

b) équipement « terrain » à considérer : cylindres de densités, étuve, balance (0-1 Kg; ±0,1 g), tamis 2 mm, quarteur (prix minimum 4 KF), broyeur planétaire (minimum 30 KF) ou mortier (broyage manuel) en agate ou faïence (environ 2 KF) boites ou coupelles métalliques pour séchage, sacs plastiques, si possibles résistants à 100°C qui sont très pratiques.

Le respect des directives méthodologiques relatives aux mesures de densités et à la préparation des échantillons est tout aussi important que celui des précautions nécessaires à l'appréhension et au contrôle des hétérogénéité spatiales.

4. Financements, convention, calendrier, animation

Cette partie a fait l'objet d'un débat entre l'ensemble des participants aux Projet FFEM SeqC et Mr C. Du Castel, représentant du FFEM et responsable de ce Projet.

Par rapport aux demandes financières des équipes, qui furent supérieures à 500 KF, les financements accordés ont été respectivement de 500 KF pour le Brésil, Laos et Madagascar et de 300 KF pour le Mali. Selon Mr C. Du Castel, il n'est pas envisageable de revenir sur ce point. Par contre, il resterait, sur l'enveloppe globale, une somme de 200 KF qui pourrait servir de « budget d'animation » (cf. ci-dessous).

Comme chaque sous-projet est sous la responsabilité d'un chercheur ou ingénieur de l'IRD, il a été décidé que le FFEM présenterait un texte de convention à l'IRD pour l'ensemble de l'enveloppe financière, en spécifiant les attributions par sous-projet et pour l'enveloppe « animation », à charge à l'IRD de ventiler ensuite par sous-projet.
Pour ce faire, il est nécessaire que les propositions initiales par sous-projets soient revues, et sur le plan financier (somme accordée), et sur le plan des contenus, en référence aux informations nouvelles issues de cette Réunion Méthodologie.
C. Feller et B. Barthes sont chargés de la collecte et de l'envoi au FFEM de l'ensemble des nouvelles versions.

La ventilation générale des crédits est prévue de la manière suivante, avec libération de :
- 40 % au démarrage du sous-projet,
- 40 % après 2 années sur présentation d'un rapport d'activité des années 1 et 2,
- 20 % après 4 années sur présentation d'un rapport d'activité des années 3 et 4,

Enfin, un rapport final d'activité devra être rendu par sous-projet en année 5.

Par ailleurs, Mr C. Du Castel a chargé C. Feller de lui présenter un budget de 200 KF (en cours d'élaboration) pour la rubrique « Animation ». Ce budget doit prendre en compte essentiellement :
- l'organisation de réunions intermédiaires, en particulier, en fin d'années 2 et 4,
- les frais de mission (voyages, per diem) d' « experts », actuellement extérieurs au Projet, comme D. Arrouays, J. Balesdent, E. Goze, J.C. Germon, etc.
- d'éventuelles autres dépenses.

Enfin, il a été envisagé, en fin d'année 5, un Séminaire international sur le thème du Projet et qui servira en même temps de Séminaire de restitution des résultats acquis en 5 ans. Le financement pour ce Séminaire sera recherché en temps utile.

Fait à : Piracicaba (Brésil) et à Montpellier (France),
le : 26 novembre 2001.

PLAN D'ACTION AGRO-ECOLOGIE
ATELIER METHODOLOGIQUE SUR LES MESURES DE STOCKS DE CARBONE ET EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE

Programme

❑ **Lundi 29 Octobre**

Séance du Comité scientifique (Centre IRD de Montpellier)[1]

I- Introduction

9 h : **Allocution de bienvenue** A. Cornet Directeur du Centre IRD
Les objectifs du programme Martine Blatin - MAE
Le contexte et les objectifs Michel Robert- Ministère Environnement, président du Comité scientifique.

10h 15 **Pause**

II- Le plan d'action agroécologie CIRAD-AFD-MAE-FFEM

10h 30
- Introduction générale par le Cirad : le dispositif global .
- **Dominique Rollin & Francis Ganry (CIRAD)**

10h 50
- Présentation des 4 zones ateliers : Les systèmes de culture, les pratiques agro-écologiques, type d'analyse sol dans le contexte donné.

- Brésil **E Scopel , C. Feller**
- Madagascar **B. Muller, F. Albrecht**
- Mali **D. Rollin , B. Barthès**
- Laos **P. Julien , S. Huon (C. Valentin)**
- Autres initiatives: Projet GESSOL en Martinique **E. Blanchart**
- Measurement and evaluation on carbon sequestration : latin America case studies **/R. Ponce** Canada

[1] Centre IRD de Lavalette : réunion et restauration.

12h 30 **Discussion générale.**

13h **Repas servi en salle**

III - Les exposés méthodologiques

14h05 D.Arrouays : Mesures des stocks et de leurs variations de stock de carbone dans les sols (Cet exposé doit aider à définir des méthodes permettant la vérification des changements (protocole de Kyoto et conférence de Bonn) dans des conditions financières raisonnables.

14h25 V. Eschenbrenner : Stratégie d'echantillonnage (aspects géostatistiques) et Spatialisation des stocks de carbone

14h45 J.C Germon : Mesures des émissions de N2O,et CH4

15h05 F.Albrecht/E.Blanchart : Carbone - activité de la faune du sol - Agrégation

15h25 S. Huon : Mesure de flux de carbone liés à l'érosion et au ruissellement (transferts solides et solubles).

15h45 J. Balesdent : Modélisation de la dynamique du carbone dans les sols : méthodes, paramètres

16h 05 C. Feller : Les compartiments de carbone dans les sols

16h25 **Pause**

16h40 Discussion générale

17h20 Recommandations du comité scientifique

17h45 Clôture de la réunion du Comité scientifique.

❑ Mardi 30 Octobre

Réservé aux équipes projet avec l'appui des experts.

- Méthodologie de base et approfondissements nécessaires
- Dispositifs agronomiques et l'échantillonnage
- Répartition des tâches
- Budgets prévisionnels par pays
- Calendrier d'exécution par pays.
- Mode de coordination pour les pilotages technique et scientifique

❑ Liste des participants.

Comité scientifique:

- **Mme Martine Blatin**
- **Mme Constance Corbier-Barthaux**
- **M. Michel Robert**
- **M. Robert Barbault**
- **M. Paul Berbigier**
- **M. Christophe Du Castel**
-

CIRAD-IRD

- **F. Forest**
- **D. Rollin**
- **M. Raunet**

C. Feller
B. Barthès

F. Maraux
F. Ganry
J. Gigou
G. Bourgeon
M. Fortier
R. Oliver

Experts invités

- **MM. D.Arrouyais, J.Balesdent, JC.Germon, M. Bernoux (excusé),**
- **E. Blanchart, R. Ponce, S.Huon**

Equipes projet

- **B. Muller**
- **E. Scopel + A Cardoso**

A. Albrecht
V. Eschebrenner

- P. Julien (F. Tivet) S. Huon (C. Valentin)
- D. Rollin (K Naudin) B. Barthès

<u>Invités le lundi</u> (en particulier pour les exposés):

- M. Griffon, A. Capillon, A.Y. Le Dain, J. Valeix D.Deybe, E. Gozé P. Podjowski.

---

contacts : C. Casino CIRAD - CA . tel :04 67615643 casino@cirad.fr
F. Forest fax 0467617160.

LISTE DES PRESENTATIONS

CONTEXTE ET OBJECTIFS

Coopération internationale et changements climatiques (*M. Blatin*)

Séquestration du carbone dans les sols : Conséquence pour l'agriculture *(M. Robert)*

LE PLAN D'ACTION AGROECOLOGIE

Plan d'action agroécologie, Financement MAE, FFEM, AFD, CIRAD *(D. Rollin)*

Séquestration du carbone dans les sols tropicaux, effet du semis direct au Brésil *(Ch. Feller – E. Scopel)*

Madagascar, 10 ans d'expérience dans diverses conditions écologiques et humaines *(B. Muller)*

Agrégation et activité de la faune du sol ou les processus et activités biologiques en cause dans la séquestration du carbone *(A. Albrecht – E. Blanchart)*

Présentation Mali *(D. Rollin)*

Séquestration de carbone dans le système sol-plante en agrosystèmes à base coton avec semis direct sous couverture végétale (SCV) dans le sud-est du Mali *(B. Barthès)*

Bilan carbone *(M. Raunet)*

Objectifs du programme Laos *(S. Huon)*

EXPOSES METHODOLOGIQUES

Mesures des stocks et des variations de stocks de carbone dans les sols *(D. Arrouays)*

Cartes de la végétation du Brésil *(V. Eschenbrenner)*

Mesures des émissions de N_20 et CH_4 *(JC. Germon)*

Dispositif de mesure / Chantier Madagascar (approche synchrone et diachrone) *(A. Albrecht – E. Blanchart)*

Modèles de la dynamique du carbone des sols : utilisation, données d'entrée, problèmes, limites *(J. Balesdent)*

Séquestration du carbone dans les sols tropicaux, effet du semis direct au Brésil *(Ch. Feller)*

Mécanismes par lesquels les vers de terre peuvent affecter les flux de C. *(E. Blanchart)*

Détermination des stocks de carbone des sols des Petites Antilles (Martinique, Guadeloupe) *(E. Blanchart – M. Bernoux)*.

CONTEXTE ET OBJECTIFS

COOPÉRATION INTERNATIONALE ET CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Martine Blatin, Montpellier, octobre 2001

PLAN

- le cadre onusien de l'action internationale contre les changements climatiques :
  - . la Conférence de Rio (1992) et l'Agenda 21
  - . la Convention cadre des Nations Unies (1992) et le Protocole de Kyoto (1997)

- Problématique des émissions de gaz à effet de serre et des changements climatiques :
  - . déséquilibre Nord-Sud des émissions
  - . flexibilité économique
  - . équité dans l'effort

- État des négociations internationales :
  - . mise en œuvre difficile du fragile Protocole de Kyoto
  - . vers une entrée en vigueur en 2002 ?

- Points d'ancrage des positions françaises :
  - . les principaux acteurs français
  - . les fondements des positions françaises

LE SOMMET DE RIO ET LES 3 CONVENTIONS SUR L'ENVIRONNEMENT MONDIAL

Le Sommet de la Terre (Rio de Janeiro, 1992) est à la base de l'Agenda 21 et de trois Conventions internationales des Nations Unies destinées à protéger l'environnement mondial.

Convention sur la diversité biologique (Rio, 1992):

- Objectifs: rendre accessible et sauvegarder la diversité biologique ; assurer un partage équitable de ses ressources
- Souligne la souveraineté des États Parties sur leurs ressources naturelles
- Incite les partenaires à la définition de règles contractuelles

Convention sur la lutte contre la désertification (Paris, 1994):

- Objectif: lutter contre la désertification, en particulier en Afrique

Convention cadre sur les changements climatiques (New York, 1992)

CONVENTION SUR LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES :
LES PRINCIPES DE BASE

Objectif ultime:

Stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre (GES) à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique.

Principes fondamentaux:

- « responsabilités communes mais différenciées » des différents pays
- principe de précaution: commencer à lutter contre les changements climatiques étant donner les risques graves, malgré les incertitudes scientifiques
- les pays développés doivent prendre l'initiative d'infléchir les tendances d'émissions de GES
  (plus précisément, engagement des Parties listées en Annexe I de la Convention)
- engagement à prendre en considération les besoins des pays en développement (PED) concernant les changements climatiques

→ ***engagements de principe, non quantifiés***

CONVENTION SUR LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES :
LES PRINCIPAUX ACTEURS

(Convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques : CCNUCC ; en anglais UNFCCC *)*

- Le Secrétariat exécutif de la Convention cadre : basé à Bonn, il organise, entre autres, les Conférences des Parties *(CoP)* *(http://www.unfccc.de)*

- Un point focal "climat" dans chaque État Partie

- Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, en anglais *IPCC*) : conduit <u>toutes</u> les études relatives aux changements climatiques

- Fonds pour l'environnement mondial (FEM) : basé à Washington, il est l'instrument financier provisoire de la Convention

PROTOCOLE ADDITIONNEL DE KYOTO : LES PRINCIPES DE BASE

- Signé à Kyoto en 1997, il engage de manière quantifiée les pays de l'Annexe I (pays développés) à réduire leurs émissions de GES :

  En moyenne, pour la 1ère période d'engagement (2008-2012), leurs émissions annuelles devront être inférieures à 95% de leurs émissions en 1990.

- Les engagements de Kyoto sont différents selon les pays, de sorte à rendre l'effort plus équitable. Par exemple :

  . Union européenne : 92%
  . Australie : 108%

- Le Protocole répète l'engagement à prendre en compte les besoins des PED, particulièrement des plus vulnérables aux changements climatiques et aux mesures de riposte contre les changements climatiques.

  → pays les moins avancés (PMA), petits États insulaires en développement (*small island developing states*, ou SIDS), pays producteurs ou exportateurs d'énergies fossiles, ...

LES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE (1 / 2)

L'accroissement sensible depuis le 19ème siècle des concentrations atmosphériques de certains gaz amplifie l'effet de serre autour de la Terre, ce qui provoque une élévation générale de la température du Globe.

•Les principaux GES stables (durées de vie de quelques dizaines à quelques centaines d'années) :

. **gaz carbonique (CO_2): ≈ 70 %**
. méthane (CH_4)
. oxyde nitreux (N_2O)
. hydrofluorocarbones (HFC), hydrocarbures perfluorés (PFC) et héxafluorure de soufre (SF_6)

•Principales sources d'émissions des GES:

. **production d'énergie (CO_2 et CH_4): ≈ 30 %**
. industrie (CO_2 et N_2O)
. transports (CO_2)
. agriculture et élevage (N_2O et CH_4)

LES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE (2 / 2)

- Répartition géographique très inégale des émissions des GES:

	Émissions totales (millions de t-éq-C)	Émissions per capita (t-éq-C / hab)
États-Unis	≈ 1 400	≈ 5,5
Chine	≈ 800	≈ 0,7

L'Afrique émet autant de GES que la ville de New-York !

	Part des émissions en 1990	Part des émissions en 2020
Pays développés	70 %	< 50 %
Pays en développement	30 %	> 50 %

Les émissions de GES des PED augmentent beaucoup plus vite que celles des pays développés: 7% d'augmentation au niveau mondial entre 1990 et 1996, mais 33% en Chine, 44% en Inde, ...

PROTOCOLE DE KYOTO : CONCEPTS DE FLEXIBILITÉ

Afin d'assurer l'efficacité économique des engagements, des principes de flexibilité ont été établis:

① Flexibilité entre les 6 GES retenus: l'engagement de réduction ne porte que sur le bilan agrégé des 6 gaz.

② Surtout flexibilité géographique: sous certaines conditions, une Partie de l'Annexe I peut se prévaloir de limitation d'émissions réalisées hors de son territoire;

(2a) Par achat à un autre pays de l'Annexe I de crédits d'émissions (permis d'émission négociable, ou PEN – *CER* en anglais –)

(2b) Par financement direct d'un investissement générateur de réduction d'émissions dans un autre pays ayant pris un engagement (mise en œuvre conjointe, ou MOC – *AIJ* en anglais –)

(2c) Par financement direct d'un investissement générateur de réduction d'émissions dans un pays hors Annexe I – mécanisme de développement propre, ou MDP (en anglais *CDM*) – .

PROTOCOLE DE KYOTO : PRISE EN COMPTE DES « PUITS »

- Définition d'un « puits » de carbone : processus qui élimine de l'atmosphère un GES.

- Principaux cas de figures de puits : séquestration de carbone dans la biomasse et dans les sols par la végétation.

- Sous certaines conditions, les puits de carbone peuvent être comptabilisés dans la réalisation des engagements quantifiés de Kyoto :

  → 3 principaux types d'activités agricoles peuvent être prises en compte :

  . changement d'affectation des terres, boisement, reboisement et déboisement

  … et, selon des règles restant à définir :

  . techniques de gestion forestière
  . mode de gestion des terres agricoles

  (en anglais *land use, land use change and forestry* , ou *LULUCF*)

ÉTAT DES NÉGOCIATIONS : UN PROCESSUS FRAGILE (1 / 3)

- **Enjeu économique considérable,** puisqu'il s'agit d'organiser le secteur mondial de l'énergie du 21ème siècle, après l'ère du « tout pétrole ».

  → L'enjeu économique relativise le poids des arguments scientifiques.

- Aux côtés des États-Unis qui déclarent officiellement depuis février 2001 souhaiter « la mort du Protocole », certains pays développés cherchent des « échappatoires » à leurs engagements :

  . refus de sanctions en cas de non respect des quotas d'émissions

  . prise en compte la plus large possible des puits

- Cependant un **accord de mise en œuvre du Protocole de Kyoto a pu être adopté** à l'unanimité à Bonn en juillet dernier.

ÉTAT DES NÉGOCIATIONS : UN PROCESSUS FRAGILE (2 / 3)

•**Financement pour les PED :**

Déclaration officielle collective de l'Union européenne, du Canada, de l'Islande, de la Norvège, de la Nouvelle-Zélande et de la Suisse à mobiliser 410 millions de $ US par an collectivement à partir de 2005 pour aider les PED

•**Mécanismes de flexibilité** (PEN, MOC et MDP)

•**Puits :** prise en compte très large sur la période 2008-2012

•**Système de respect des engagements (observance) :** solide et relativement contraignant

→ Finalement, l'accord de Bonn permettra la mise en œuvre effective du Protocole, sur la base de réductions des GES amoindries, mais de manière efficace à plus long terme.

→ ETAT DES NEGOCIATIONS : → UN PROCESSUS FRAGILE (3 / 3)

→ **Eligibilité des puits au MDP (pour la période 2008-2012) :**

→ . seuls les boisements et reboisements sont éligibles

→ . pour les activités de gestion forestière, quotas nationaux négociés sur des bases strictement politiques.

→ **En conclusion,** l'accord de Bonn permettra la mise en oeuvre effective du Protocole, sur la base de réductions des GES amoindries, mais de manière efficace à plus long terme.

ÉTAT DES NÉGOCIATIONS : RATIFICATION ET ENTRÉE EN VIGUEUR

(la Convention-cadre est entrée en vigueur en 1994)

- Actuellement, très peu de Parties ont ratifié le Protocole

- L'entrée en vigueur du Protocole exige la ratification préalable par 55 Parties, parmi lesquelles des Parties de l'Annexe I réunissant au moins 55% des émissions de CO_2 de l'ensemble de l'Annexe I (base 1990).

  → Émissions de CO_2 des États-Unis et du Canada: 39,4%

POSITIONS FRANÇAISES : PRINCIPAUX ACTEURS FRANÇAIS

•Trois natures d'activités :

(A) suivi des mesures nationales (inventaires d'émissions, respect des engagements internationaux, adaptation, etc.)

(B) suivi des négociations internationales

(C) recherche et prospective

→ L'ensemble des activités est coordonné par la **Mission interministérielle de l'effet de serre (MIES)** placée sous l'autorité du Premier Ministre.

•Activités nationales (A) :

Principalement les Ministères chargés de l'environnement, des finances (Trésor, Industrie), de l'agriculture, de l'équipement, des affaires étrangères, l'Agence pour la maîtrise de l'énergie (ADEME), …

•Relations internationales (B) :

Affaires étrangères, Environnement

•Recherche et prospective (C) :

Environnement, Recherche, CIRAD, ADEME, CNRS, …

POINTS D'ANCRAGE DE POSITIONS FRANÇAISES :

À court et moyen termes :

- Finaliser l'accord de Bon pendant la CoP7 (Marrakech, 29/10 au 9/11/2001)
- Œuvrer pour une entrée en vigueur la plus rapide possible du Protocole
- … Sur une base la plus universelle possible (c'est à dire avec les Etats-Unis)

À long terme :

- Garantir, grâce à un solide régime d'observance, à une véritable réduction des émissions de GES
- Impliquer aussi largement que possible les PED dans le processus (prise future d'engagement de maîtrise des émissions de GES), tout en souscrivant à leur légitime volonté de développement.
- Améliorer notre connaissance scientifique des GES (puits, cycle du carbonne) et des changements climatiques.

SEQUESTRATION

DU CARBONE DANS LES SOLS

Conséquence pour l'agriculture

Michel ROBERT

Séquestration du carbone dans les sols :

Conséquence pour l'agriculture

Résumé

Depuis les conférences de Bonn et Marrakech, l'application des accords de Kyoto et la prévention de l'effet de serre concerne les puits de carbone dans les sols.

Le carbone des sols constitue avec près de 2000 G t le stock le plus important de la biosphère continental en interaction avec le CO2 de l'atmosphère. Il peut constituer une source de CO2 par minéralisation de la matière organique, et c'est ce qui s'est produit au 20ème siècle au cours du développement de l'agriculture et de la mise en culture des sols de prairies et de forêts..

Il peut constituer également un puits mais à condition de changer l'occupation des sols (reboisement ou utilisation de la prairie) ou de modifier les pratiques culturales : diminution ou suppression des façons aratoires (labour) et meilleure gestion des plantes de couverture et des résidus des cultures.
Ces pratiques et la séquestration du carbone qui en résulte ont d'autres conséquences positives sur la conservation des sols (protection contre l'érosion) la qualité des sols, la qualité de l'eau, de l'air ou la biodiversité.

De telles pratiques sont expérimentées au sud du Globe depuis près de 20 ans par le CIRAD (agro-écologie) ; aux Etats-Unis elles sont prises en compte comme des mesures d'écoconditionnalité pour lutter contre l'érosion.
Plus récemment, elles se sont développées au Brésil, Argentine, Canada et représentent à l'heure actuelle plus de 60 Millions d'hectares.

La séquestration du carbone peut aller de 0,2 à 1 t C /ha/an. Mais des références restent à acquérir en fonction des pratiques , des sols et des conditions climatiques.
Les surface pouvant être concernées dans les zones arides (lutte contre la désertification) ou tropicales sont importantes. Les travaux et expérimentations commencent seulement à se développer en France ou en Europe où l'on pourrait en attendre un certain nombre de bénéfices (prime au carbone, protection des sols et de l'eau, gain de temps de travail et d'énergie..).

Référence : rapport FAO 2001 en cours d'édition. M. ROBERT et al : Carbone sequestration in soils 80 pages

Séquestration du carbone dans le sol

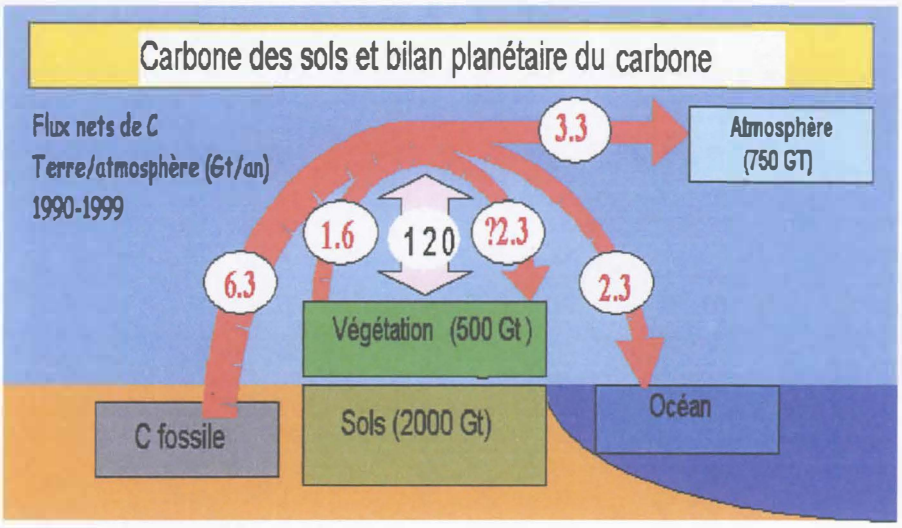
Conséquences pour l'agriculture

Michel Robert

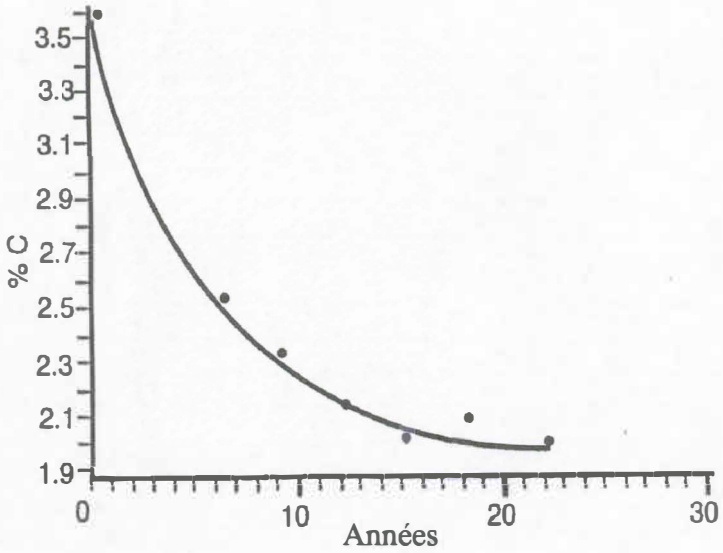
INTRODUCTION

Il est devenu évident que l'augmentation des gaz de serre (GES) dans l'atmosphère et le changement climatique résultant auront des effets majeurs au 21ème siècle. Même si les scénarios exacts sont encore incertains, on prévoit des effets négatifs sérieux et il est essentiel que plusieurs actions soient entreprises afin de réduire les émissions de GES et d'augmenter leur séquestration.. Une option concerne la séquestration du carbone dans les sols ou la biomasse terrestre, en particulier les sols utilisés pour l'agriculture ou la sylviculture. (articles 3.3 et 3.4 du protocole de Kyoto)

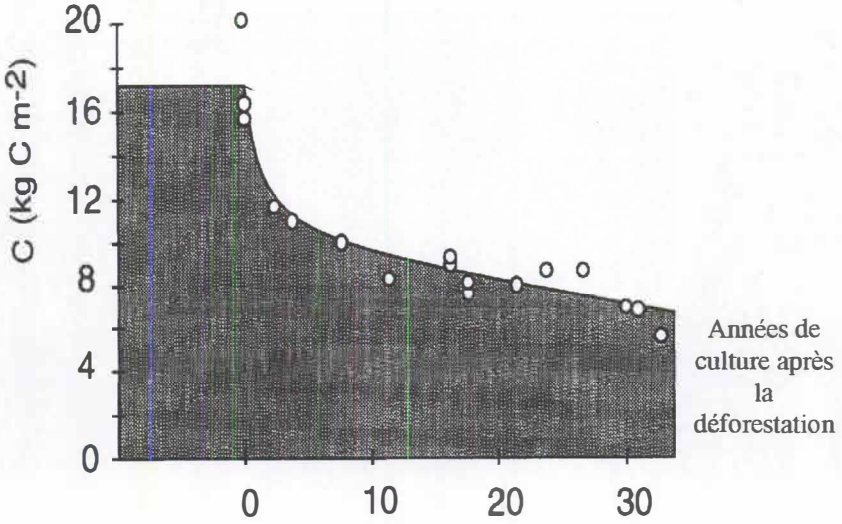
Nous allons voir que sequestrer le carbone dans les sols implique une modification importante des systèmes et pratiques agricoles.Il pourra en résulter à la fois des bénéfices et des problèmes



Le cycle du carbone terrestre:
Le carbone du sol et le budget mondial du carbone.
D'après le programme International géosphère biosphère (1998)



Evaluation des pertes en carbone dans l'expérience de conversion prairie-terre cultivée . Rothamsted (Johnson 1973).



Evolution de la teneur en carbone organique après déforestation et mise en culture de maïs (ARROUAYS et al., 1994).

Pays	Superficie (million ha)
Etats-Unis	21 + 23
Brésil	14
Argentine	9
Australie	10,5
Canada	4
Paraguay	1,1
Mexique	0,7
Bolivie	0,35
Chili	0,1
Colombie	0,07
Uruguay	0,05
Europe	1 ?
TOTAL	62 + 23

Superficie mondiale des sols cultivés dans des conditions de labour de conservation ou d'agriculture de conservation

	Régions Arides	Régions Tropicales Et temperées	Surface concernée
1. Cultures Labour de conservation Mulch et couverture du sol Conservation agriculture Compost Gestion des fertilisants Gestion de l'eau	**0.1/0.2** **0.05/0.1** **0.15/0.3** **0.1/0.3** **0.1/0.3** **0.05/0.1**	**0.2/0.5** **0.1/0.3** **0.3/0.8** **0.2/0.5** **0.2/0.5**	**700millions ha**
2. Prairies et pâtures conversion	**0.05/0.10** **0,3-0,8**	**0.1/0.2** **0,5-1**	**3 milliards ha**
3. Reforestation	**2 à 4 ?**	**4 à 8**	
4. Agro-foresterie		**0.2-3 9?**	**1 milliard ha**

Principaux effets des pratiques de gestion du sol ou de l'utilisation des sols sur la séquestration du carbone (t/ha/an). Zones arides et tropicales
(D'après Lal, 1999)

- **Echelle**
- **globale** — amélioration dans le changement climatique global
- augmentation de la séquestration du carbone
- augmentation de la biodiversité
- accroissement du tourisme
- amélioration de la qualité de l'environnement (air et eau))
- **Echelle** — augmentation de la durabilité de la production agricole
- **nationale**
- sécurité de la ressource de base renforcée pour les générations futures
- **Echelle** — diminution de la dégradation des sols
- **Locale**
- accroissement des récoltes, productions sylvicoles ou de l'élevage
- **fermiers**
- qualité du sol et de la nourriture
- gain de temps de travail, énergie,équipement

- **Bénéfices de la gestion durable du carbone (Izac 1997)**

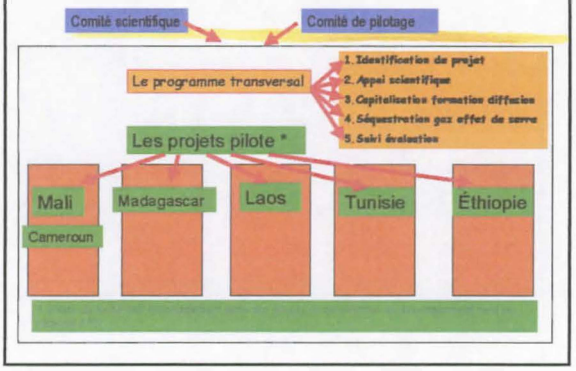
LE PLAN D' ACTION AGROECOLOGIE

LE PLAN D'ACTION AGROECOLOGIE

Financement MAE, FFEM, AFD, CIRAD

D. ROLLIN

Le plan d'action agro-écologie
financement MAE, FFEM, AFD, CIRAD

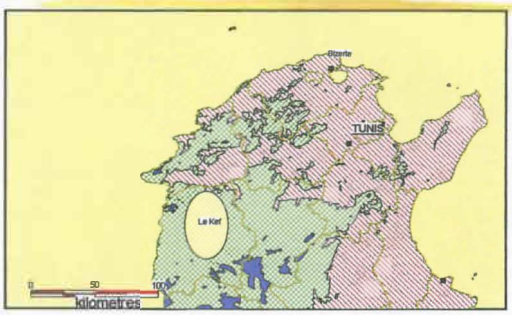


Questions générales dans les différents pays des projets pilotes

- Dégradation de la fertilité
- Érosion, ruissellement
- Comment valoriser toute l'eau qui tombe?
- Réduction des effets des aléas climatiques
- Contrôle de l'enherbement
- Relations agriculture élevage
- Réduction des coûts de production et de la pauvreté

La Tunisie

La zone du Kef

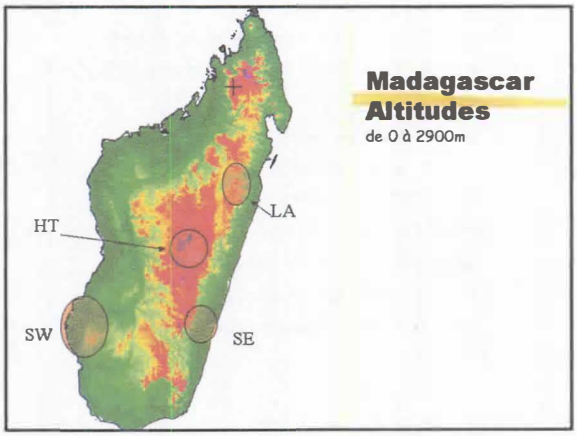


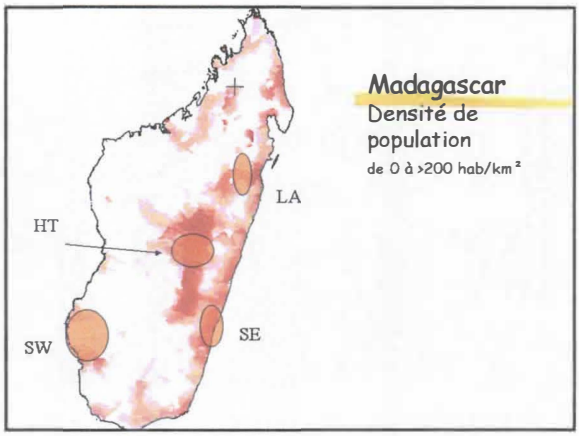
Tunisie : Quelles solutions pour une agriculture céréalière mécanisée en zone subaride <400mm

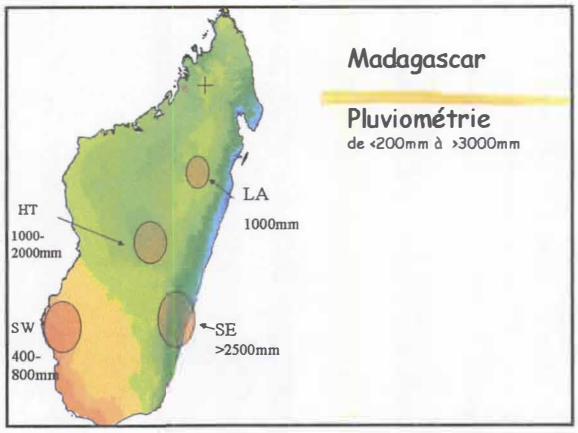
- Existe-t-il des alternatives aux techniques de lutte anti-érosives mécaniques?
- Comment permettre aux cultures de valoriser au maximum le peu d'eau qui tombe?
- Comment produire des légumineuses fourragères dans la rotation?
- Comment réduire les coûts de production?

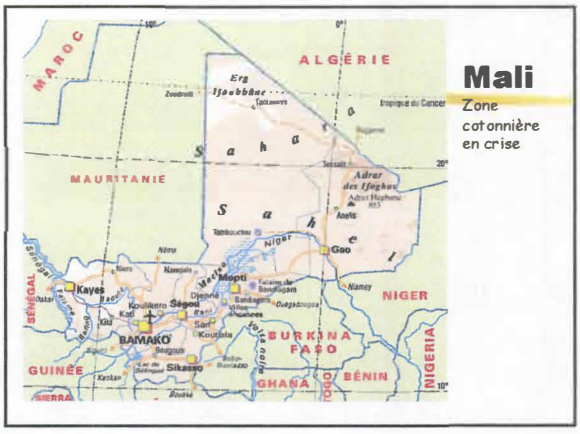
Madagascar

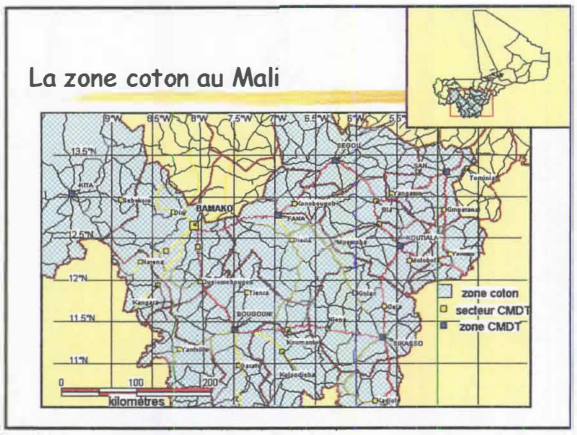
une expérience dans une grande diversité de conditions écologiques et humaines







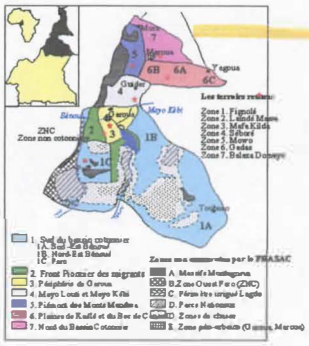


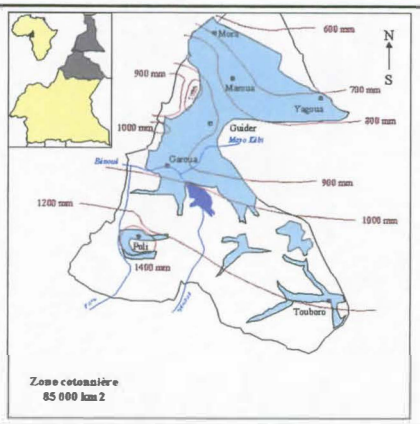


Mali: zone cotonnière en crise

- Problèmes importants de dégradation de la fertilité
- Présence d'associations de producteurs
- Existe-t-il des alternatives techniques pour produire du coton à moindre coût sans dégrader la fertilité?
- Comment concilier production agricole et élevage?

Cameroun





Ethiopie

Quelles solutions pour une petite agriculture diversifiée d 'autoconsommation

Ethiopie: Quelles solutions pour une petite agriculture d 'autoconsommation diversifiée

- Agriculture d'altitude dans des zones à forte densité de population
- Prise en compte de la diversité écologique
- Existe-t-il des alternatives aux apports massifs d 'engrais minéraux qui passent difficilement dans une agriculture peu liée au marché

Le Laos

Pays forestier à faible densité de population

Le Laos: pays forestier à faible densité de population

- Mise en culture de pentes souvent fortes sous la pression d 'une agriculture commerciale Thaï qui a déjà bien dégradé le milieu sans se soucier de problèmes d 'environnement -->quelles alternatives techniques?
- Demande de la recherche lao surtout dans le nord avec prise en compte des minorités ethniques, de la drogue, de l'enclavement

SEQUESTRATION DU CARBONE DANS LES SOLS TROPICAUX
EFFET DU SEMIS DIRECT AU BRESIL

Ch. FELLER – E. SCOPEL

Séquestration du carbone dans les sols tropicaux
Effet du semis direct au Brésil

Centro de Energia Nuclear na Agricultura — cena
Embrapa Arroz e Feijão
CIRAD
IRD

Séquestration C - Brésil

Présentation des situations

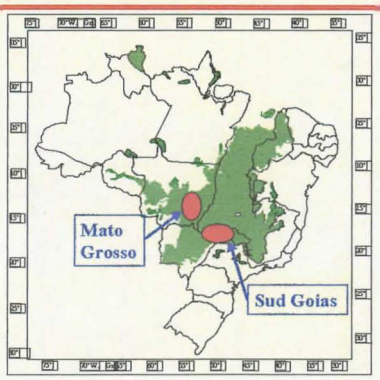
Approche du bilan de carbone

Mesures sur parcelles commerciales

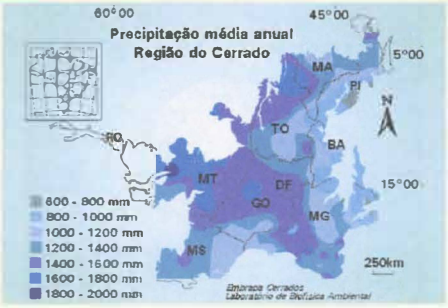
Mesures sur parcelles expérimentales

Mesures optionnelles

Le contexte : Les Cerrados brésiliens

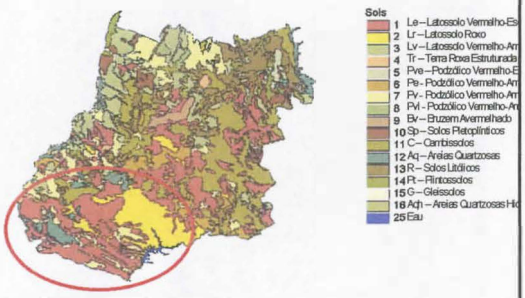


La variabilité pluviométrique



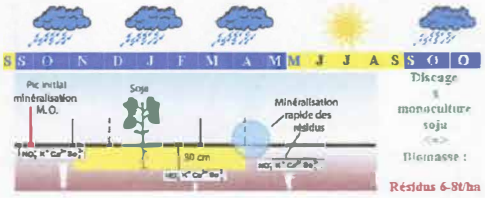
Fonte: Assad (1994)

Les sols : exemple du Goias



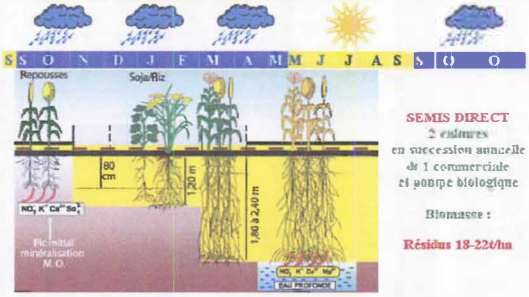
Principale zone agricole en SCV

Les systèmes de culture : avant



Auparavant...

Les systèmes de culture : actuellement

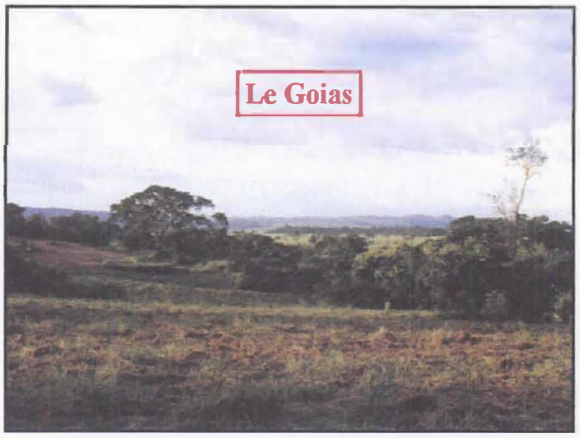


SEMIS DIRECT
2 cultures
en succession annuelle
de 1 commerciale
et pompe biologique

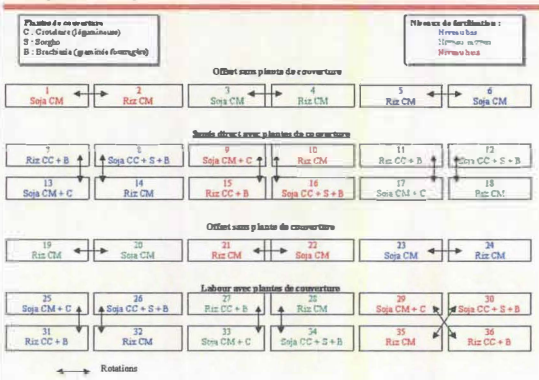
Biomasse :

Résidus 18-22t/ha

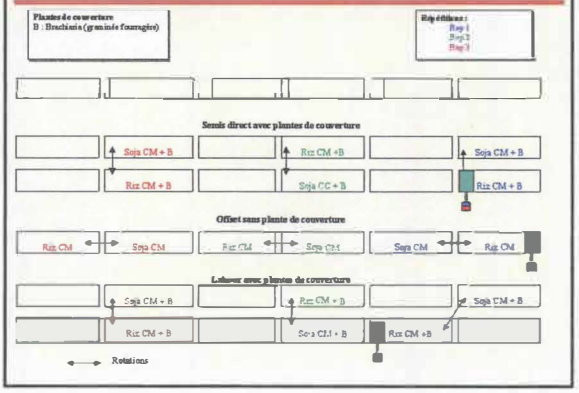
Ensuite ...



Dispositif expérimental antérieur Goiania/CNPAF



Dispositif expérimental Goiania/CNPAF (3 ans)



Dispositif expérimental CNPAF (3 ans)

- Latosolo vermelho oscuro
- Pluie (1500 mm)
- 4 traitements :
  - Soja SD + Brachiaria / Riz SD + Briachiaria
  - Riz SD + Briachiaria / Soja SD + Brachiaria
  - Soja + disquage / Riz + disquage
  - Riz + disquage / Soja + disquage

Nouveau dispositif expérimental Rio Verde

Nouveau dispositif expérimental Rio Verde

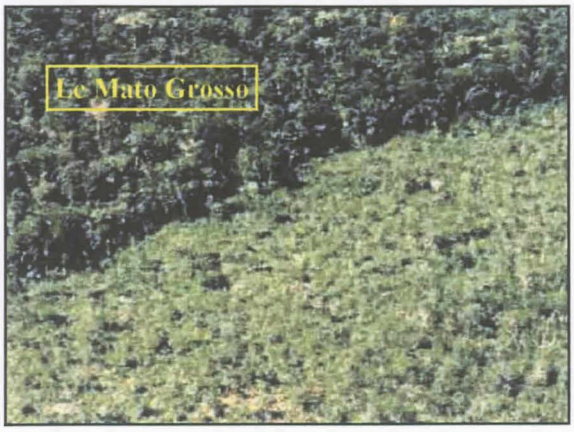
- Latosolo vermelho-amarelo
- Pluie (1500-1800 mm)
- 4 traitements :
  - Soja + disquage
  - Soja SD sans couverture
  - Soja SD + Maïs
  - Soja SD + Eleusine +Crotalaire/ Riz + Sorho + Brachiaria

Chronoséquences Rio Verde

- Latosolo vermelho-amarelo
- Pluie (1500-1800 mm)
- Antécédents = disquages conventionnel
- Systèmes de cultures = SD avec safrinha
- Série disponible = 0-1-3-5-7-10 ans
- Références : Cerrado naturel, pâturages, séquence inverse en conventionnel

Chronoséquences Rio Verde (compléments)

- Série sur Latosolos vermelhos (moins complète)
- Série à partir de pâturages
- Points complémentaires non directement liés à une chronoséquence particulière (50 à 60 parcelles)



Dispositif Mato Grosso

- Latosolo vermelho-amarelo
- Pluie (1800 mm)
- Antécédents = Forêt, puis 5 ans soja trad, puis 4 ans de SCV (ou trad.)
- Difficultés = taille des parcelles (de 0,05 à 2 ha) et manque de rép.
- Intérêt = grande homogénéité naturelle (CV< 5%) et SCV novateurs avec couverture vive (+ de biomasse)
- Possibilité de chronoséquence à la Fazenda Taffarel (15 ans)

Séquestration C - Brésil

Présentation des situations

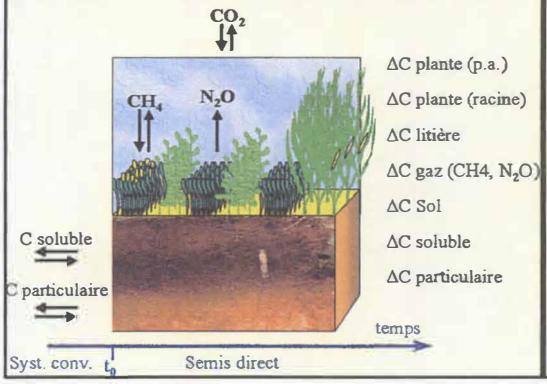
Approche du bilan de carbone

Mesures sur parcelles commerciales

Mesures sur parcelles expérimentales

Mesures optionnelles

Approche du bilan de carbone (en équivalent C-CO_2)



Approche du bilan de carbone (en équivalent C-CO_2)

Équation générale:

C séquestré (Δt) = ΔC total (Δt)

=

ΔC plante + ΔC litière + ΔC sol + ΔC gaz + ΔC soluble + ΔC partic.
(p.a. + racines)

Équations simplifiées:

ΔC1 = ΔC litière + ΔC sol	*Toutes situations*
ΔC2 = ΔC1 + ΔC gaz	*Brésil + ?*
ΔC3 = ΔC1 + ΔC soluble + ΔC partic.	*Laos + ?*

Séquestration C - Brésil

Présentation des situations

Approche du bilan de carbone

Mesures sur parcelles commerciales

Mesures sur parcelles expérimentales

Mesures optionnelles

Mesures sur parcelles commerciales : ΔC1

- Travaux de divers stagiaires
- Parcelles uniques ou chronoséquences
- Mesures inter-annuelles
  - Litière : MS, C, N
  - Sol (RV>2mm) : MS, C, N
  - Sol (0-2 mm)
    + analyses « classiques »: pH, pF, granulo
    + C,N, densité apparente
    + ^{13}C, quand possible
    + (éventuellement FGMO simplifié)
- Traitements : effets sol, rotation, durée

Séquestration C - Brésil

Présentation des situations

Approche du bilan de carbone

Mesures sur parcelles commerciales

Mesures sur parcelles expérimentales

Mesures optionnelles

Mesures sur parcelles expérimentales : ΔC2

- Travaux de thèse(s)
- Parcelles : CNPAF + Rio Verde
- Caractérisation générale (idem à parcelles commerciales)
- Mesures saisonnières de flux de : CO_2, CH_4, N_2O selon :
  - divers traitements (mulch, enfouissement)
  - diverses périodes du cycle cultural,
  - en particulier périodes favorables à émissions N_2O
- Formes de MO (FGMO complet)

Séquestration C - Brésil

Présentation des situations

Approche du bilan de carbone

Mesures sur parcelles commerciales

Mesures sur parcelles expérimentales

Mesures optionnelles

Mesures optionnelles

- Qualité des restitutions et vitesses de minéralisation
- Spatialisation des stocks de C sous semi-direct à l'échelle d'une petite région

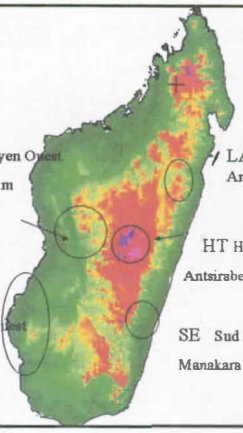
MADAGASCAR
10 ans d'expérience dans diverses conditions écologiques et humaines

---

B. MULLER

Madagascar

10 ans d'expérience
dans diverses conditions
écologiques et humaines



Madagascar Altitudes

de 0 à 2900m

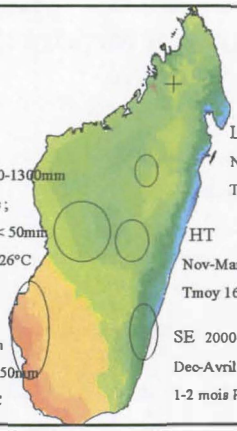
MO Moyen Ouest
500-1200 m

LA Lac Alaotra - 800 m
Ambatondrazaka

HT Hautes Terres 1300-1600 m
Antsirabe (Vakinankaratra)

SO Sud Ouest
Toleara
0-500 m

SE Sud Est 0-300 m
Manakara et Mananjary



Pluviométrie & Temp. Moyenne

LA 1000-1200 mm
Nov-Mars ; 4-5 mois < 50mm
Tmoy 21°C

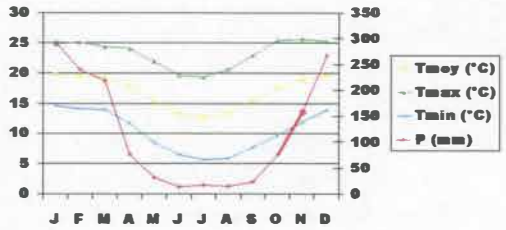
MO 700-1300mm
Nov-Mars ;
5-6 mois < 50mm
Tmoy 22-26°C

HT 1200-1800mm
Nov-Mars ; 3-4 mois < 50mm
Tmoy 16°C

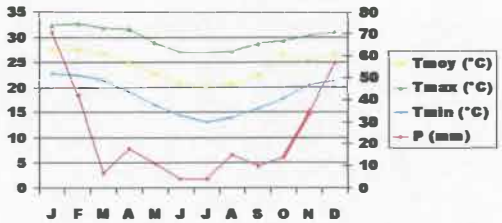
SO
300-800mm
6-8 mois < 50mm
Tmoy 24°C

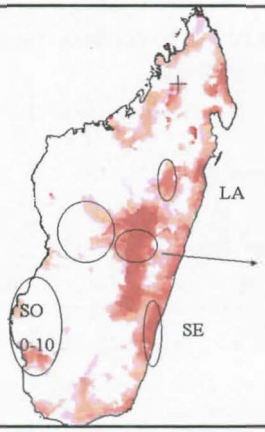
SE 2000-3000mm
Dec-Avril , Juin-Aout
1-2 mois P < 50mm ; Tmoy 23°C

Pluviométrie et températures à Antsirabe (HT) - 1506 m



Pluviométrie et températures à Toleara (SO) - 8 m





Madagascar Densité de population

de 0 à > 200 hab/km²

Petites exploitations familiales

LA

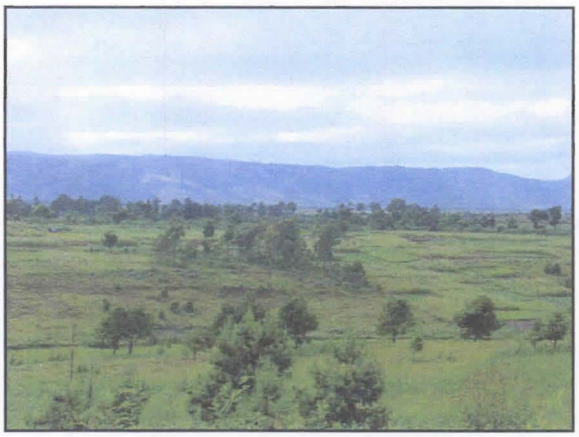
HT 100 à 200 hab/km2
Exploitations : 1,5 Ha
60% : <1 Ha

SO
0-10

SE

Interventions SDCV du CIRAD à Madagascar

- Hautes Terres - Antsirabe (ferme Kobama) :
  - début années 90 - FOFIFA-CIRAD
  - 94 création ONG TAFA : début diffusion
- Sud-Ouest -Toleara - projet PSO/AFD-TAFA : 1994-95
- Lac Alaotra et Sud Est - TAFA-CIRAD : 1998
- Nombreux partenaires :
  - Recherche : FOFIFA, TAFA, FIFAMANOR
  - R&D, diffusion : TAFA, ANAE, GSDM



Pourquoi les hautes terres? Gérer/restaurer la fertilité des « Tanety » (versants)

- SProd. traditionnel = riziculture irriguée
  - intensification - aménagements plaines et bas fonds
- Saturation des bas fonds - ne suffit plus (20 ans)
- Stratégie paysanne : diversifier - conquérir tanety
  - cultures contre saison en bas fonds (pdt, blé, mar.)
  - prod. vivrières sur les tanety (maïs, haricot, manioc, patate douce)

Gérer/restaurer la fertilité des « Tanety » (versants)

- Pauvreté des sols de tanety
  - sols ferrallitiques désaturés acides
  - dégradation par labour à l 'angade
  - faiblesse (décroissance) des productions
    - 0.4 T/Ha maïs ; 0.8 T/Ha avec 5T fumier
  - Erosion : dégradation des aménagements
- Recommandations (70) : aménagements anti-érosif + forte fumure minérale (dolomie)+fumures d 'entretien
- Echec : irréaliste et n 'endigue pas la dégradation

Gérer/restaurer la fertilité des « Tanety » (versants)

- Début 90 : Approche agroécologique à Antsirabe (ferme Kobama, P.Julien, L.Séguy) : SD avec CV M/V
  - 1994 : 6 sites chez agriculteurs ;
  - début de diffusion
- Quels systèmes de culture ?:
  - SC tradit. : labour-angade + 5T/Ha poudrette ; maïs, haricot, soja, avoine, riz pluvial, blé, fourages
  - SDCV : idem + biomasse transférée ou produite
  - Avec 4 niveaux fumure : Fumier / F + fum.min moy. / F + fum.min.forte / Ecobuage

Gérer/restaurer la fertilité des « Tanety » (versants)

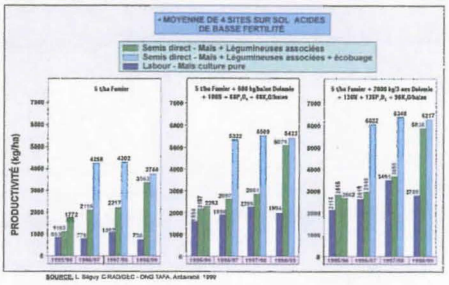
- Position/toposéquence (haut,milieu,bas)
- Exploration d'une grande diversité de systèmes
  - Rotation maïs-soja SD / labour ; Maïs + légumineuse (desmodium, cassia) ; SD soja + kikuyu ; SD rotation soja-avoine ; SD Avoine + haricot ; SD riz pluvial après avoine+haricot ; SD blé + trifolium/lotus
  - Ecobuage (« effet starter ») 7T/Ha bozaka
    (Sans fumure x 2 : riz 1,5T ; soja 0,6T)
- Evaluation des performances des systèmes
- Recherches thématiques

Gérer/restaurer la fertilité des « Tanety » (versants)

- Recherches thématiques
  - Écobuage : essais fréquence et combustibles
  - Évolution faune (vers blancs)
  - Identification variétale (maïs, soja, haricot, riz pluvial)
  - Plantes couverture fourragères (Trifolium semipilosum, Cassia rotondifolia, Lotus uliginosus; Brachiaria)
  - Evolution caractéristiques sol
  - Adventices (striga)

Gérer/restaurer la fertilité des « Tanety » (versants)

FIG. 16 ÉVOLUTION DES RENDEMENTS MOYENS DE MAÏS, EN FONCTION DU MODE DE GESTION DU SOL ET DES CULTURES, EN CULTURE MANUELLE
Sols ferrugineux et volcaniques des hauts plateaux malgaches - Antsirabé, 1995/99



SOURCE: L. Séguy CIRAD/GEC - ONG TAFA, Antsirabé 1999

Gérer/restaurer la fertilité des « Tanety » (versants)

- Résultats :
  - SDCV permet de restaurer fertilité sols dégradés:
    - Fumier seul après 3 ans : 3,3T maïs , 2,8T soja
    - SDCV + écobuage : 4T maïs
  - Accumulation de MO sous SD : en 5 ans + 2-2,5%
    - Labour : -1%
  - Augmentations CEC, pH, taux saturation, Ca+Mg

Sud Ouest (300-800 mm) : alternatives au défriche-brûlis et maintien fertilité des savanes

- Sols ferrugineux sableux +- lessivés
- Systèmes traditionnels (pluvial) :
  - maïs sur défriche-brûlis forêt (2-3 ans puis manioc)
  - coton (monoculture), arachide (idem), manioc
  - élevage bovin extensif
  - forte compétition agriculture-élevage ; pas de fumier
- Compaction, adventices, érosion : 0.5-1T cotongraine /Ha
- Agriculteurs privilégient défriche-brûlis : destruction forêt

Sud Ouest (300-800 mm) : actions menées TAFA-MdP-CIRAD

- SD association céréale (maïs/sorgho/mil)+légumineuse (dolique, niébé, arachide)
- SD coton en rotation avec association céréale+légumineuse
- Jachère améliorée Mucuna+Brachiaria+maïs/sorgho/mil
- Promotion de la poudrette
- Décompactage par mil, brachiaria ou crotalaire
- Problème de la conservation des résidus en saison sèche
  - mise en place de « dina » (conventions)
- Diffusion commence et peine

Etude de la séquestration du carbone dans les sols du fait de pratiques SDCV

2 régions :

- Région d 'Antsirabe :
  - 10 années de SDCV en milieu contrôlé
  - 5-6 années en milieu semi-contrôlé
- Sud Ouest :
  - 6 années de SDCV en milieu contrôlé
  - 2-3 années en milieu semi-contrôlé

Etude de la séquestration du carbone dans les sols du fait de pratiques SDCV

•Inventaire des situations et caractérisation des stocks de C sur différentes situations après plusieurs années de SDCV

- •Antsirabe et Sud-Ouest

Mise en place d 'un dispositif neuf adhoc sur une parcelle vierge (20 années de jachère) pour comparer effets SDCV sur flux GES et séquestration C : 1 SDCV et 1 STradi. sur 4-5 ans

- •Antsirabe seul

Etude de la séquestration du carbone dans les sols du fait de pratiques SDCV

Inventaire et caractérisation des stocks de C

(Antsirabe et Sud-Ouest)

- •Inventaire = caractériser des parcelles (historique: cultures, conduites, intrants, biomasses, etc..) (2002)
  - •parcelles SDCV
  - •parcelles de référence non SDCV: milieu contrôlé, semi-contrôlé ou non-contrôlé (paysan)
- •Caractérisation stocks C (prélèvements) (2002-2003)
- •Analyse (ACP, etc) - tendances - déterminants

Etude de la séquestration du carbone dans les sols du fait de pratiques SDCV

•Flux GES (N_2O, CO_2) et séquestration C de traitements SDCV et conventionnel sur un dispositif adhoc sur une parcelle vierge (20 années de hachère)

- •méthodologie standardisée
- •choix des systèmes à étudier (pour octobre 2002)
  - •conventionnel
  - •SDCV
  - •et SDCV + écobuage ???
    - •Écobuage = pertes GES (quantification?)

DISPOSITIF DE MESURE / CHANTIER MADAGASCAR (APPROCHES SYNCHRONE ET DIACHRONE)

A. ALBRECHT – E. BLANCHART

Dispositif de mesures/Chantier Madagascar (approches synchrone et diachrone)

- Stocks de carbone/sol (s&d)
  - ? méthodologie
- Biomasses aériennes et racinaires (d)
  - ? Litières et qualité des intrants (lign/polyph)
- Émissions des GES (d)
  - CO_2 mesure sur le terrain
  - CH_4, N_2O prélèvement/analyse au laboratoire
- Localisation et protection du carbone/sol (s&d)
  - Fractionnement physique de la MO et des agrégats stables à l'eau & distribution C
  - Minéralisation *in vitro* pour biodisponibilité C

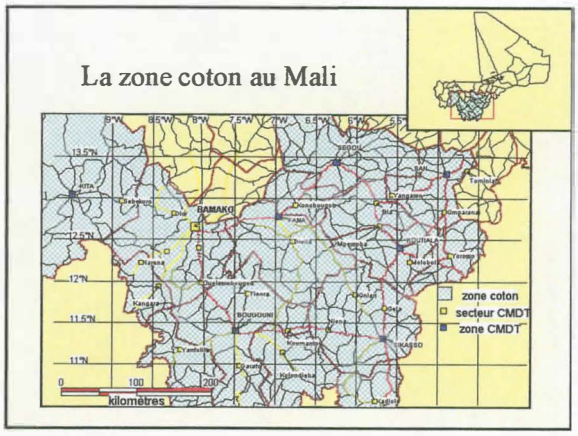
IRD
Institut de recherche pour le développement

Dispositif de mesures (suite)

- Évaluation du carbone érodé (d)
  - à l'échelle de la parcelle
  - pièges à sédiments
- Spatialisation aux grandes échelles (s&d)
  - 100 km^2
  - vidéographie numérique
  - imagerie IKONOS
  - NIRS/DRS

PRESENTATION MALI

D. ROLLIN



Mali: zone cotonnière en crise

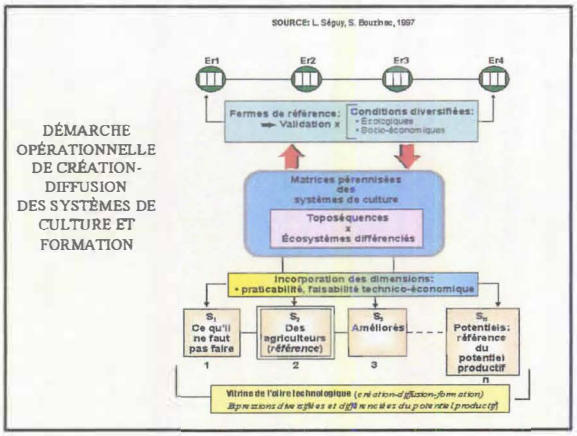
- **Problèmes importants de dégradation de la fertilité**
- **Présence d'associations de producteurs**
- **Existe-t-il des alternatives techniques pour produire du coton à moindre coût sans dégrader la fertilité?**
- **Comment concilier production agricole et élevage?**

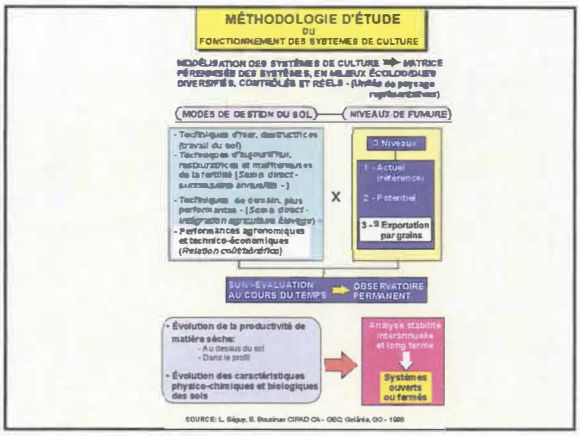
Contexte

- Augmentation démographique
- Tendance à la baisse des rendements en coton graine
- Augmentation des surfaces mise en culture
- Diminution des durées de jachère
- Modification de l'importance relative des céréales maïs, mil, sorgho
- Développement des cultures fourragères et de la valorisation de la biomasse
- Compétences techniques des producteurs et forte demande d'amélioration de leurs itinéraires techniques permettant une augmentation de la productivité du travail tout en limitant le risque

Principes d'action

- partir d'une analyse des stratégies, objectifs, pratiques actuelles
- contractualisation des recherches;
- approche participative
- nouveaux itinéraires techniques pour la culture de coton
- accroître la place des légumineuses
- prendre en compte les aspects recherche et approvisionnement en matériel végétal et matériel agricole
- articuler les activités en milieu contrôlé et en milieu réel





GESTION DE LA FERTILITÉ PAR LE SYSTÈME DE CULTURE

OBJECTIF = Exprimer le potentiel du sol, de manière durable, au moindre coût

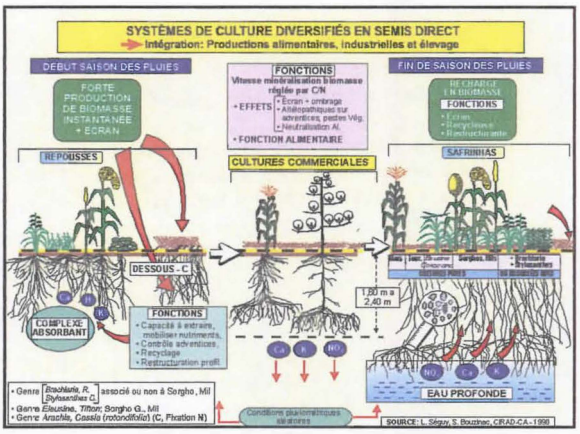
COMPOSANTES DU SYSTÈME POUR UN TYPE DE SOL

MODES DE GESTION DU SOL (*Travail du sol, semis direct*) x ROTATIONS ET/OU SUCCESSIONS DE CULTURES x DATE DE SEMIS (*Précoce, tardive*) x PEUPLEMENT VÉGÉTAL x VARIÉTÉS FUMURES TRAITEMENTS PESTICIDES

MODES DE GESTION DES SOLS ET DES CULTURES

PRODUITS THÉMATIQUES SIMPLES

SOURCE: L. Séguy, S. Bouzinac CIRAD CA - GEC; Groupe Maeda - SP, 1998



SEQUESTRATION DE CARBONE DANS LE SYSTEME SOL-PLANTE EN AGROSYSTEMES A BASE COTON AVEC SEMIS DIRECT SOUS COUVERTURE VEGETALE (SCV) DANS LE SUD-EST DU MALI

B. BARTHES

Séquestration de carbone dans le système sol-plante en agrosystèmes à base coton

avec semis direct sous couverture végétale (SCV) dans le sud-est du Mali

Proposant et partenaires

Laboratoire MOST, UR-SéqC de l'IRD (Montpellier)

Laboratoire de Biopédologie, UR-IBIS de l'IRD (Dakar)

UMR Microbiologie des sols et Géosol (Dijon)

Programme GEC du CIRAD-CA (Montpellier, Mali)

CMDT et IER (Mali)

Situations étudiées

Deux ou trois situations géographiques (gradient pluviométrique). Sur chaque situation géographique (station) :

- un traitement conventionnel (rotation coton / céréale avec labour à la charrue à soc en culture attelée)
- un à trois systèmes SCV (rotation coton / céréale ou céréale + légumineuse, avec possibilité de cultures dérobées au sud, semis direct dans tous les cas)
- si possible un témoin (savane ou jachère longue durée)

Au total, six à dix traitements étudiés. Pour chaque traitement, plusieurs répétitions (parcelles).

Caractérisations sur tous les traitements étudiés (échelle parcellaire)

Stocks de C et N en début d'expérimentation puis après 4 ans, à 0-30 cm de profondeur dans le sol, et sous forme de litière.

Caractérisations sur certains traitements, choisis pour leur intérêt particulier (échelle parcellaire)

1. Evaluation de certains termes des bilans de C et N (au champ) :

- stocks de C et N en début d'expérimentation puis après 4 ans, jusqu'à 100 cm de profondeur ;
- biomasses végétales aériennes et racinaires, et contenus en C et N ;
- mesure des émissions de gaz à effet de serre.

2. Caractérisation des processus en jeu dans l'éventuelle séquestration de carbone sous système SCV (au laboratoire) :

- stabilité des agrégats de l'horizon 0-10 cm, et évaluation de l'érodibilité ;
- granulométrie des matières organiques de l'horizon 0-10 cm ;
- biomasse microbienne potentielle de l'horizon 0-10 cm ;
- analyses physico-chimiques complémentaires : analyse mécanique, complexe d'échange, fer, aluminium...

Caractérisation des stocks de carbone à l'échelle d'un projet-pilote

Quantification à l'échelle microrégionale des stocks de C et de leur évolution en fonction de divers scénarios, sur la base :

- des cartes et bases de données sur le climat, la topographie, les sols et l'occupation des terres, à inventorier ;
- des mesures de stocks réalisées à l'échelle de la parcelle sous culture conventionnelle, SCV et savane, dans les différentes conditions de milieu.

BILAN CARBONE

M. RAUNET

BILAN CARBONE

LAOS

Le projet-pilote national « agroécologie » est en cours d'instruction. L'étude de faisabilité (P. Julien/M. Raunet) a été réalisée en mai-juin 2001.

Il est proposé de travailler dans 3 Provinces du Nord-Laos (Oudomxai, Luang Prabang et Xieng Khouang). Trois « sites de référence » ont été sélectionnés dans chacune de ces provinces, représentant l'ensemble des conditions écologiques et socio-économiques du Nord Laos.

La problématique principale de ces milieux montagneux forestiers est la fixation de l'agriculture itinérante de défriche-brûlis et la mise au point, avec les agriculteurs, de systèmes de culture et de production, durables économiquement et protecteur de l'environnement (amélioration des sols, suppression de l'érosion, conservation de la biodiversité).

A ces trois provinces, s'ajoutent, les sites du Sud de la Province de Sayabouri du projet AFD actuel (PRODESSA) qui seront probablement l'objet d'une 2ème phase.

Le CIRAD propose d'affecter 4 agronomes à l'ensemble de ce projet dont 1 agronome coordonnateur. On espère qu'il commencera en 2002.

L'IRD, de son côté, a installé un « site lourd » à proximité de Luang Prabang, composé d'un bassin versant complet équipé pour faire un bilan d'érosion. Le dispositif de bilan de carbone, à partir de la mise en place de parcelles en SCV y sera installé.

Parallèlement, le site de Nahin (Sayabouri) du PRODESSA sera étudié également par l'IRD.

Enfin, en fonction des moyens, certains sites de référence des trois autres provinces seront l'objet également de bilans de carbone.

OBJECTIFS DU PROGRAMME LAOS

S. HUON

COLLABORATEURS AU
PROGRAMME «LAOS»

IRD (affectations, missions)

UR – ECU

C. Valentin (Laos)
A. de Rouw (Laos)
V. Chaplot (Laos)
P. Marchand (Laos)
J.P. Bricquet – J.L. Janeau (Thaïlande)
P. Podwojewski (Bondy)

+ L. Descroix (LTHE, Grenoble)

UPMC (UMR 7618, INRA-CNRS, Paris)

S. Huon (UPMC)
C. Girardin (INRA)

+ M. Castrex-Rouelle (UPMC)

LSCE (UMR CEA-CNRS, Gif/Yvette)

P. Bonté (CEA)
S. Sogon (CNRS)

OBJECTIFS DU PROGRAMME « LAOS »

Quantification de l'érosion aratoire et hydrique des sols en fonction du type d'occupation

Relation entre teneur en matière organique et niveau d'érosion des sols

Impact de la défriche-brûlis sur les stocks de matière organique des sols

METHODES

- mesure infiltration – ruissellement sur parcelles

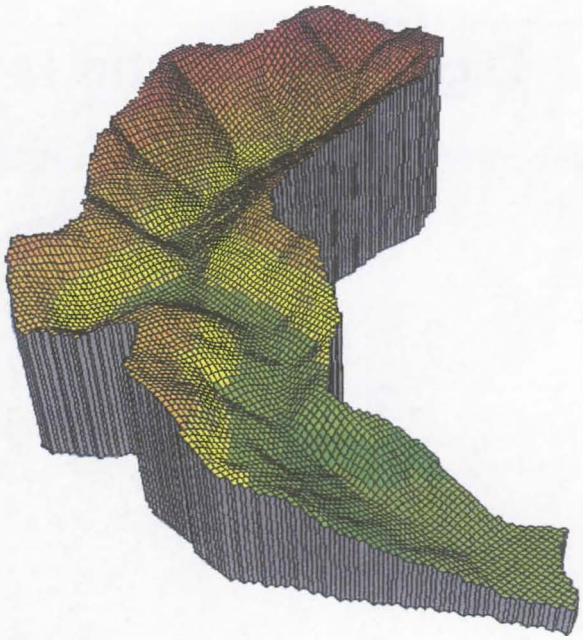
- caractérisation micromorphologique des états de surface du sol

- suivi des transferts hydriques et solides sur le BV à l'échelle saisonnière et à l'échelle des crues

- détermination du « niveau d'érosion » par mesure de l'activité ^{137}Cs et ^{210}Pb des sols

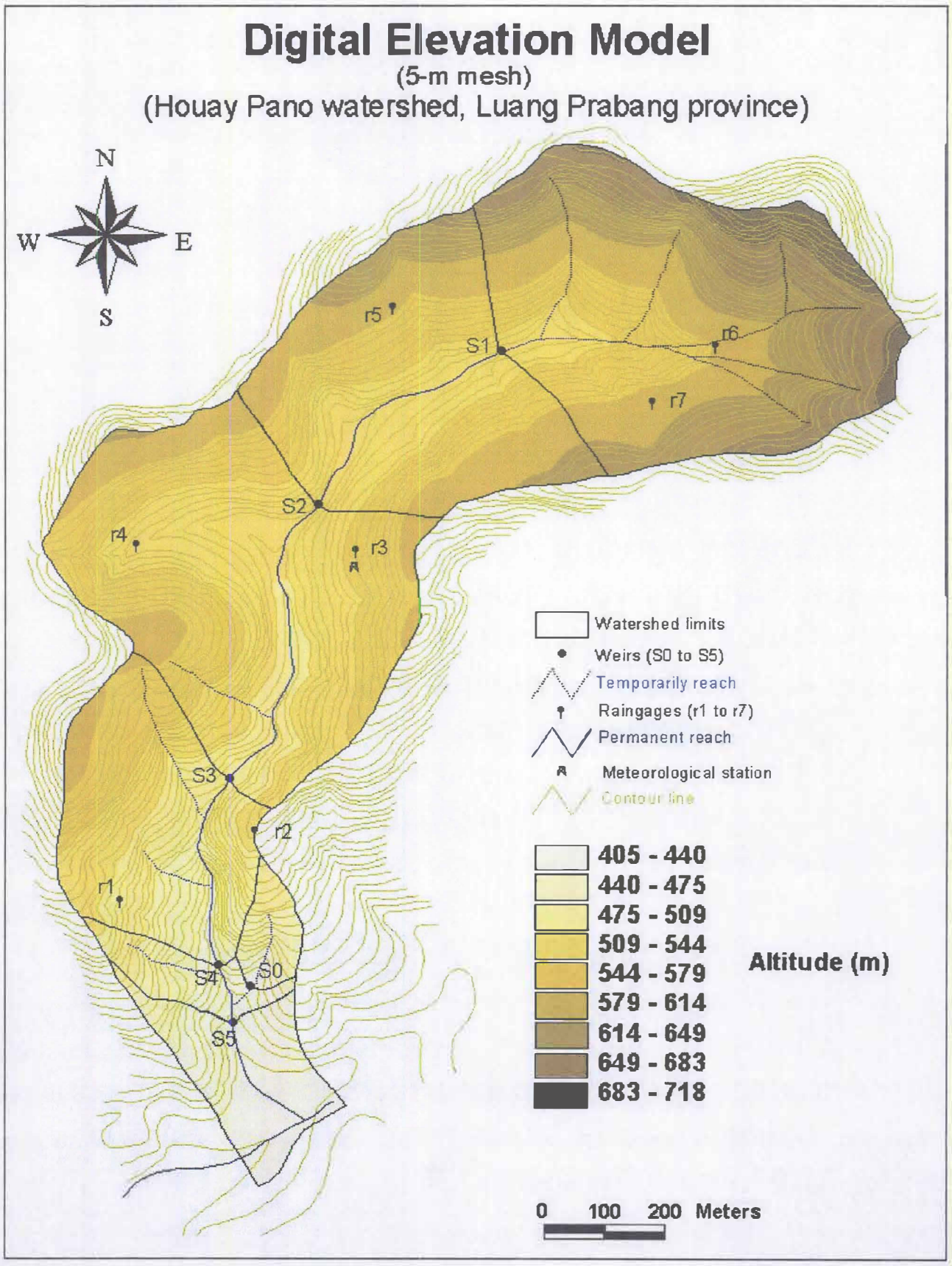
- caractérisation de la matière organique des sols (teneur, $\delta^{13}C$, $\delta^{15}N$)

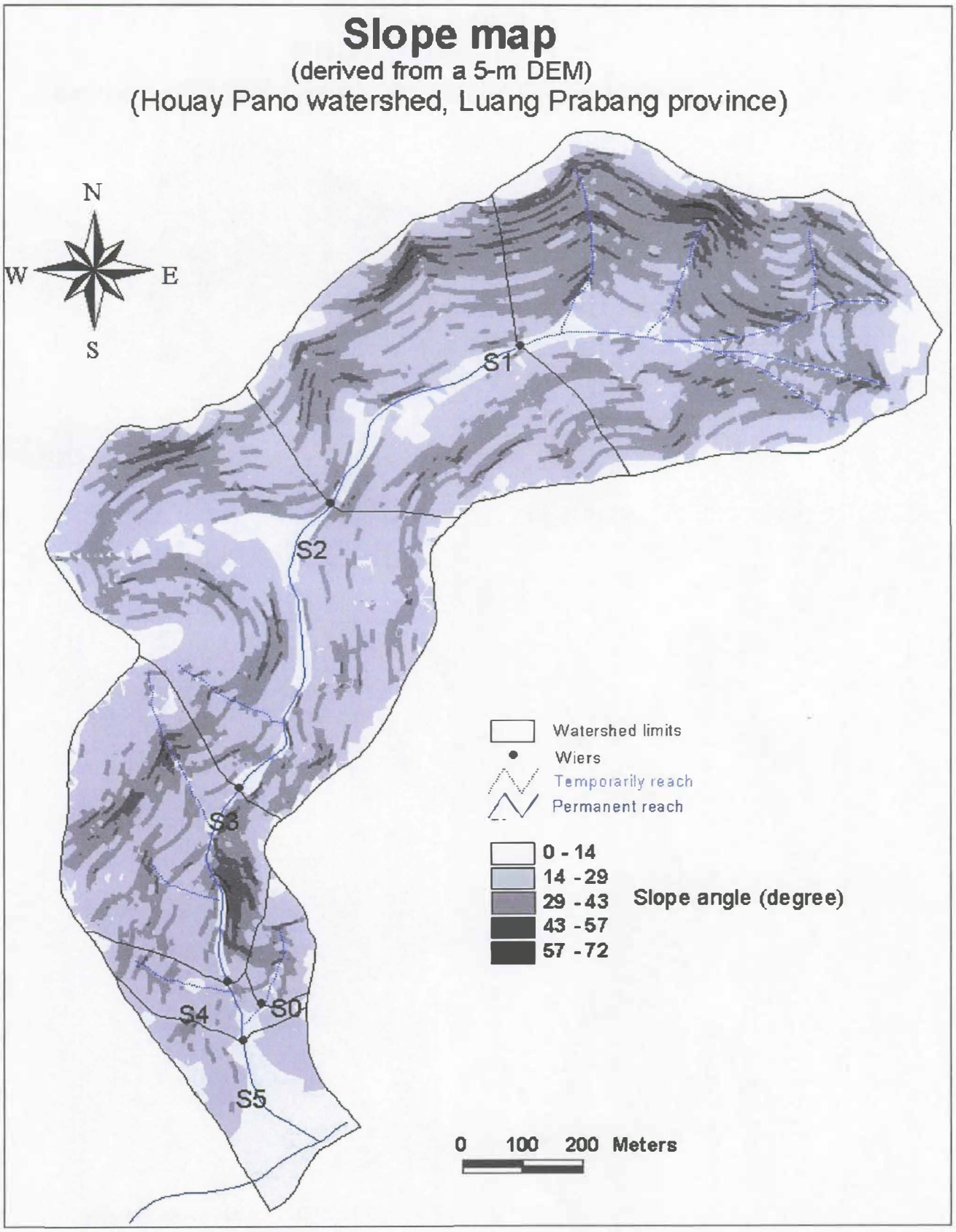
BASSIN VERSANT DE HOUAY-PANO (LAOS)



- Petit BV agricole (67 ha)
- 400 km Nord de Vientiane, 10 km de Luang Prabang
- Région montagneuse (290-2257 m), fortes pentes
- Sur formations sédimentaires / métamorphiques d'âge permo-carbonifère (schistes, grès, argilites, calcaires)
- Climat tropical à saison humide de type mousson
- T. moyenne 25°C, P moyenne 1403 mm (1986-1996)
-Saison sèche nov.-> mars, saison humide avril -> oct.

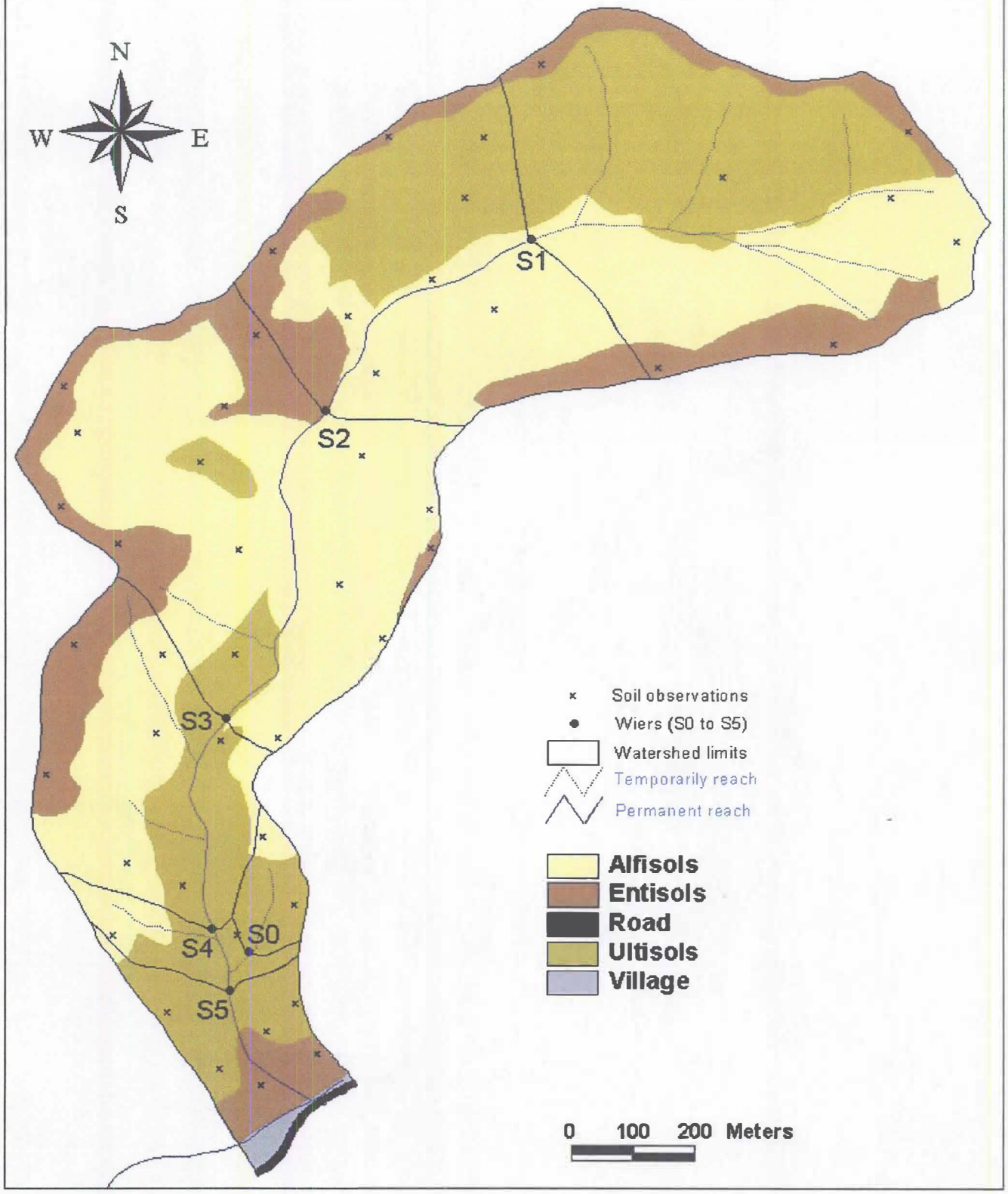
- Population rurale (89 %), agriculture sur brûlis
- Riz pluvial, larmes de Job, cultures maraîchères…
- Déforestation (≈ 30 %), érosion sols 30-150 $t.ha^{-1}.an^{-1}$
- Réduction drastique de la jachère 4-6 -> 1-3 ans
- Réduction de la biodiversité (espèces résistantes à des conditions plus sèches).


Digital Elevation Model
(5-m mesh)
(Houay Pano watershed, Luang Prabang province)
N
W
E
S
r5
S1
r6
r7
S2
r4
r3
S3
r2
r1
S4
S0
S5
Watershed limits
Weirs (S0 to S5)
Temporarily reach
Raingages (r1 to r7)
Permanent reach
Meteorological station
Contour line
405 - 440
440 - 475
475 - 509
509 - 544
544 - 579
579 - 614
614 - 649
649 - 683
683 - 718
Altitude (m)
0 100 200 Meters


Slope map
(derived from a 5-m DEM)
(Houay Pano watershed, Luang Prabang province)
N
W
E
S
S1
S2
S3
S4
S0
S5
Watershed limits
Wiers
Temporarily reach
Permanent reach
0 - 14
14 - 29
29 - 43
43 - 57
57 - 72
Slope angle (degree)
0 100 200 Meters

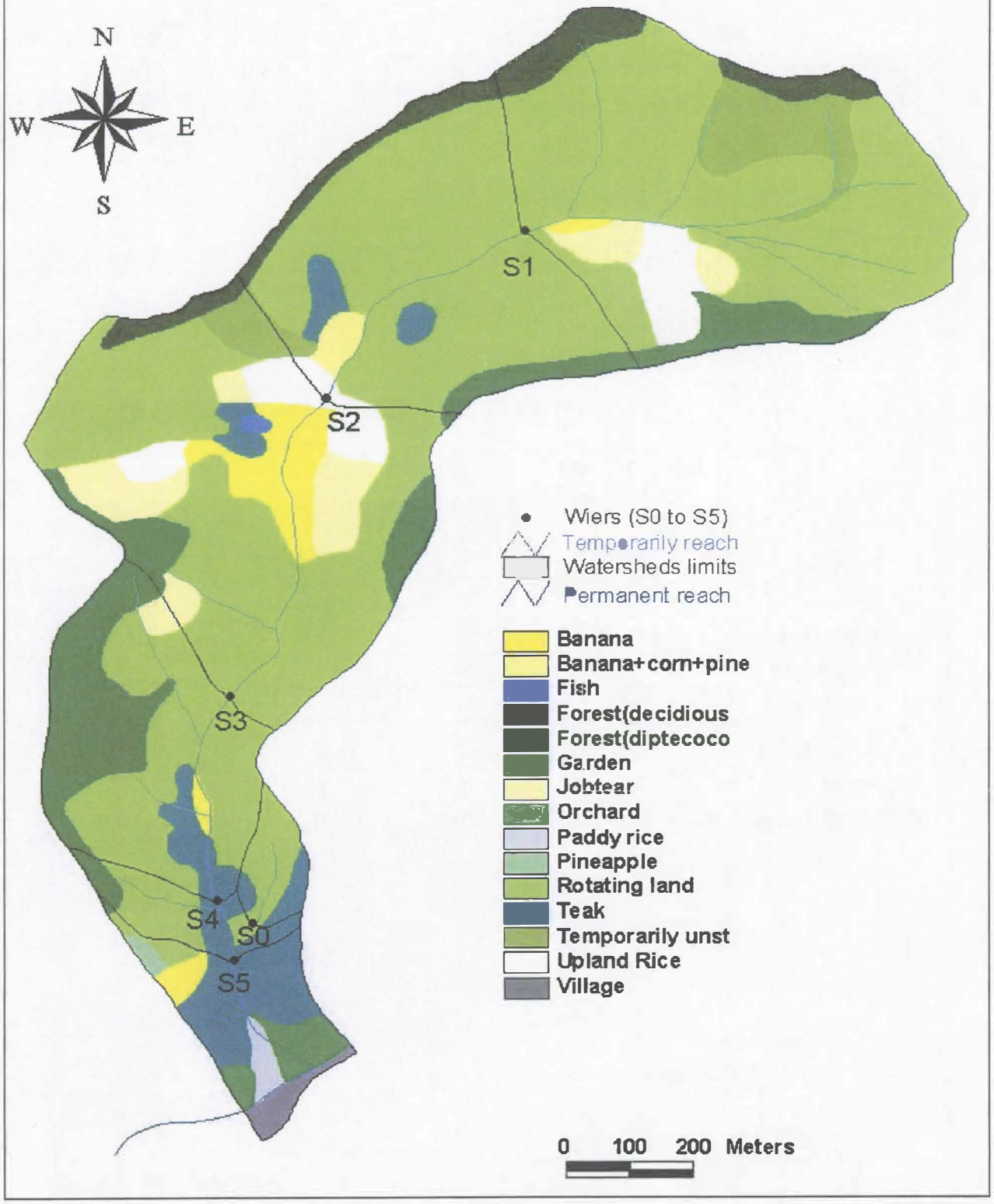
Soil Map

(Houay Pano watershed, Luang Prabang province)



Land use 2001

(Houay Pano watershed, Luang Prabang province)



REPARTITION DES TYPES DE SOL SUR LE BASSIN VERSANT

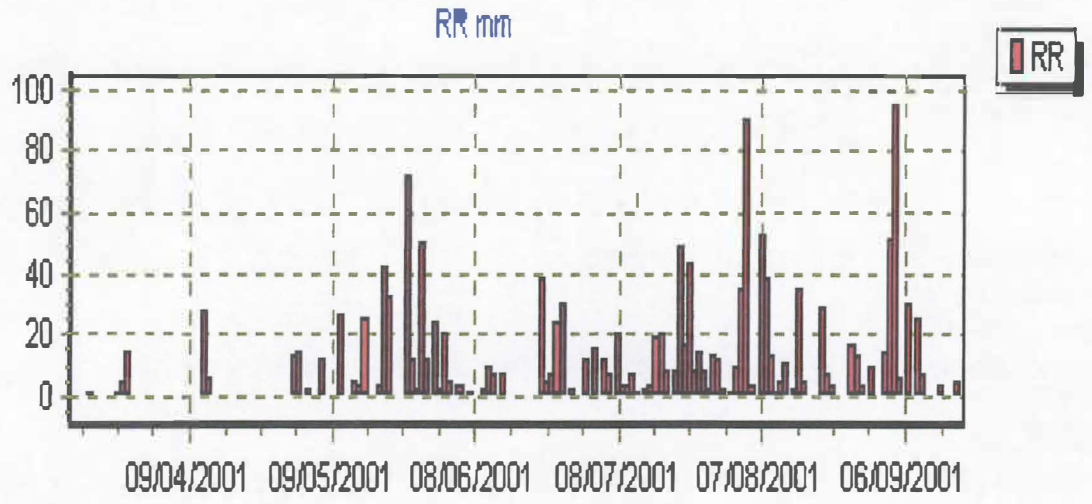
	Proportion (%)						
	S0	S1	S2	S3	S4	S5	Whole
Alfisols	18.1	35.6	47.5	74.4	47.2	38.6	48.5
Entisols	0.0	16.5	19.5	17.7	21.5	0.0	18.5
Ultisols	81.9	47.9	33.0	7.8	31.3	61.4	33.1

OCCUPATION DES SOLS SUR LE BASSIN VERSANT

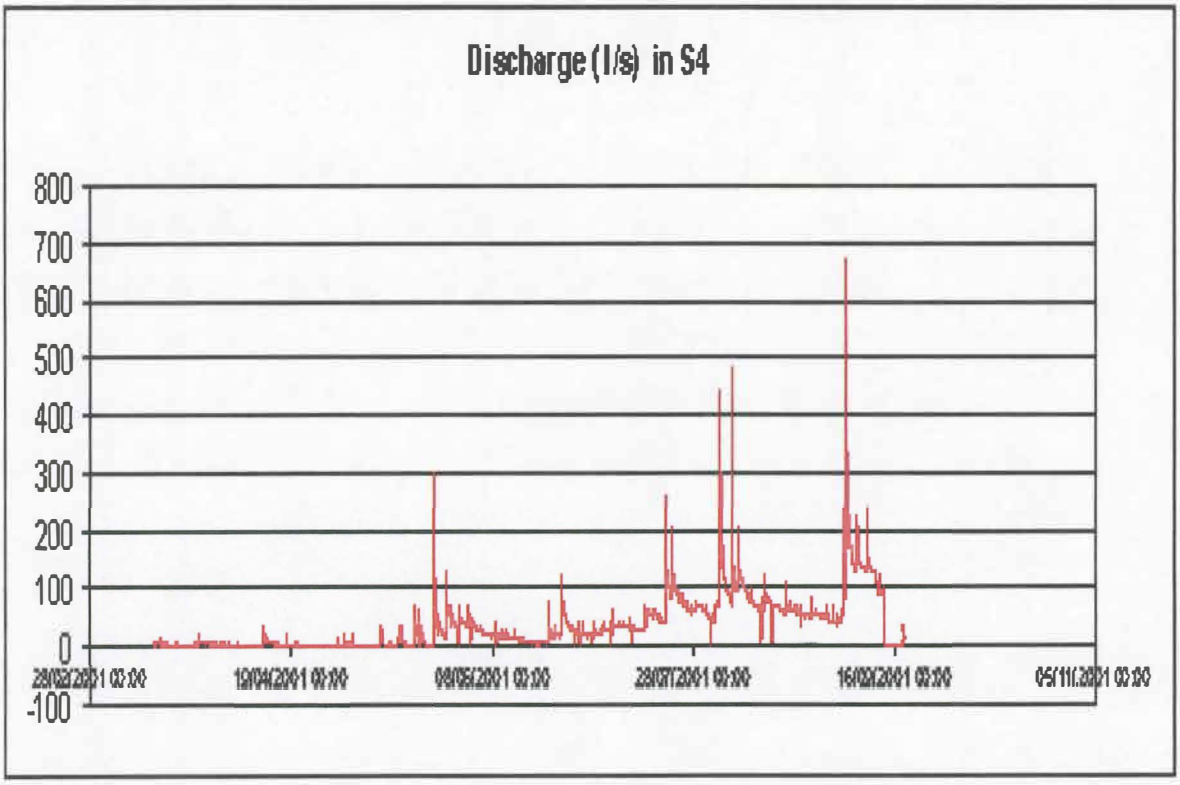
	2001 Soil Occupation by catchment in %						
	S0	S1	S2	S3	S4	S5	S
Forest		14.0	11.6	10.2	35.1	13.4	15.3
Teak	31.0		4.4		8.4	31.0	6.3
Banana		0.8	2.6	9.5	1.5		4.0
Orchard							0.9
Pineapple							0.2
Fish ponds				0.5			0.1
Garden							0.3
Job'stear		3.7		11.4	2.3		4.5
Upland rice		5.5	1.7	7.2			3.9
Rotating Land	69.0	76.0	79.7	61.2	52.7	55.7	64.0

	Land use type	% of Area				
		1998	1999	2000	2001	Average
1.	Forest land	**25.8**	**22.2**	**22.6**	**26.0**	**24.1**
2.	Agricultural land	**73.4**	**77.0**	**76.4**	**72.5**	**74.8**
2.1	Annual crops	22.4	51.5	14.3	9.1	24.3
2.2	Fruit tree	4.5	4.5	4.7	4.1	4.4
2.3	Bush fallow	46.5	21.0	57.3	59.2	46
2.4	Fish pond	0	0.1	0.1	0.1	0.1
3.	Other land	**0.8**	**0.8**	**1.0**	**0.5**	**0.8**

PRECIPITATION SAISON DES PLUIES 2001 (AVRIL – SEPTEMBRE)



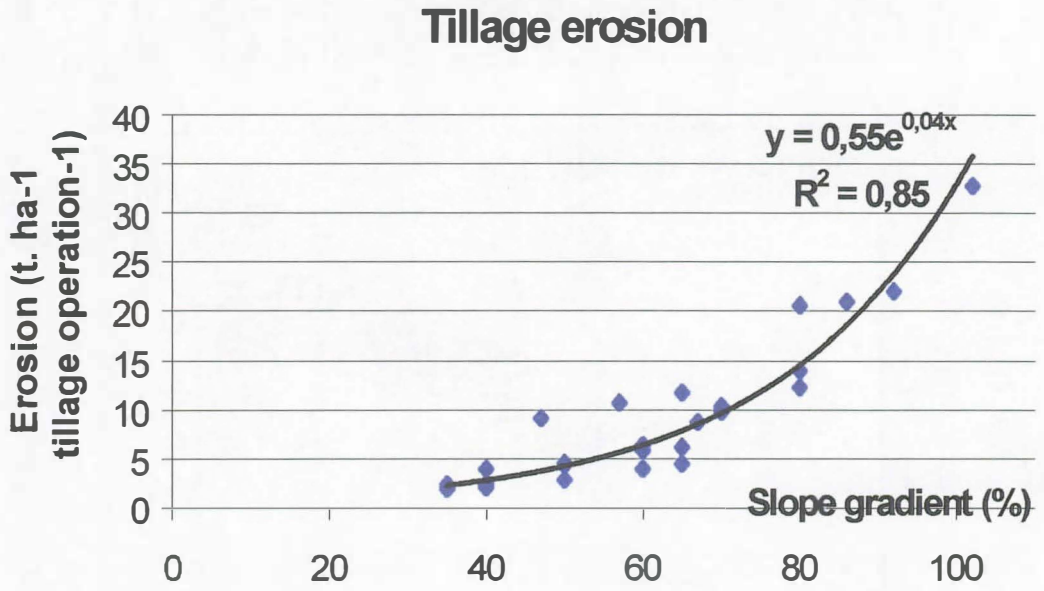
DEBIT A L'EXUTOIRE DU BASSIN VERSANT SEUIL 4 (AVRIL – SEPTEMBRE)



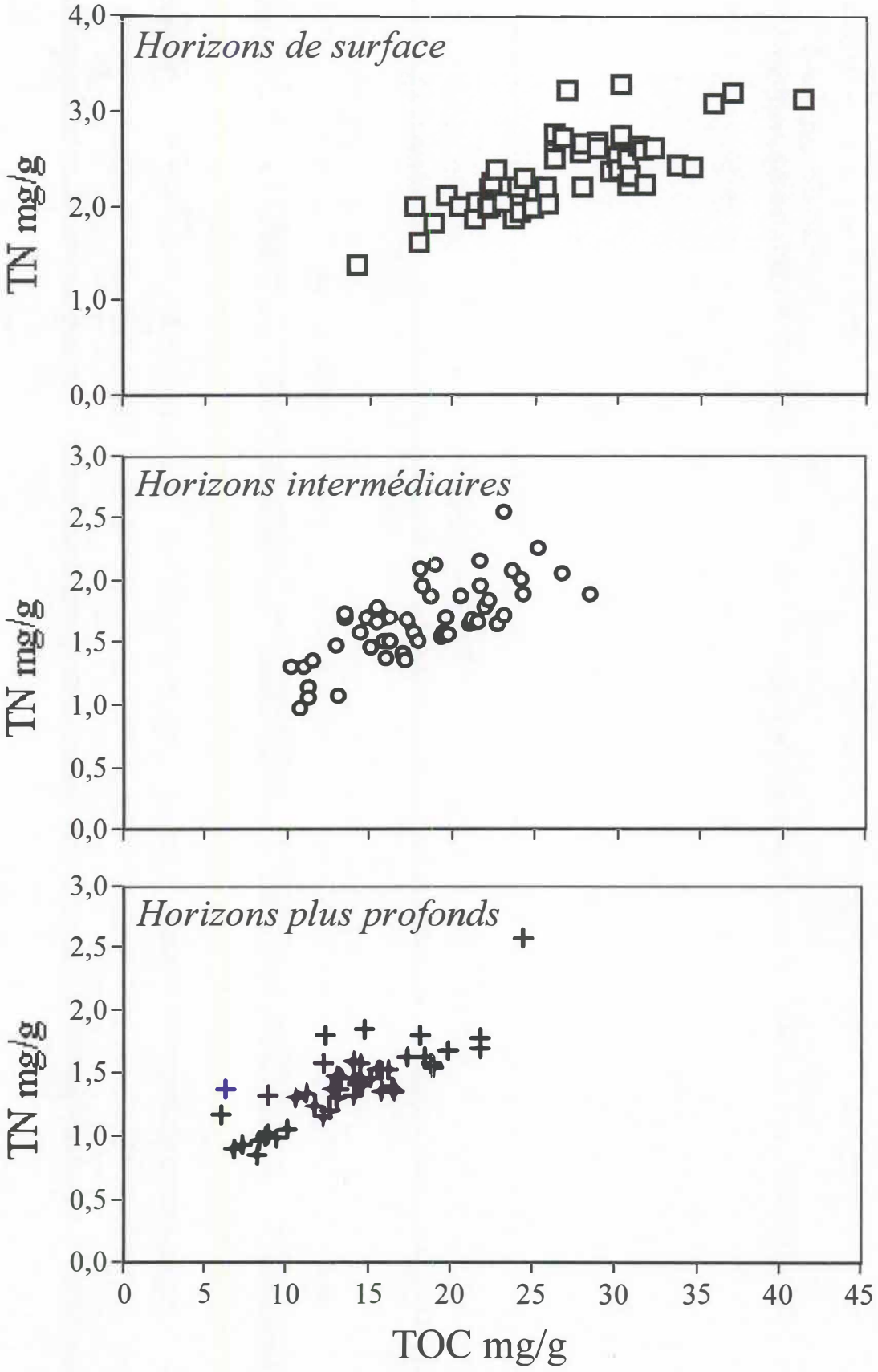
BILAN DE L'EROSION SUR LE BASSIN VERSANT (AVRIL – SEPTEMBRE 2001)

		S0	S1	S2	S3	S4	S5
Catchment area (ha)		1.2	19.6	32.8	51.4	60.2	63.0
Suspended concentration (g/l)	Min	0.124	0.116	0.069	0.035	0.035	0.034
	Max	6.786	38.605	1.000	18.471	36.854	41.500
	Mean	0.934	2.154	0.326	1.899	2.184	3.380
Suspended erosion (t)		0.240	13.860	-	82.292	114.040	125.808
Suspended erosion (t/ha)		**0.200**	**0.619**	**-**	**1.601**	**1.894**	**1.997**
Bedload erosion (t)		0.451	14.973	0.044	99.186	158.100	125.808
Bedload erosion (t/ha)		**0.375**	**0.764**	**0.001**	**1.930**	**2.626**	**1.997**

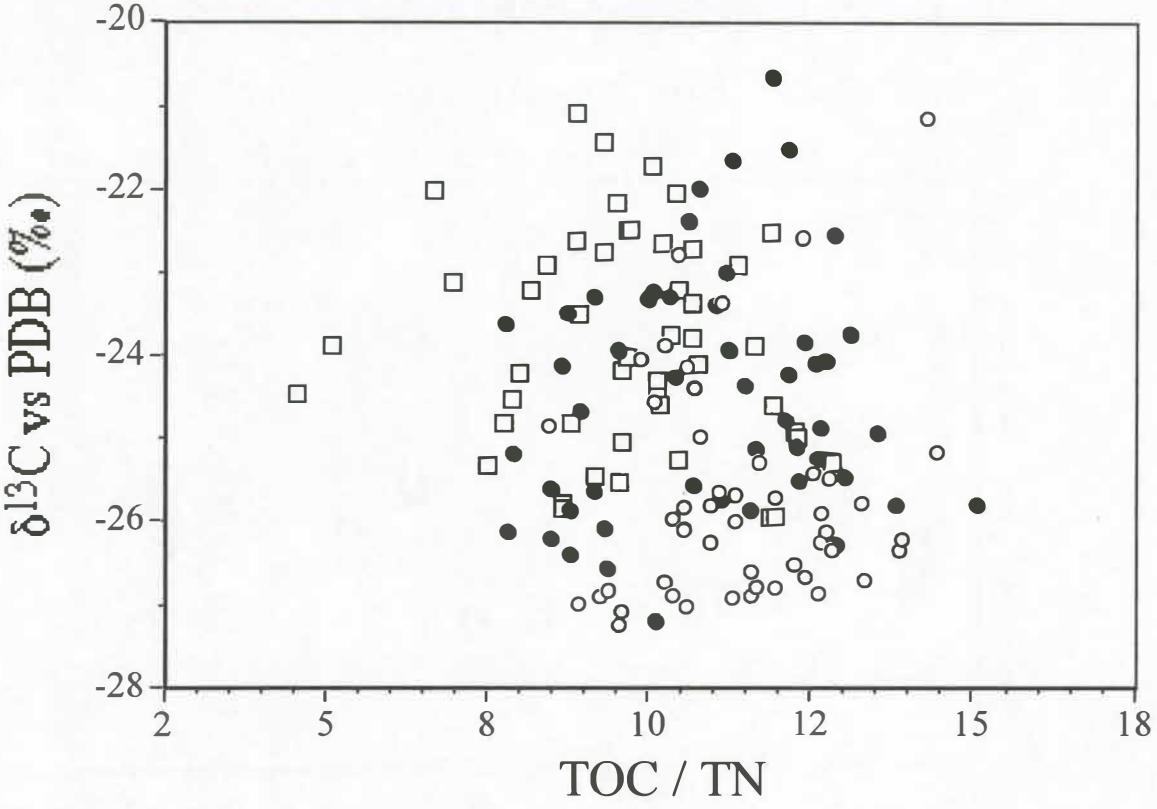
Microcatchment	Soil loss	Nutrient loss (kg)				pH_{H20}
	kg	N	P_2O_5	K_2O	OM	
S	9	0.03	0.01	0.002	0.33	7.04
S1	2124	4.74	2.03	0.983	198.71	7.39
S2	2287	5.12	2.13	0.953	213.84	7.68
S3	3868	12.51	4.37	0.921	481.59	7.41
S4	6440	16.27	6.24	1.175	712.77	7.24


Tillage erosion
Erosion (t. ha-1 tillage operation-1)
40
35
30
25
20
15
10
5
0
y = 0,55e^0,04x
R^2 = 0,85
Slope gradient (%)
0
20
40
60
80
100

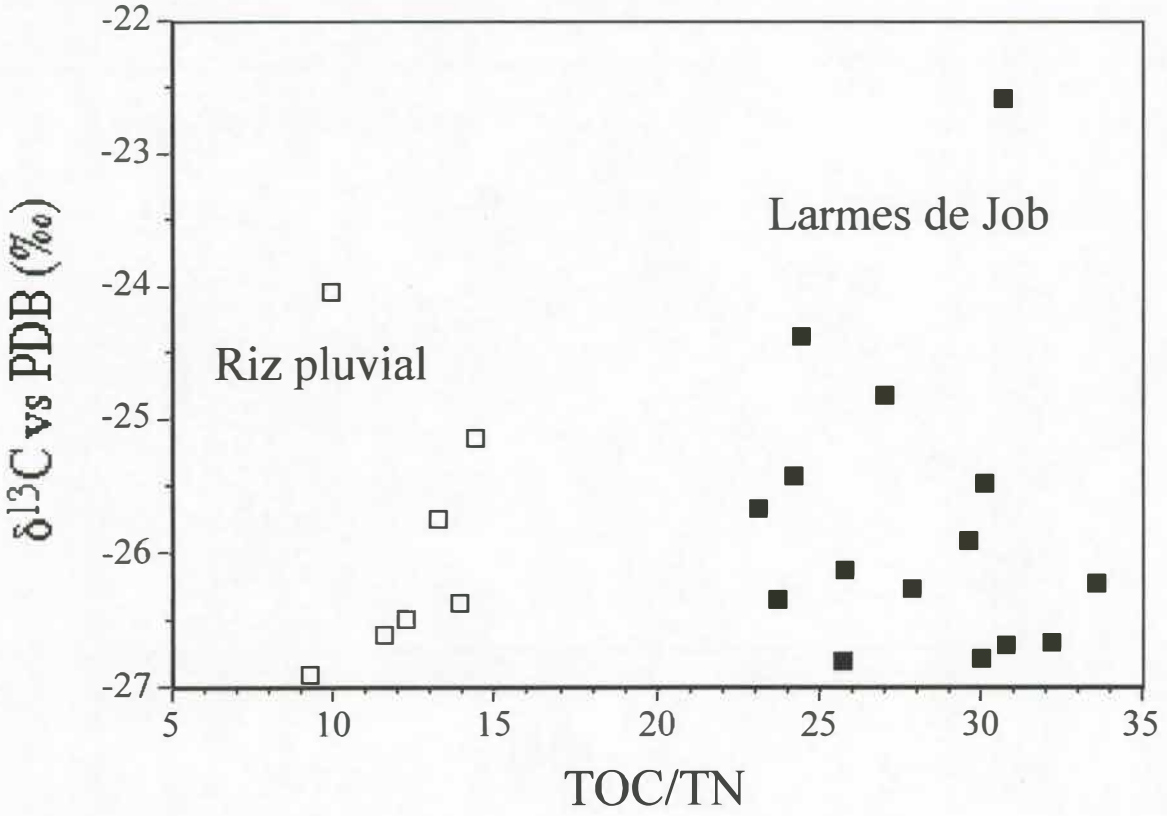
TENEURS EN CARBONE ORGANIQUE ET EN AZOTE TOTAL DES SOLS (< 50 µm)



TOUTES PROFONDEURS CONFONDUES

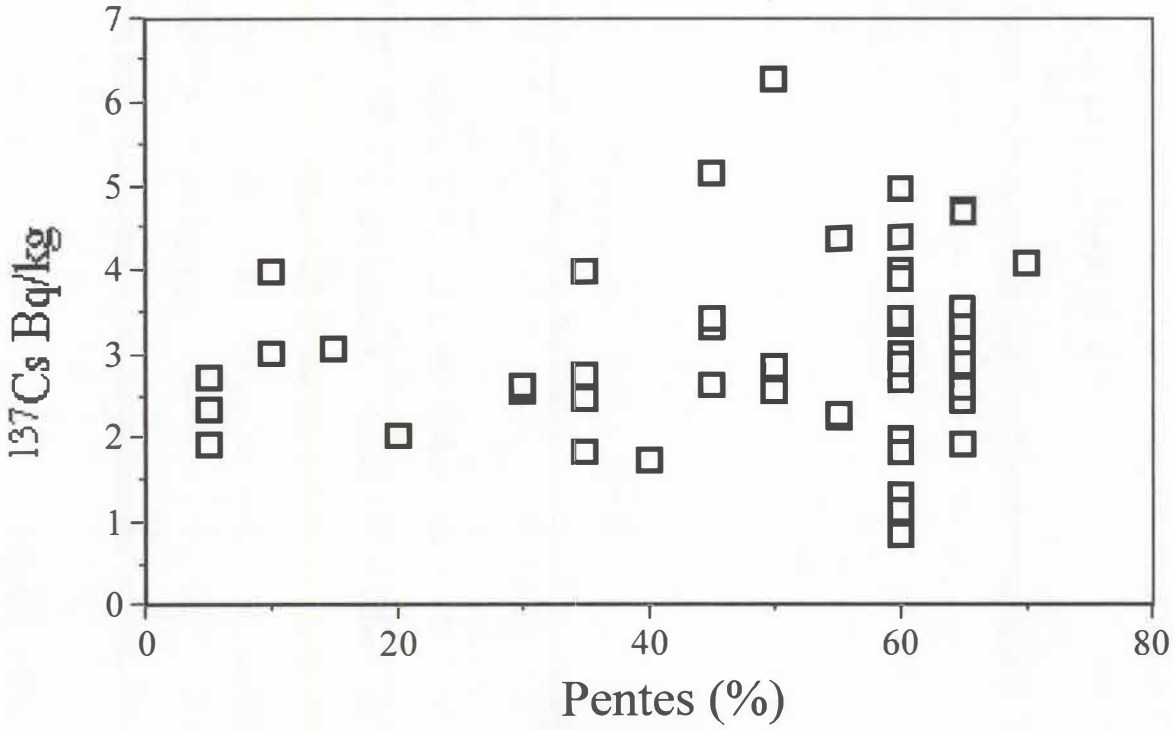


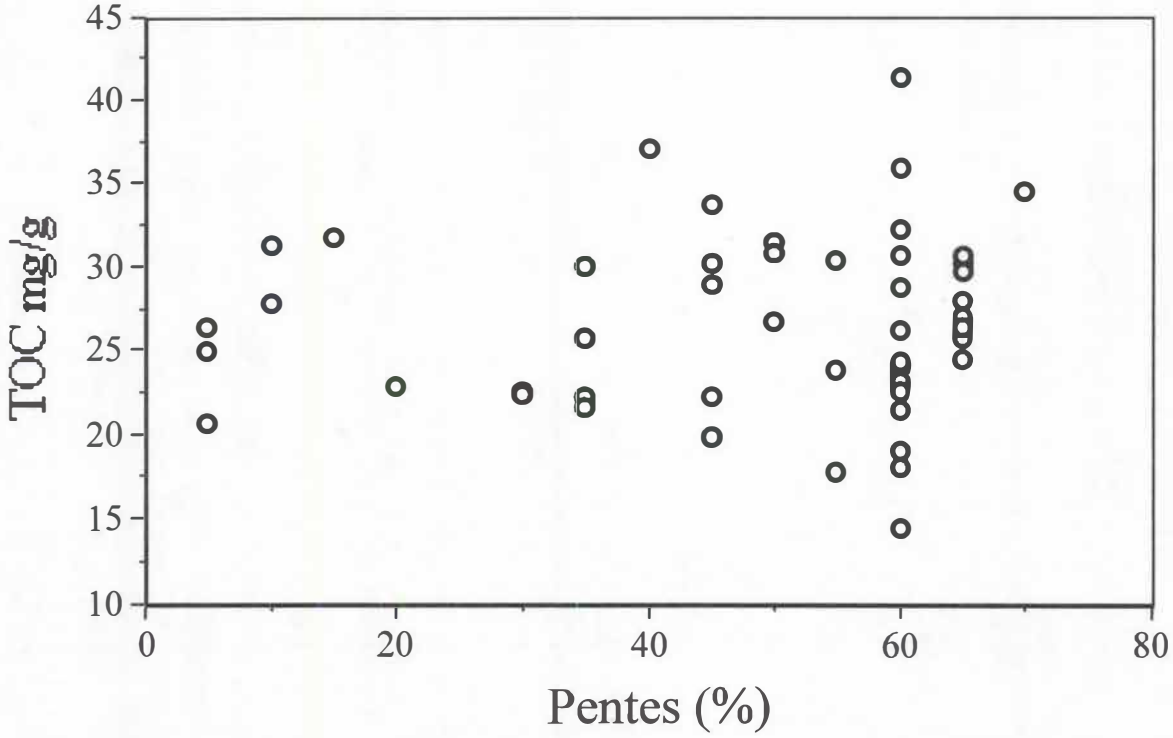
HORIZONS DE SURFACE

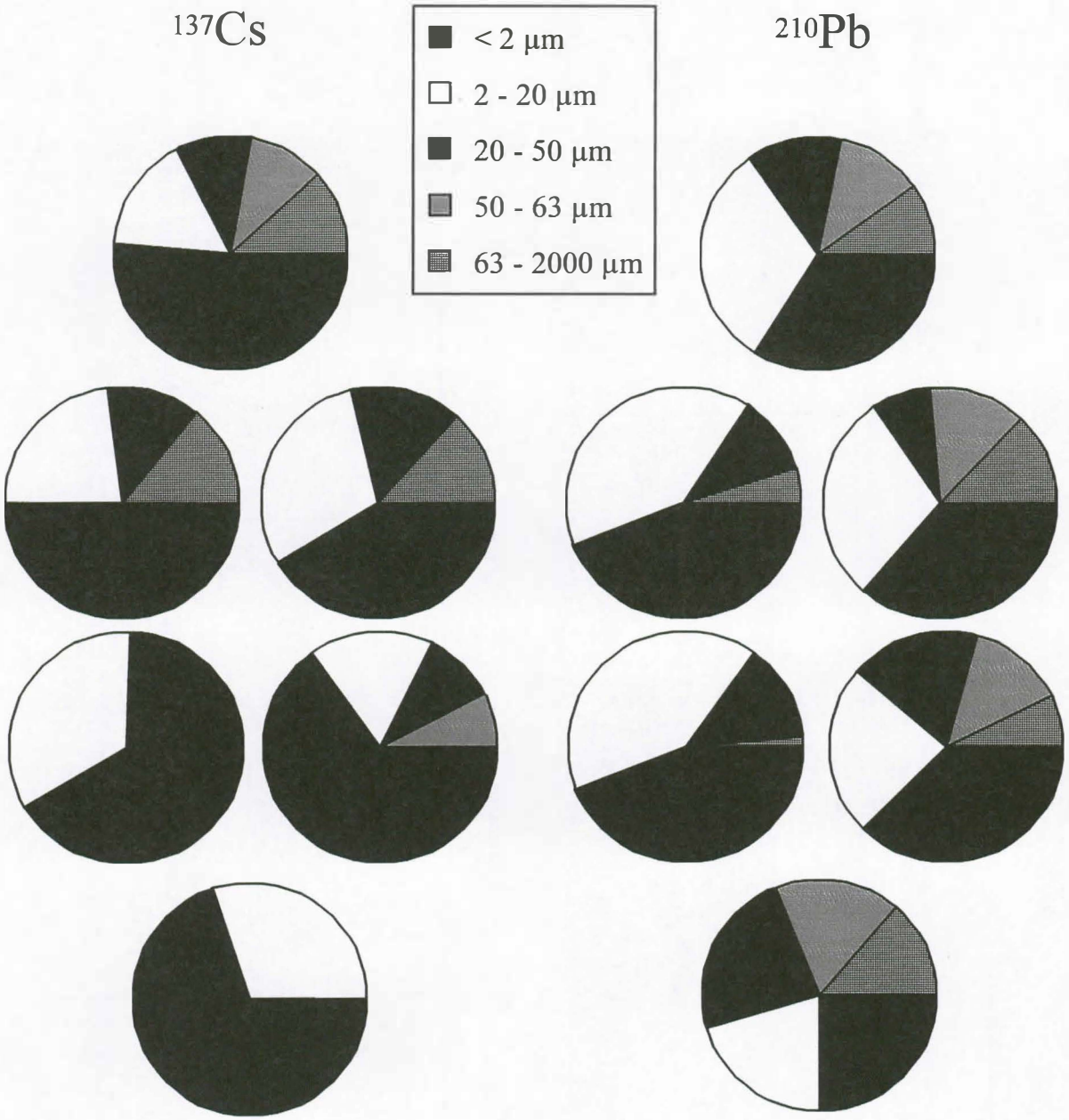


PAS DE RELATION DIRECTE ENTRE LA PENTE ET LE "NIVEAU D'EROSION"

Horizons de surface





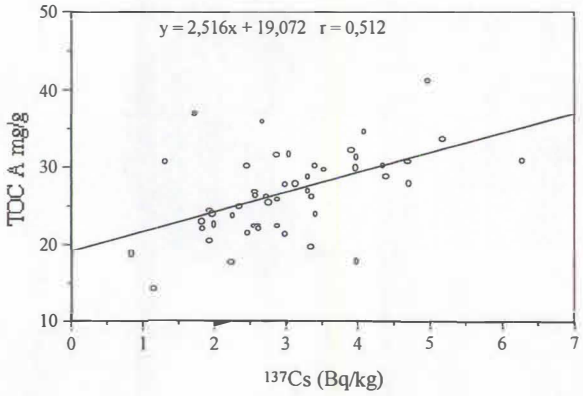


75 - 100 % de l'activité spécifique du ^{137}Cs et du ^{210}Pb se trouve dans les fractions granulométriques <50 µm

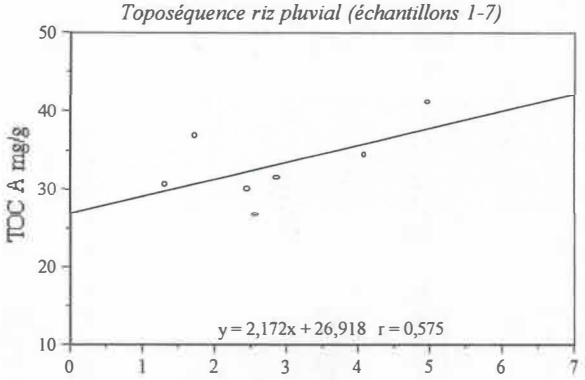
RELATION "NIVEAU D'EROSION" TENEUR CARBONE ORGANIQUE DES SOLS

Horizons de surface (A)

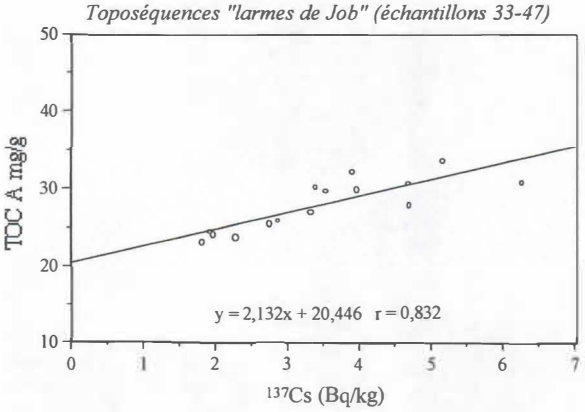
^{137}Cs échantillon total
TOC fractions <50 µm



Toposéquence riz pluvial (échantillons 1-7)



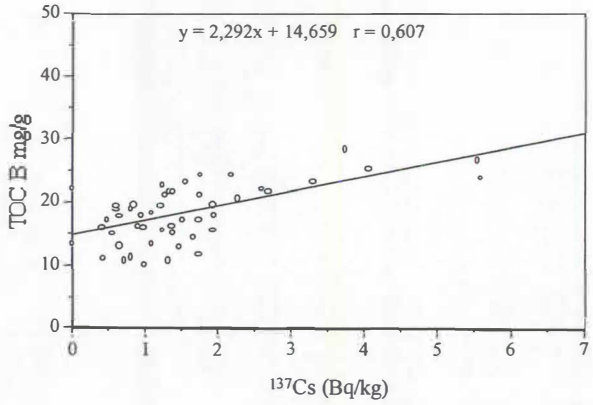
Toposéquences "larmes de Job" (échantillons 33-47)



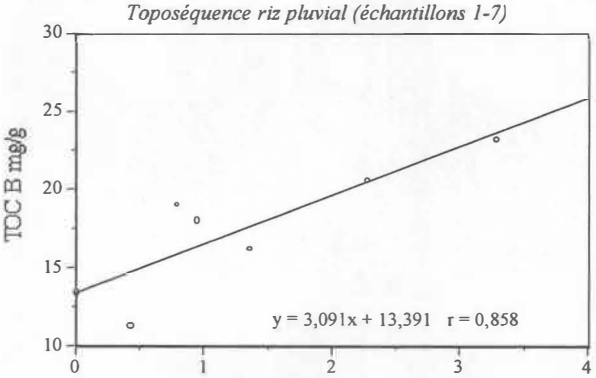
RELATION "NIVEAU D'EROSION" TENEUR CARBONE ORGANIQUE DES SOLS

Horizons intermédiaires (B)

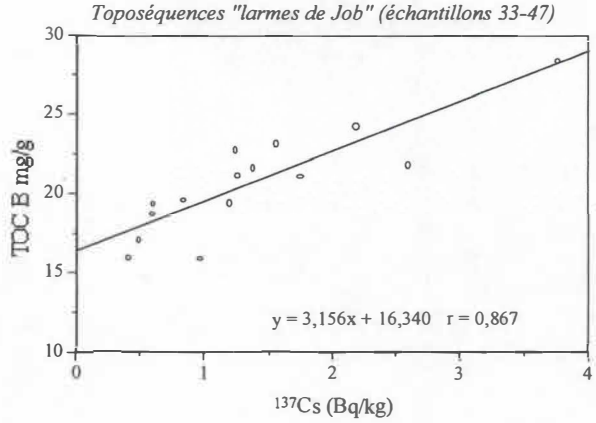
^{137}Cs échantillon total
TOC fractions <50 µm



Toposéquence riz pluvial (échantillons 1-7)



Toposéquences "larmes de Job" (échantillons 33-47)



CONCLUSIONS
(Provisoire)

Information qualitative et quantitative
(modélisation)

→ TENEUR EN M.O. DE SOLS SOUMIS A :

B. pratique de culture à rotation rapide,
C. technique de défriche-brûlis,
D. sans intrants,
E. non mécanisée

→ PROCESSUS D'EROSION

F. infiltration / ruissellement
G. encroûtement des sols

→ IMPACT DE L'EROSION HYDRIQUE ET ARATOIRE SUR LES SOLS:

H. à long terme (depuis années 1960)
I. à court terme (échelles saisonnière, crues)

→ RELATIONS: NIVEAU D'EROSION, PRATIQUE CULTURALE ET STABILITE DES SOLS

- à des fins de meilleure gestion des ressources agricoles

EXPOSES METHODOLOGIQUES

MESURES DES STOCKS ET DES VARIATIONS DE STOCKS DE CARBONE DANS LES SOLS

D. ARROUAYS

Mesures des stocks et des variations de stocks de carbone dans les sols

Dominique Arrouays,
Claudy Jolivet,
Fabien Bourhis

Unité Infosol - INRA Orléans

Pourquoi ?

(Mesurer des stocks et des variations de stocks de carbone dans les sols)

Pour réaliser un suivi in situ destiné à analyser un processus ?

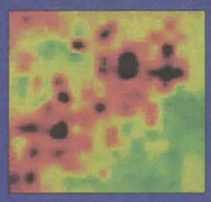
Pour analyser a posteriori l'effet de changements d'usage ou de pratique ?

Pour se doter d'un outil de bilan statistique national ?

Comment ?

Caracteriser (et utiliser la) ou se debarrasser de la)

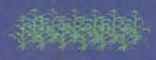
la variabilite spatiale et ses determinants



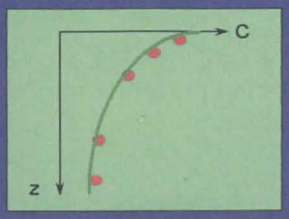
Pour

analyser la dynamique du carbone organique
sous l'effet de changements d'usage ou de pratiques

?



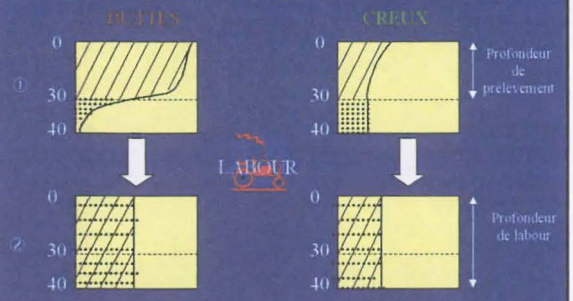
Prendre en compte la variabilite verticale

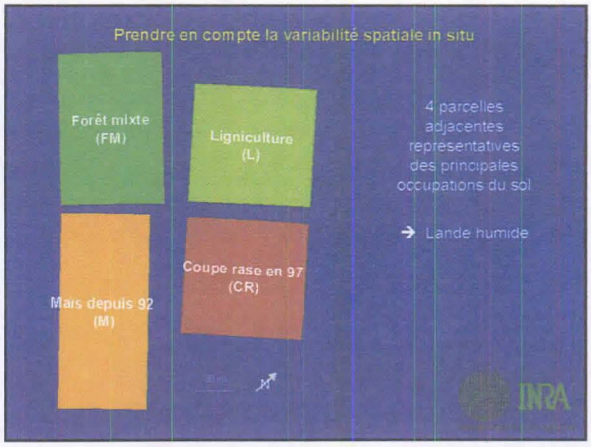


Caracteriser et modéliser les profils de carbone
(Arrouays et Pelissier 1994; Jeanneau et al. 1995; Arrouays et al. 1995)

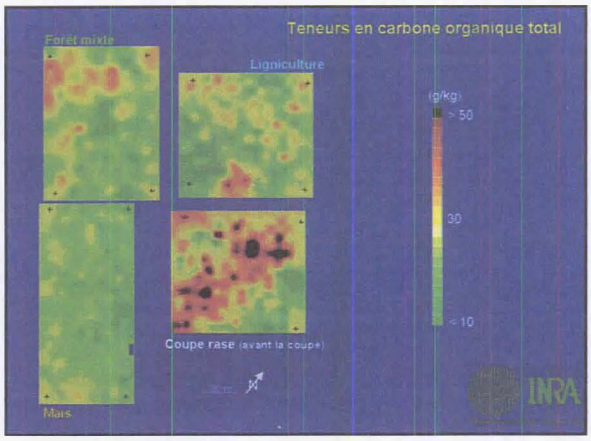
Raisonner à masse minérale équivalente
(Ellert et Bettany 1995)

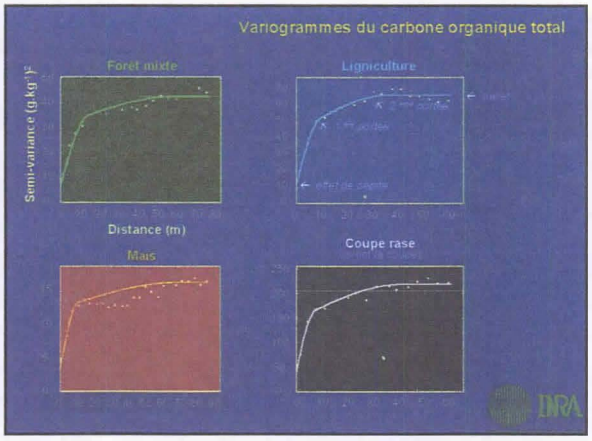
Ex. du phénomène de dilution par le labour

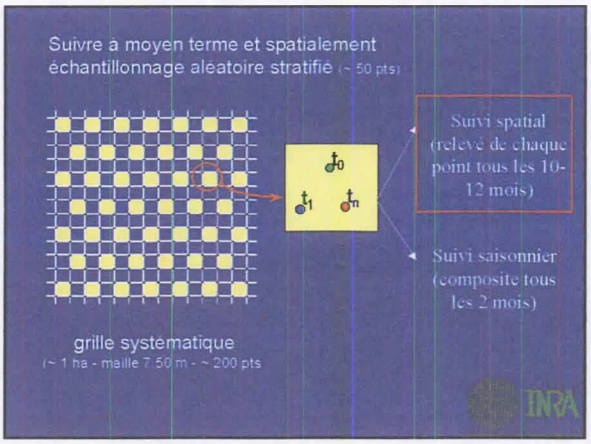


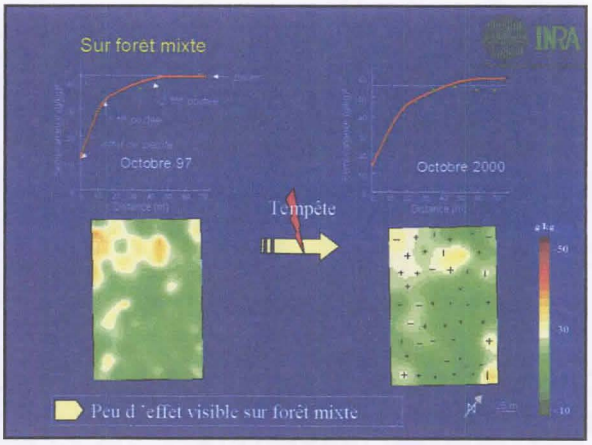

Prendre en compte la variabilité spatiale in situ
Forêt mixte (FM)
Ligniculture (L)
Maïs depuis 92 (M)
Coupe rase en 97 (CR)
4 parcelles adjacentes représentatives des principales occupations du sol
→ Lande humide
INRA

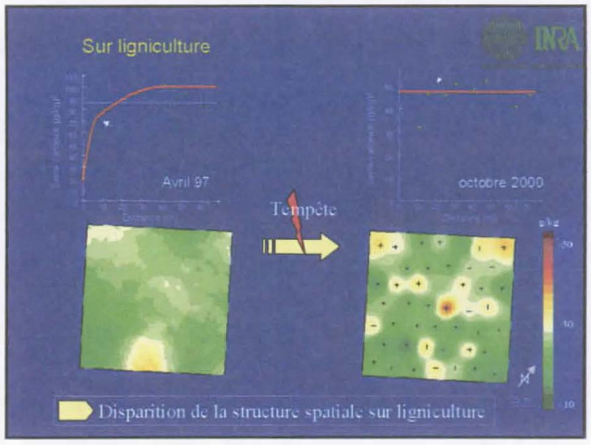
Plan d'échantillonnage
1- échantillonnage systématique
→ suivi in situ sur un pas de temps court (monitoring)
grille systématique
(~ 1 ha - maille 7.50 m - ~ 200 pts
→ Méthode lourde : 1 seule date, 97
INRA

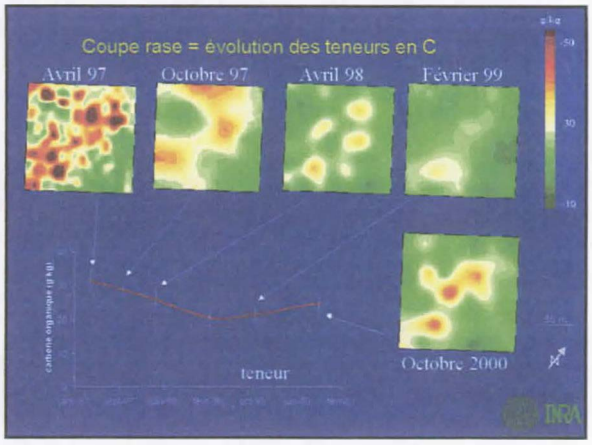

Teneurs en carbone organique total
Forêt mixte
Ligniculture
Coupe rase (avant la coupe)
Maïs
(g/kg)
> 50
30
< 10
INRA

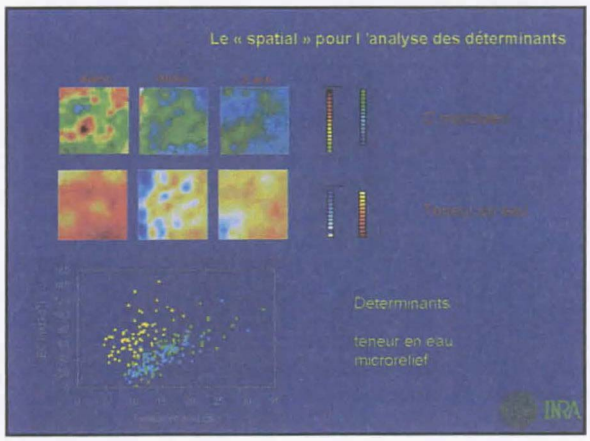

Variogrammes du carbone organique total
Forêt mixte
Ligniculture
Semi-variance (g.kg⁻¹)²
Distance (m)
Maïs
Coupe rase
INRA

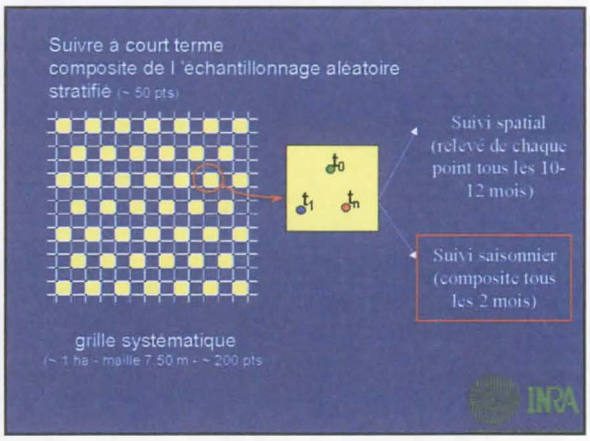

Suivre à moyen terme et spatialement échantillonnage aléatoire stratifié (~ 50 pts)
Suivi spatial (relevé de chaque point tous les 10-12 mois)
Suivi saisonnier (composite tous les 2 mois)
grille systématique
(~ 1 ha - maille 7.50 m - ~ 200 pts
INRA

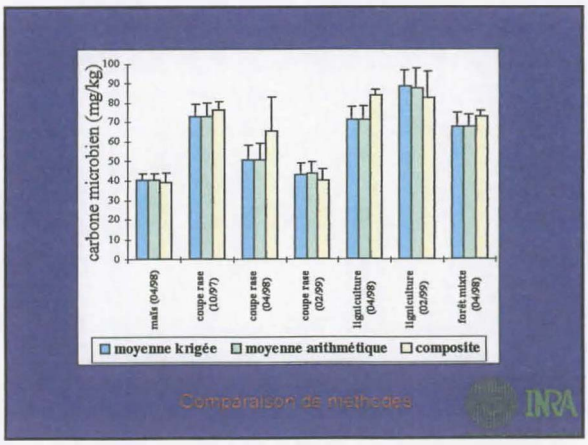

Sur forêt mixte
Octobre 97
Octobre 2000
Tempête
Peu d'effet visible sur forêt mixte
INRA

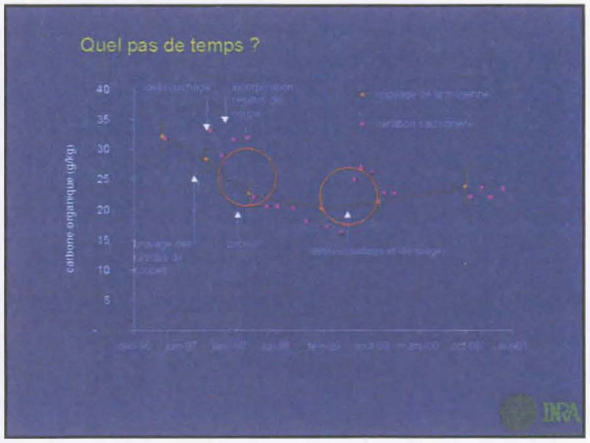

Sur ligniculture
Avril 97
octobre 2000
Tempête
Disparition de la structure spatiale sur ligniculture

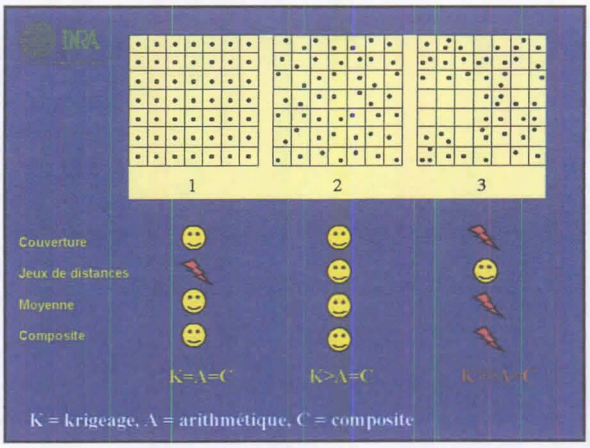

Coupe rase = évolution des teneurs en C
Avril 97
Octobre 97
Avril 98
Février 99
teneur
Octobre 2000

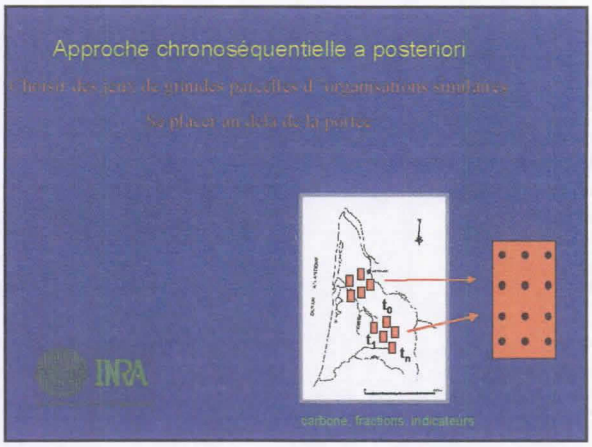

Le « spatial » pour l 'analyse des déterminants
Determinants
teneur en eau
microrelief

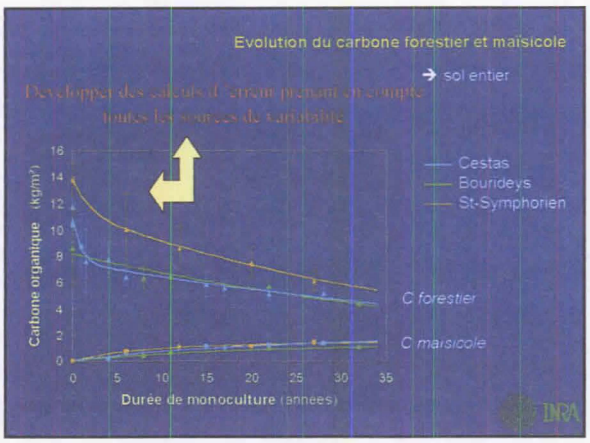

Suivre à court terme
composite de l 'échantillonnage aléatoire
stratifié (~ 50 pts)
Suivi spatial
(relevé de chaque point tous les 10-12 mois)
Suivi saisonnier
(composite tous les 2 mois)
grille systématique
(~ 1 ha - maille 7.50 m - ~ 200 pts

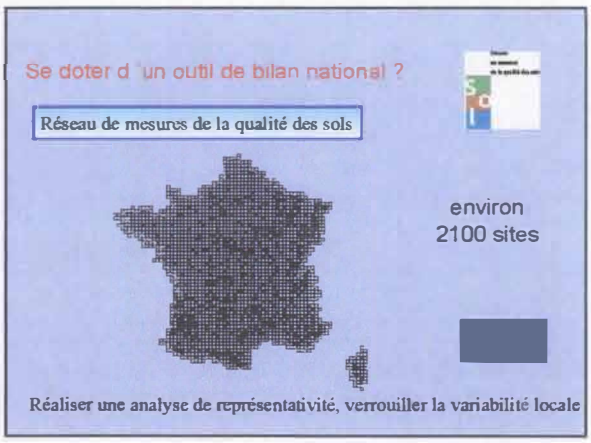

carbone microbien (mg/kg)
maïs (04/98)
coupe rase (10/97)
coupe rase (04/98)
coupe rase (02/99)
ligniculture (04/98)
ligniculture (02/99)
forêt mixte (04/98)
moyenne krigée
moyenne arithmétique
composite
Comparaison de méthodes

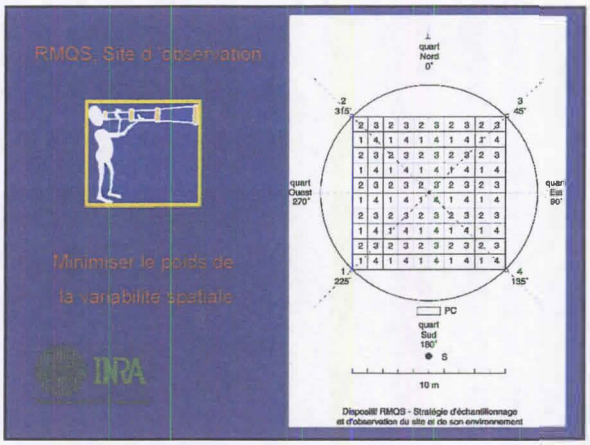

Quel pas de temps ?
carbone organique (g/kg)

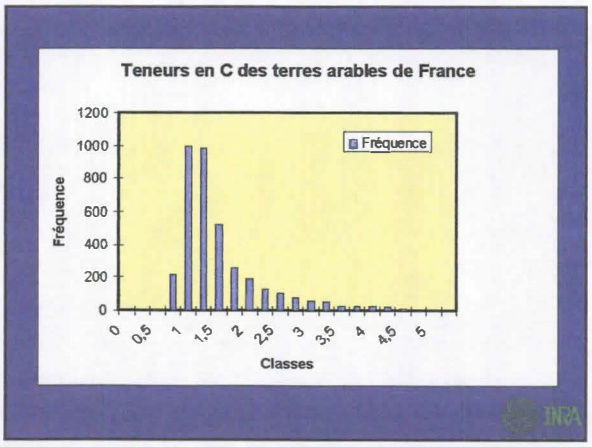

1
2
3
Couverture
Jeux de distances
Moyenne
Composite
K=A=C
K>A=C
K=A=C
K = krigeage, A = arithmétique, C = composite

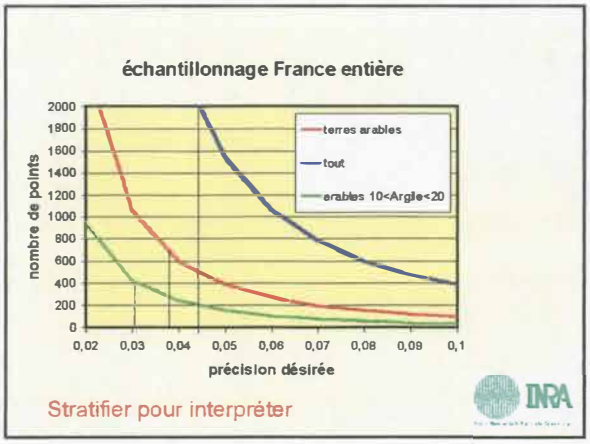

Approche chronoséquentielle a posteriori
Choisir des jeux de grandes parcelles d'organisations similaires
Se placer au-delà de la portée
carbone, fractions, indicateurs


Evolution du carbone forestier et maïsicole
sol entier
Développer des calculs d'erreur prenant en compte toutes les sources de variabilité
Carbone organique (kg/m²)
Cestas
Bourideys
St-Symphorien
C forestier
C maïsicole
Durée de monoculture (années)


Se doter d'un outil de bilan national ?
Réseau de mesures de la qualité des sols
environ
2100 sites
Réaliser une analyse de représentativité, verrouiller la variabilité locale


RMQS, Site d'observation
Minimiser le poids de la variabilité spatiale
quart Nord 0°
quart Ouest 270°
quart Est 90°
quart Sud 180°
PC
S
10 m
Dispositif RMQS - Stratégie d'échantillonnage et d'observation du site et de son environnement


Teneurs en C des terres arables de France
Fréquence
Classes



Conclusion - Quelles stratégies ?

Pour le cas de type « site-atelier »

analyser et prendre en compte la variabilité spatiale, se donner les moyens de faire des analyses spatio-temporelles, raisonner les composites

Pour le cas « grandes séries » possédant

analyser pour « se débarrasser de la » variabilité spatiale, raisonner les composites

Etats intermédiaires

Réduire les surfaces et apparier au plus près pour éliminer la variabilité intra-site, stratifier la population pour les analyses statistiques, utiliser des données « externes » pour la spatialisation

CARTES DE LA VEGETATION DU BRESIL

V. ESCHENBRENNER

Stocks de carbone des sols

- Estimation et spatialisation
- Estimation des variations

Vincent Eschenbrenner et Martial Bernoux

cena — Centro de Energia Nuclear na Agricultura

IRD

Estimation et spatialisation

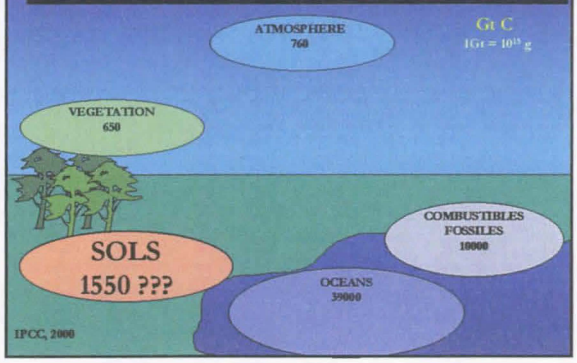
Stocks mondiaux

Estimation des stocks (0-100 cm) Batjes (1996) et WRI (2000)

Stocks nationaux

Stocks locaux

Stocks de carbone



Carte mondiale des sols de la FAO/UNESCO (1981)
Échelle: 1:5 000 000
26 Ordres - 106 types de sols

Base de données WISE (Batjes, 1995):
4 353 profils (19 222 horizons)

Carbone: 86%
Densité apparente: 31%

Densité d'échantillonnage = 4 353 / 130 000 000 km²
soit 1 profil pour 29 865 km²
soit 18 profils pour la France

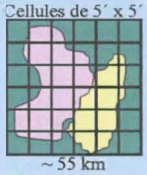
Cellules de 30' x 30'

~ 55 km

→ 1 548 Gt C (0- 100 cm)
Batjes (1996)

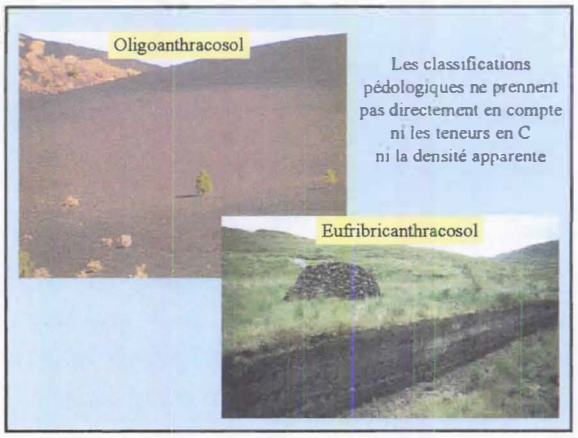
Exemple concret de Pseudo-Validation
pas de données « sols » complémentaires

Cellules de 5' x 5'



~ 55 km

→ 1 555 Gt C (0-100 cm)
WRI (2000)



Les classifications pédologiques ne prennent pas directement en compte ni les teneurs en C ni la densité apparente

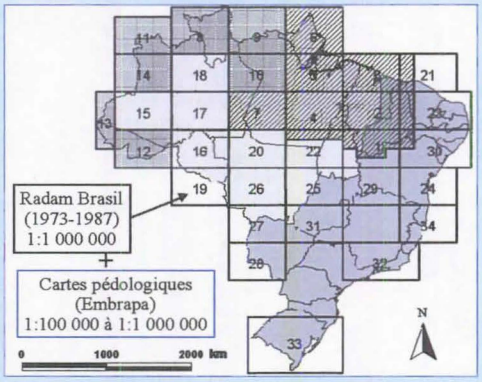
Estimation et spatialisation

Stocks mondiaux

Stocks nationaux

Estimation des stocks (0-30 cm) dans les sols du Brésil
Bernoux et al. (2001)

Stocks locaux



Carte des sols du Brésil (Embrapa, 1981 – échelle 1:5 000 000)

2 698 unités cartographiques
69 sous-ordres

Carte des sols du Brésil (Embrapa, 1981 – échelle 1:5 000 000)

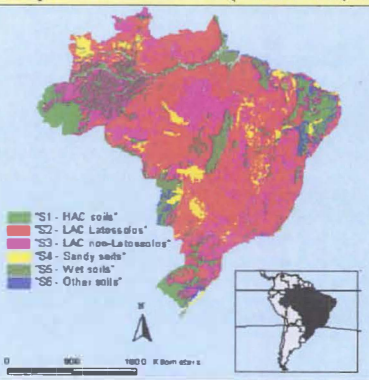
2 698 unités cartographiques
69 sous-ordres

↓

6 catégories

Carte simplifiée des sols du Brésil (Bernoux et al., 2001)

Carte simplifiée des sols du Brésil (Bernoux et al., 2001)



Carte de la végétation du Brésil (IBGE, 1988 – échelle 1:5 000 000)

2 021 unités cartographiques
94 sous-classes

Carte de la végétation du Brésil (IBGE, 1988 – échelle 1:5 000 000)

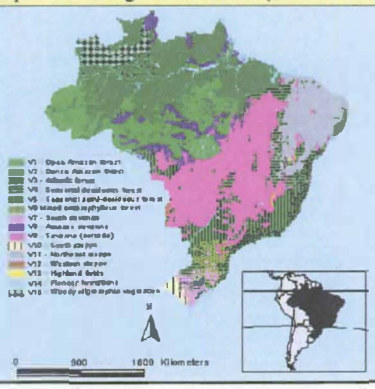
2 022 unités cartographiques
94 sous-classes

↓

15 catégories

Carte simplifiée de la végétation du Brésil (Bernoux et al., 2001)

Carte simplifiée de la végétation du Brésil (Bernoux et al., 2001)



Catégories de végétations

- V1 - Open Amazon forest
- V2 - Dense Amazon forest
- V3 - Atlantic forest
- V4 - Seasonal deciduous forest
- V5 - Seasonal semi-deciduous forest
- V6 Mixed ombrophyllous forest
- V7 - South savanna
- V8 - Amazon savanna
- V9 - Savanna (cerrado)
- V10 - South steppe
- V11 - Northeast steppe
- V12 - Western steppe
- V13 - Highland fields
- V14 - Pioneer formations
- V15 - Woody oligotrophic vegetation

Catégories de sols

- "S1 - HAC soils"
- "S2 - LAC Latossolos"
- "S3 - LAC non-Latossolos"
- "S4 - Sandy soils"
- "S5 - Wet soils"
- "S6 - Other soils"

15 x 6 = 90 Associations sol-végétation potentielles

Carte des associations sol-végétation (Bernoux et al., 2001)

Base de données "sols"

Total 2 694 profils avec au moins données C dans 30 premiers cm et type de végétation

(5 585 horizons)

RadamBrasil
Embrapa soil survey
other...

Densité d'échantillonnage
= 2694 / 8 500 000 km²
soit 1 profil pour 3 155 km²
soit 177 profils pour la France

Estimation et spatialisation

Stocks mondiaux

Stocks nationaux

Stocks locaux

Fazenda Nova Vida (Rondônia)

Estimation et spatialisation

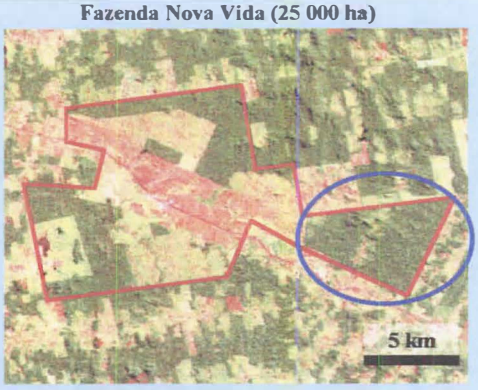
Deux écoles...

Densités d'échantillonnage:

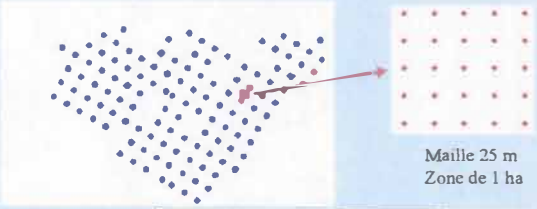
Mondial = 1 profil pour 30 000 km²
National = 1 profil pour 3 000 km²
Local = 1 profil pour 30 km² ?

Grille d'échantillonnage adaptée aux situations
Approches géostatistiques

Fazenda Nova Vida (25 000 ha)



Carbone et densité apparente (0-10 cm)

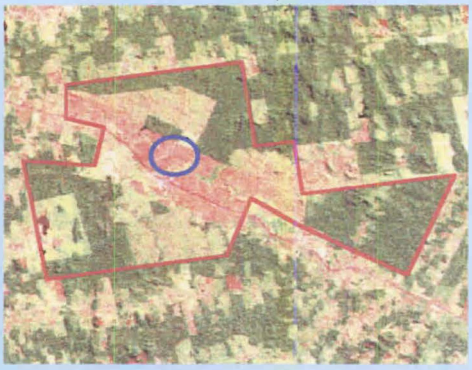


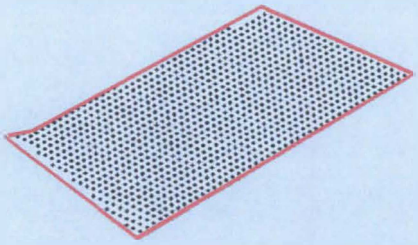
Maille 25 m
Zone de 1 ha

Maille 500 m
Zone de 3 600 ha

	C	Da	Stock	Stock
	%	g/cm³	kg.m⁻²	kg.m⁻²
Min	0,29	0,81	0,43	1,28
Max	4,10	1,88	4,95	4,21
Moyenne	1,23	1,32	1,53	2,53
Médiane	1,02	1,31	1,38	2,47
CV%	60%	16%	50%	27%

Fazenda Nova Vida (25 000 ha)





Parcelle de 65 ha de pâturage

Échantillonnage: maille de 25 m (984 points)
0-10;10-20 et 20-30 cm

Estimation des densités apparentes

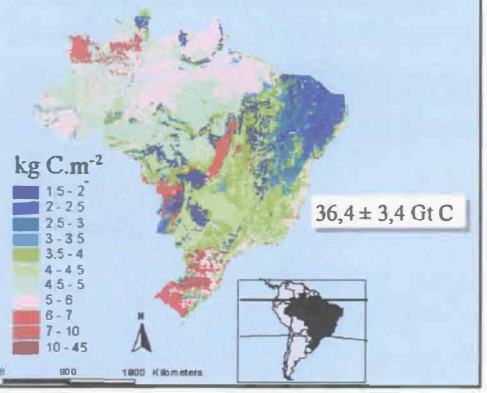
Travaux sur sols amazoniens (Bernoux et al., 1998)
Fonctions de pédotransfert Da = f (argile%, C%)

- Pour tous les horizons « sableux » (argile ≤ 20%):
  Da = 0,0181 (100 – argile% – 5) – 0,08 C%

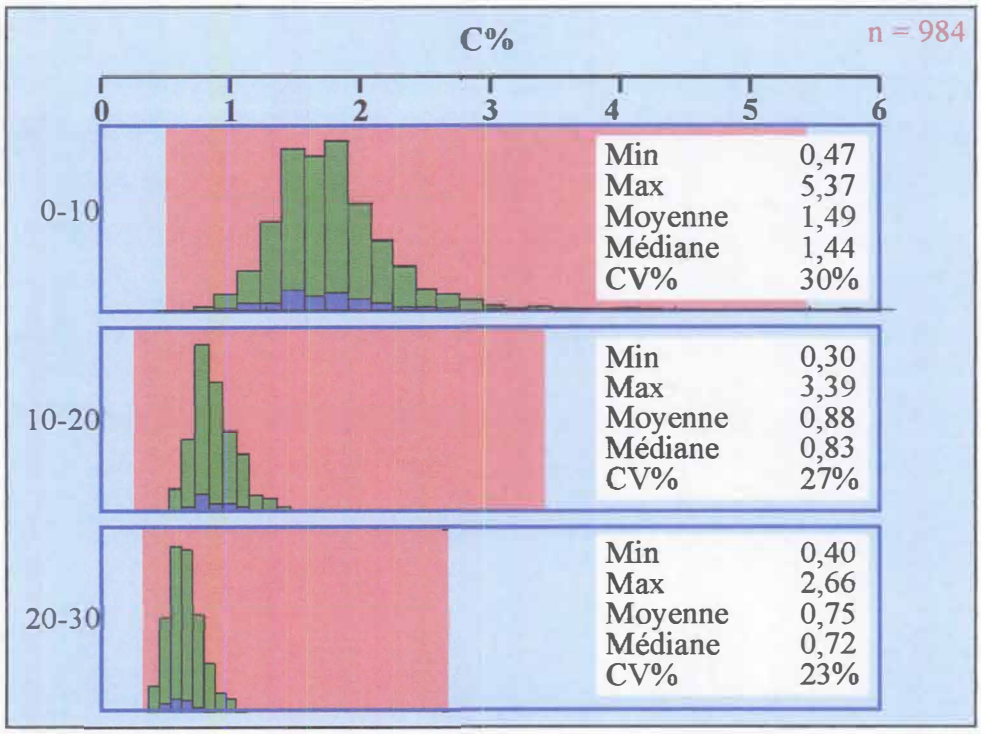
- Pour les autres horizons (argile > 20%), selon la catégorie de sol:
  S2:
  Da = 1,404 – 0,0040 argile% – 0,048 C%
  S1 et S3:
  Da = 1,394 – 0,0051 argile% – 0,037 C%
  S5 et S6:
  Da = 1,369 – 0,0042 argile% – 0,040 C%

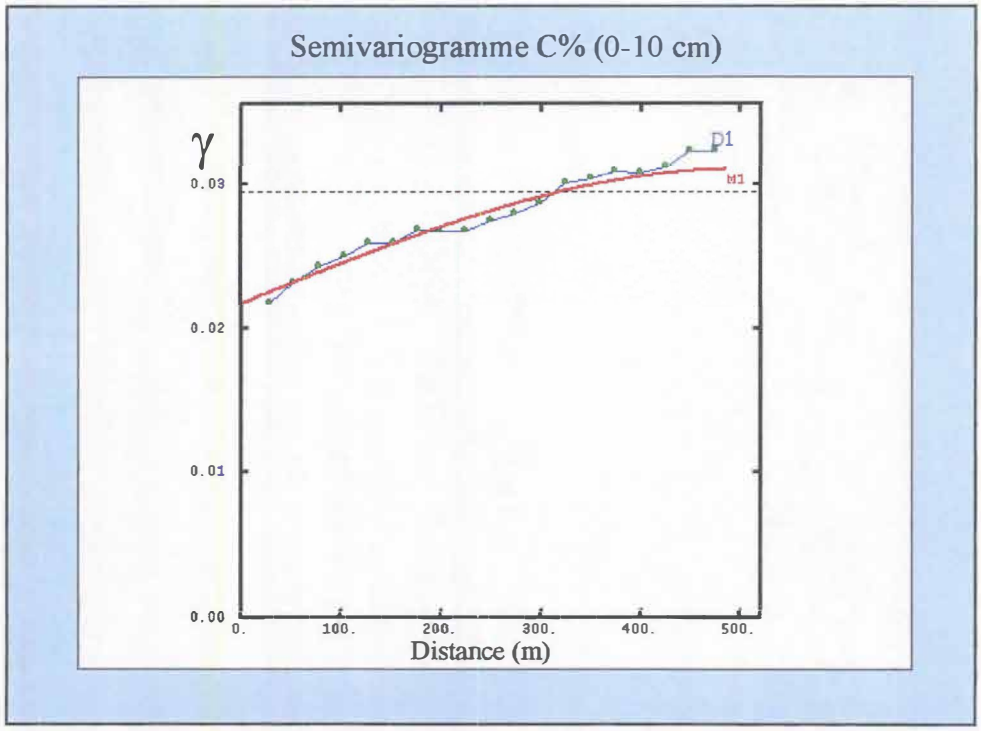
"S1 - HAC soils"
"S2 - LAC Latossolos"
"S3 - LAC non-Latossolos"
"S4 - Sandy soils"
"S5 - Wet soils"
"S6 - Other soils"

Estimation des stocks (0-30 cm) dans les sols du Brésil

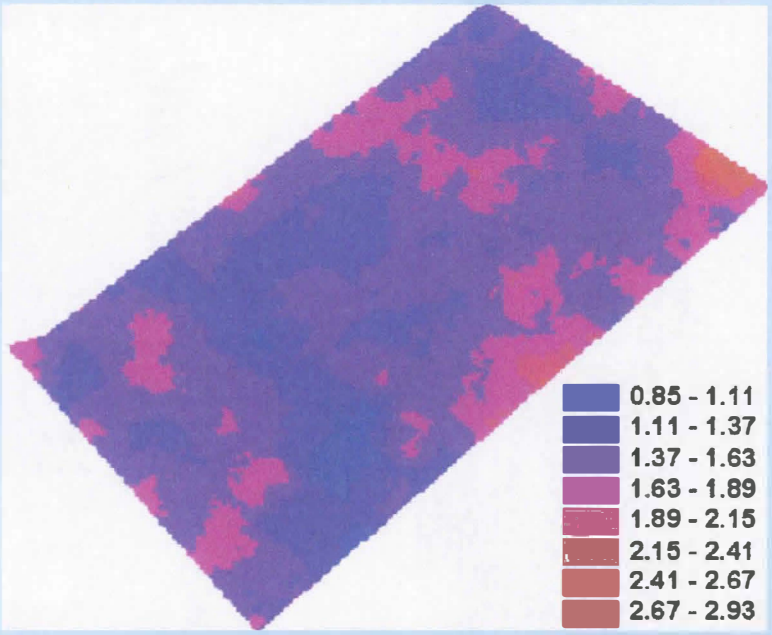


36,4 ± 3,4 Gt C

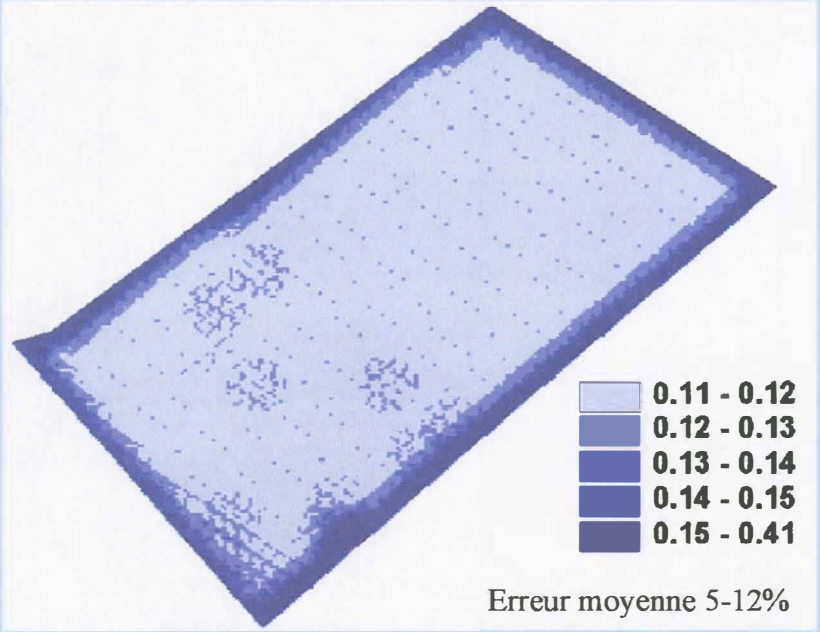

C%
n = 984
0
1
2
3
4
5
6
0-10
Min 0,47
Max 5,37
Moyenne 1,49
Médiane 1,44
CV% 30%
10-20
Min 0,30
Max 3,39
Moyenne 0,88
Médiane 0,83
CV% 27%
20-30
Min 0,40
Max 2,66
Moyenne 0,75
Médiane 0,72
CV% 23%


Semivariogramme C% (0-10 cm)
γ
0.03
0.02
0.01
0.00
D1
M1
0.
100.
200.
300.
400.
500.
Distance (m)

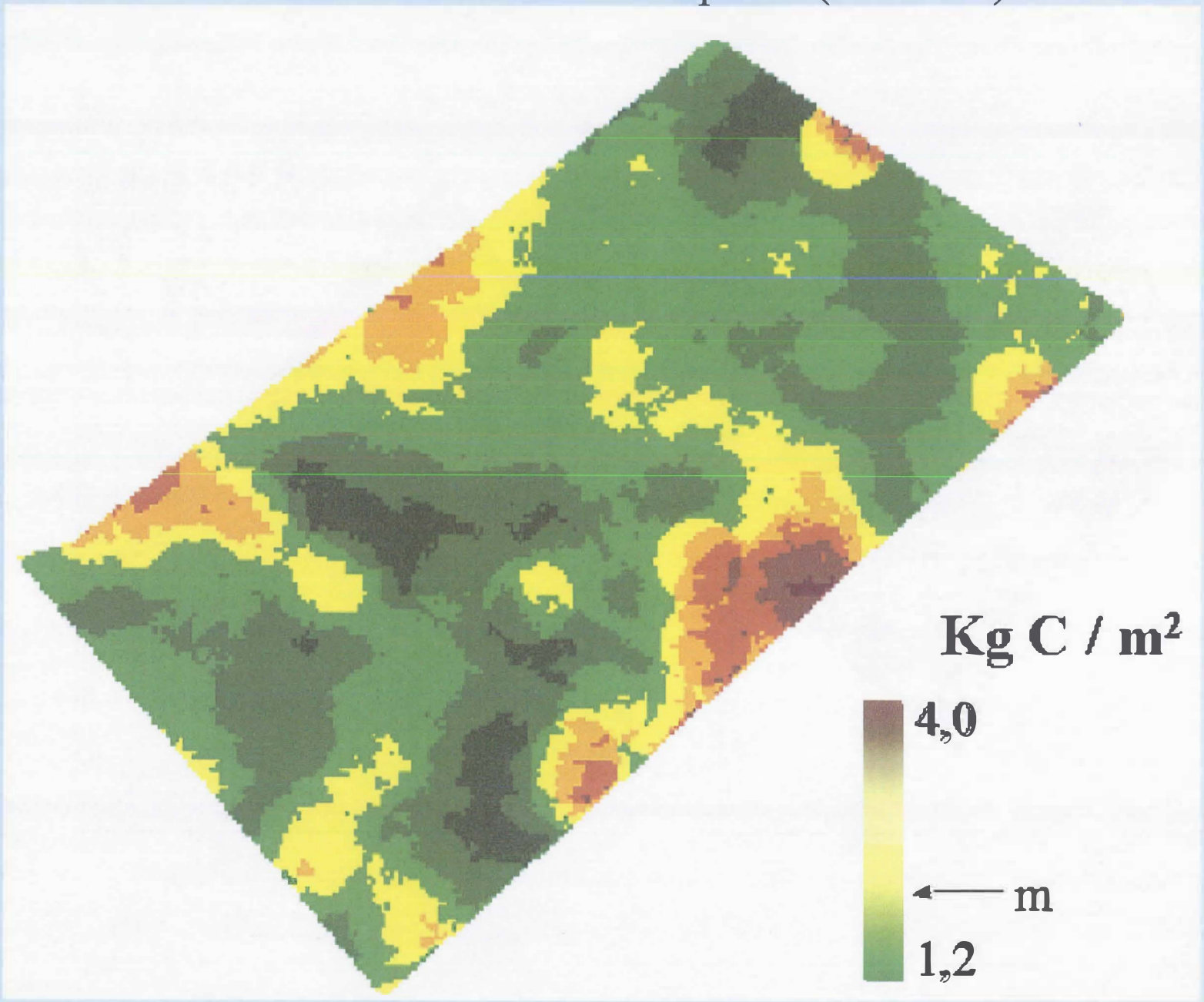
Carte du C% interpolé (0-10 cm)



Carte des erreurs C% d´interpolation (0-10 cm)



Carte des stocks interpolés (0-10 cm)



Estimation des variations

Stocks mondiaux

Estimation des variations

Stocks mondiaux

Stocks nationaux

Estimations basées sur des changements d'usages des terres (inventaires et/ou modélisation)

Estimation des variations

Stocks mondiaux

Stocks nationaux

Stocks locaux

Estimation des variations à l'échelle locale

Difficultés

- Stocks C $\cdot \Delta C$

Variabilité spatiale
C% et Da

- Stocks C $\cdot \Delta C$

Sá (2001) – Paraná – Chrono-séquences de semis direct (22 ans)

Taux de séquestration C (0-40 cm)
100 g C/ m²/an

Stock C (0-40 cm)
10 kg C/ m²

Δ Stocks C (0-40 cm)
1 % /an

Variabilité spatiale
C% et Da

Maille 25 m
Zone de 1 ha
0-10 cm

Stock: 2,53 ± 0,68 kg.m^{-2}
(CV =27%)

Pour détecter une variation (Δ=0.05) des stocks de 1% :
5 500 échantillons !

Maille 5 m
Zone de 25 m²

Stock: 0,55 ± 0,126 kg.m^{-2}
(CV =23%)

Taux de séquestration annuel (0-40 cm)
100 g C / m² / an

Taux de séquestration annuel (0-5 cm)
80 g C / m² / an

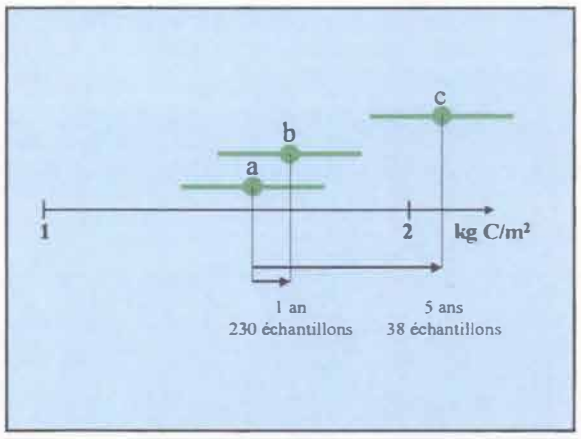
Stock C (0-5 cm)
1,76 kg C / m²

↓

Δ Stock C (0-5 cm)
4,5%

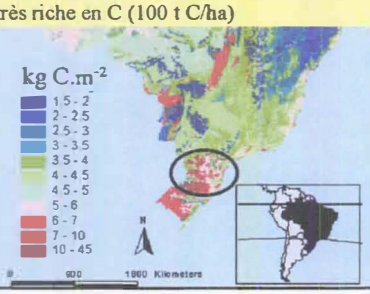
Densité d'échantillonnage passe à 230

Si on attend 5 ans: 38 échantillons



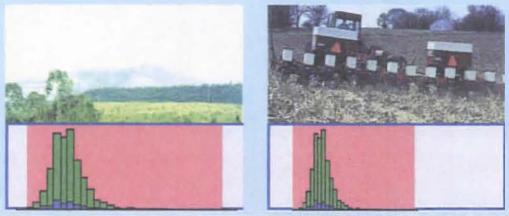
3 raisons d'être optimiste…

Paraná
- subtropical (*temp min moy hiver 8-9 °C*)
- sol très riche en C (100 t C/ha)

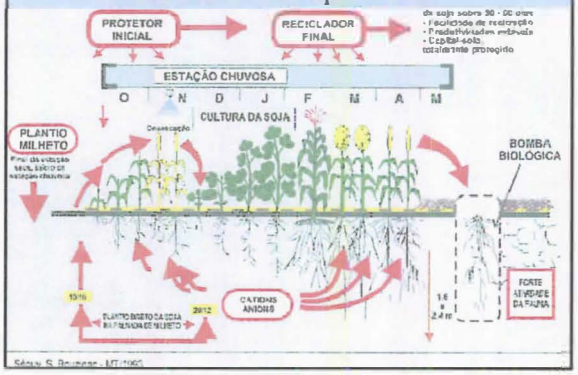


3 raisons d'être optimiste…

Variabilité
- option systèmes naturels ou peu perturbés (*CV ~25%*)
- sols travaillés antérieurement (*CV <20%*)



3 raisons d'être optimiste…



3 raisons d'être optimiste…

Les systèmes de semis-direct agro-écologiques type « Séguy et al. » sont beaucoup plus séquestrant

Jusqu'à 166 g C / m² / an dans le 0-10 cm

et même …

jusqu'à 180 g C / m² / an dans le 10-20 cm

MESURES DES EMISSIONS DE N_20 et CH_4

J.C. GERMON

Mesures des émissions de N_2O et CH_4

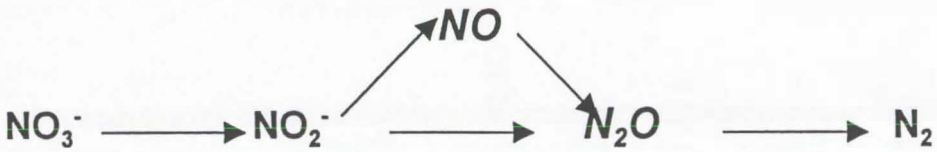
Jean-Claude Germon

(collaboration Catherine Hénault)

INRA-Université de Bourgogne, UMR Microbiologie des Sols-GéoSol
17 rue Sully, 21034 Dijon Cedex

Email : germon@inra.dijon.fr

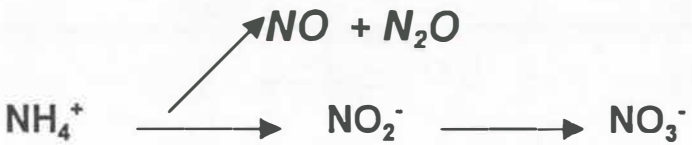
- la dénitrification biologique



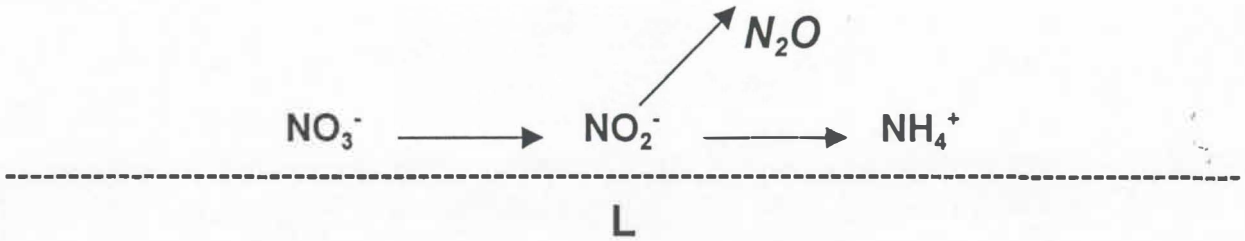
- la dénitrification chimique

NO_3^- & NO_2^- + milieu acide et / ou réducteur ⟶ (N_2 + *NO* + NO_2 + N_2O)

- la nitrification



- la réduction dissimilatrice de NO_3^- en NH_4^+



Les mécanismes producteurs de N_2O conduisent souvent à la production simultanée de NO

Les méthodes de mesure des émissions de N_2O à partir du sol

1 : les mesures à partir d'échantillons de sol

évaluation des activités potentielles de production et réduction de N_2O

2 : les mesures à partir d'échantillons de sols non remaniés

(soil core method)

3 : les mesures in situ

- les enceintes statiques
- les enceintes dynamiques
- les tunnels de ventilation
- la micrométéorologie

  les gradients de concentration

  les corrélations turbulentes

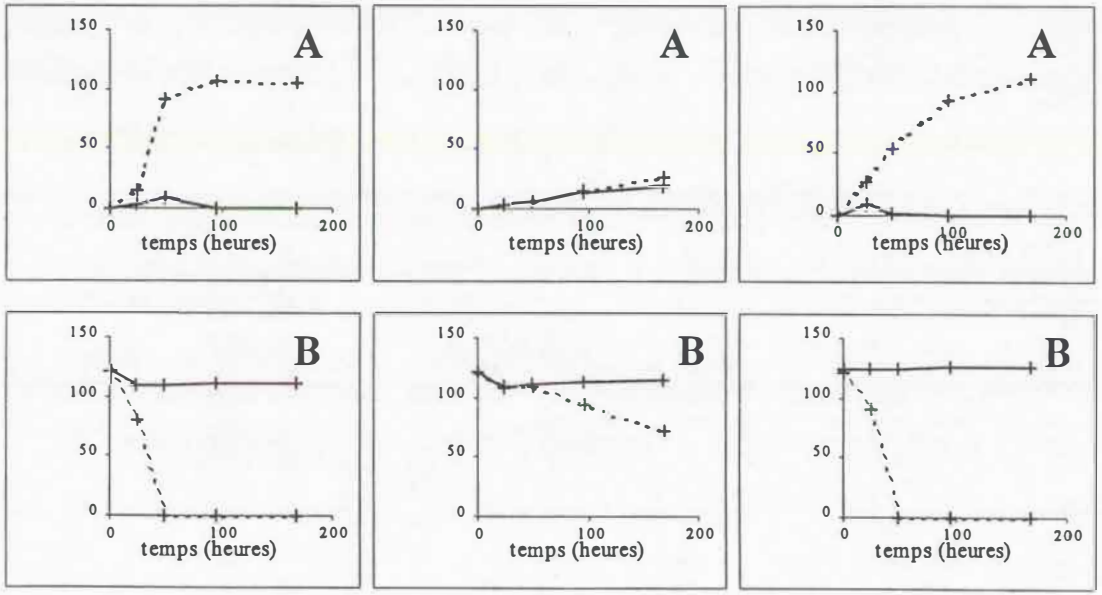


Figure 2 : Mesures en laboratoire des activités dénitrifiantes (A ···) ; productrices de N_2O (A —) et réductrices de N_2O (B ···) après apport de nitrates (A) ou de N_2O (B), en présence (—) ou en absence (···) d'acétylène, dans 3 sols étudiés *in situ* en 1995 pour les émissions de N_2O (Hénault et al, 1998a).

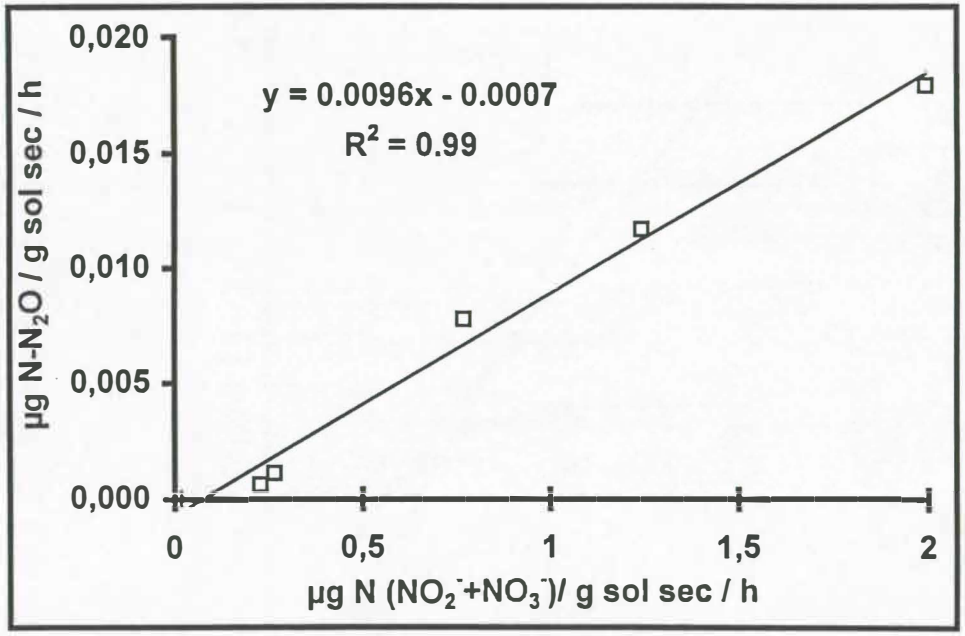
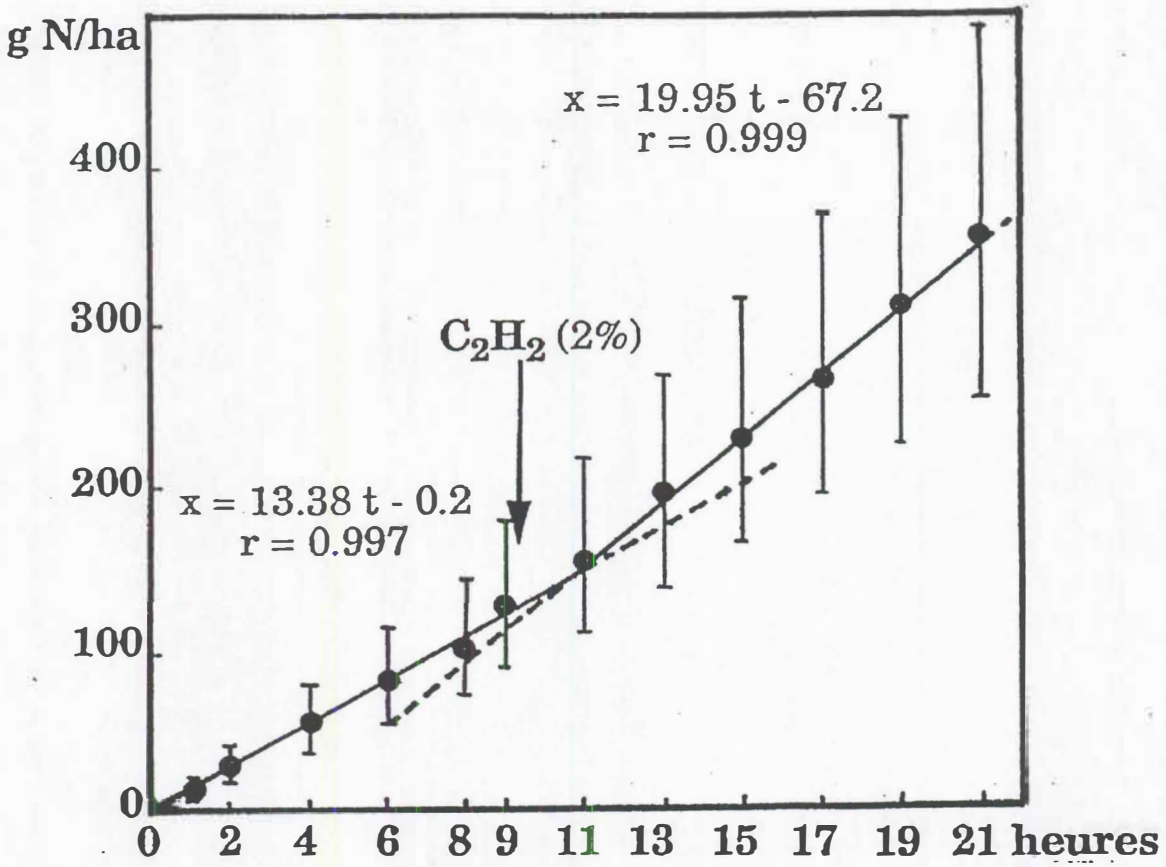
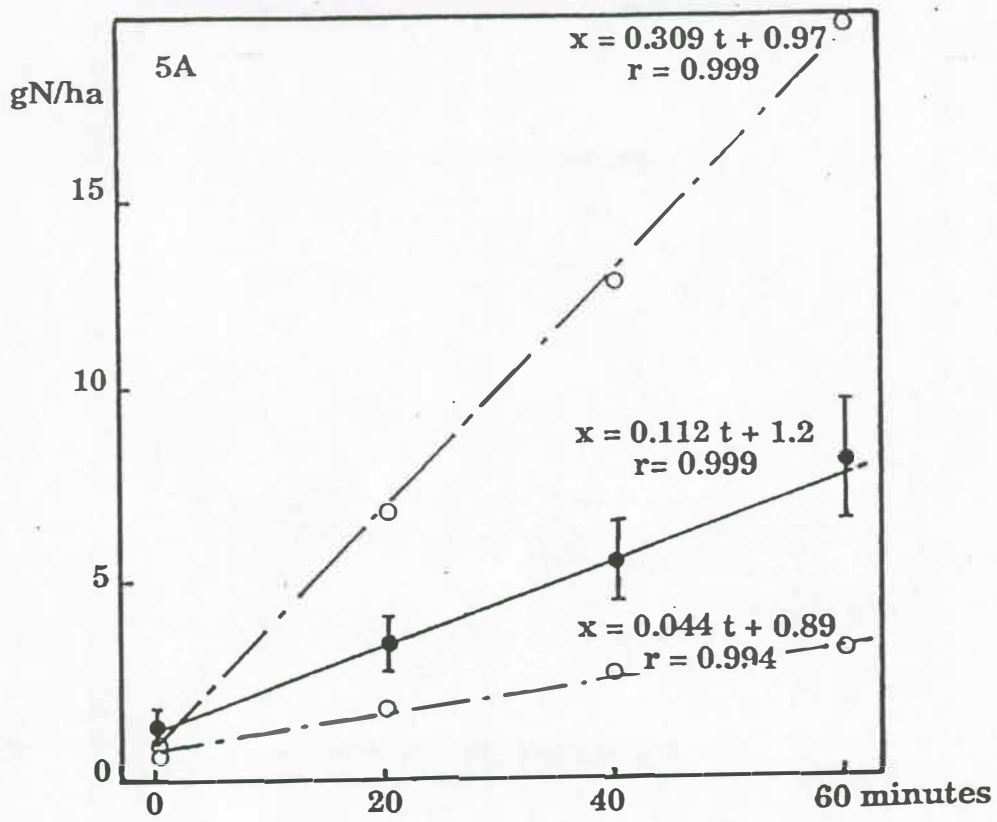


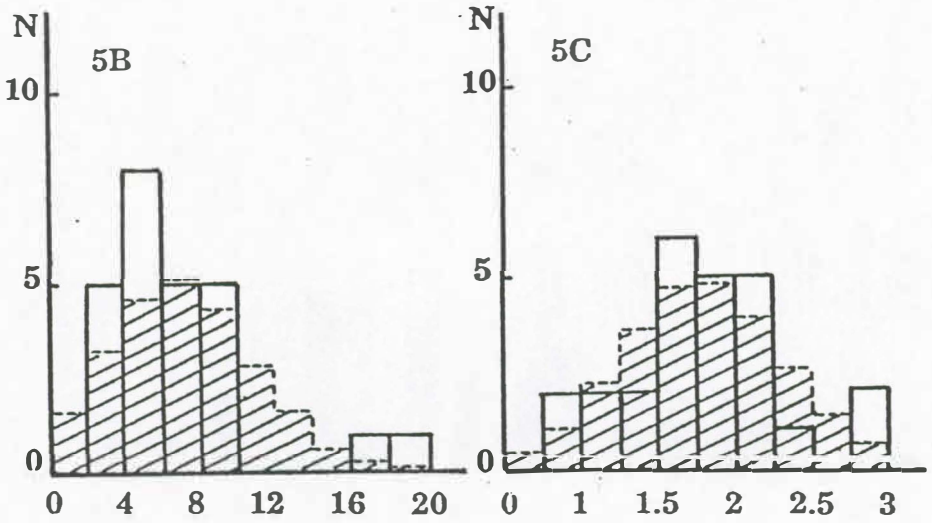
Figure 1 : Relation entre la vitesse d'émission de N_2O et la vitesse de nitrification dans un sol de Champagne (Garrido et al, 1999)



Cinétiques de production de N_2O à partir de 33 cylindres de sol non remanié, incubés sous atmosphère normal, puis enrichi de 2 % d'acétylène.
Valeurs moyennes et intervalles de confiance à 5 %.

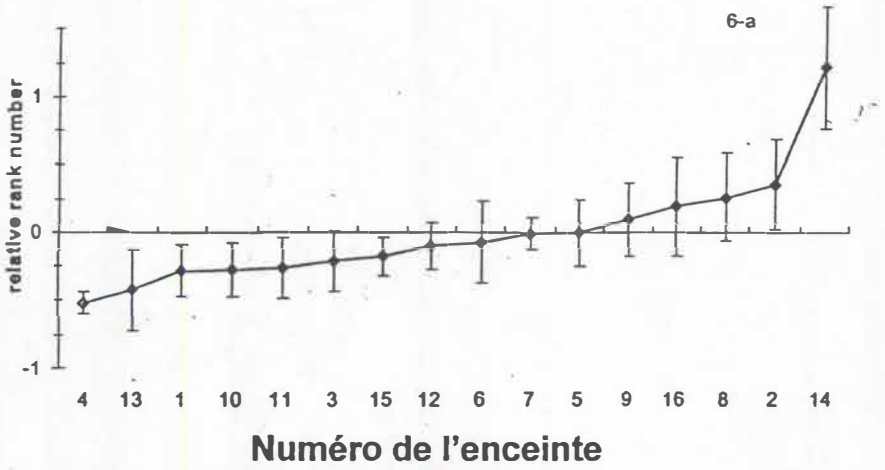
(Germon et Jacques, 1990
in Hénault et Germon, 1995)



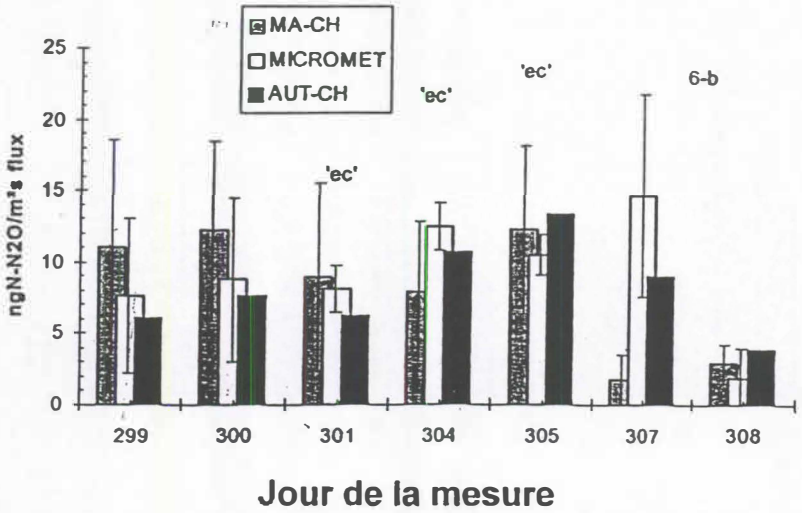


1 : Cinétiques d'émission de N_2O in situ à partir de 25 enceintes (après enrichissement de l'atmosphère du sol en acétylène).
Cinétiques moyennes avec IC à 5 % et cinétiques extrêmes.

2 : Distributions des vitesses d'émission et de leurs transformées logarithmiques.
(Germon et al, 1985, in Hénault et Germon, 1995)



i) étude de la dispersion avec 16 enceintes (moyennes des mesures sur 10 jours) ;

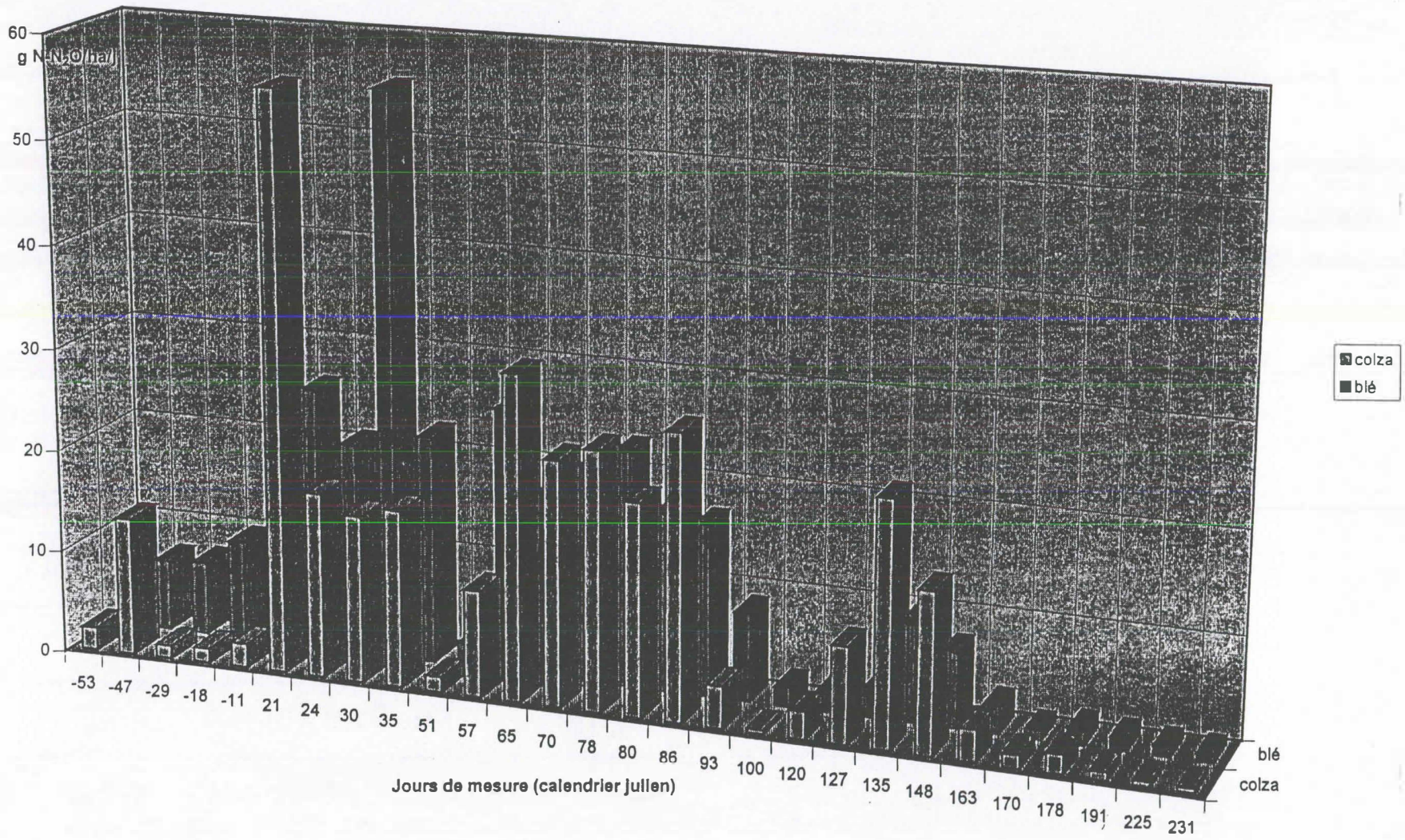


ii) comparaison des mesures d'émissions par enceintes manuelles (16 répétitions) ou automatiques (2 répétitions), ou par méthode micrométéorologique

Variabilité spatiale des émissions de N_2O (*in* P. Laville et al, 1997) ;

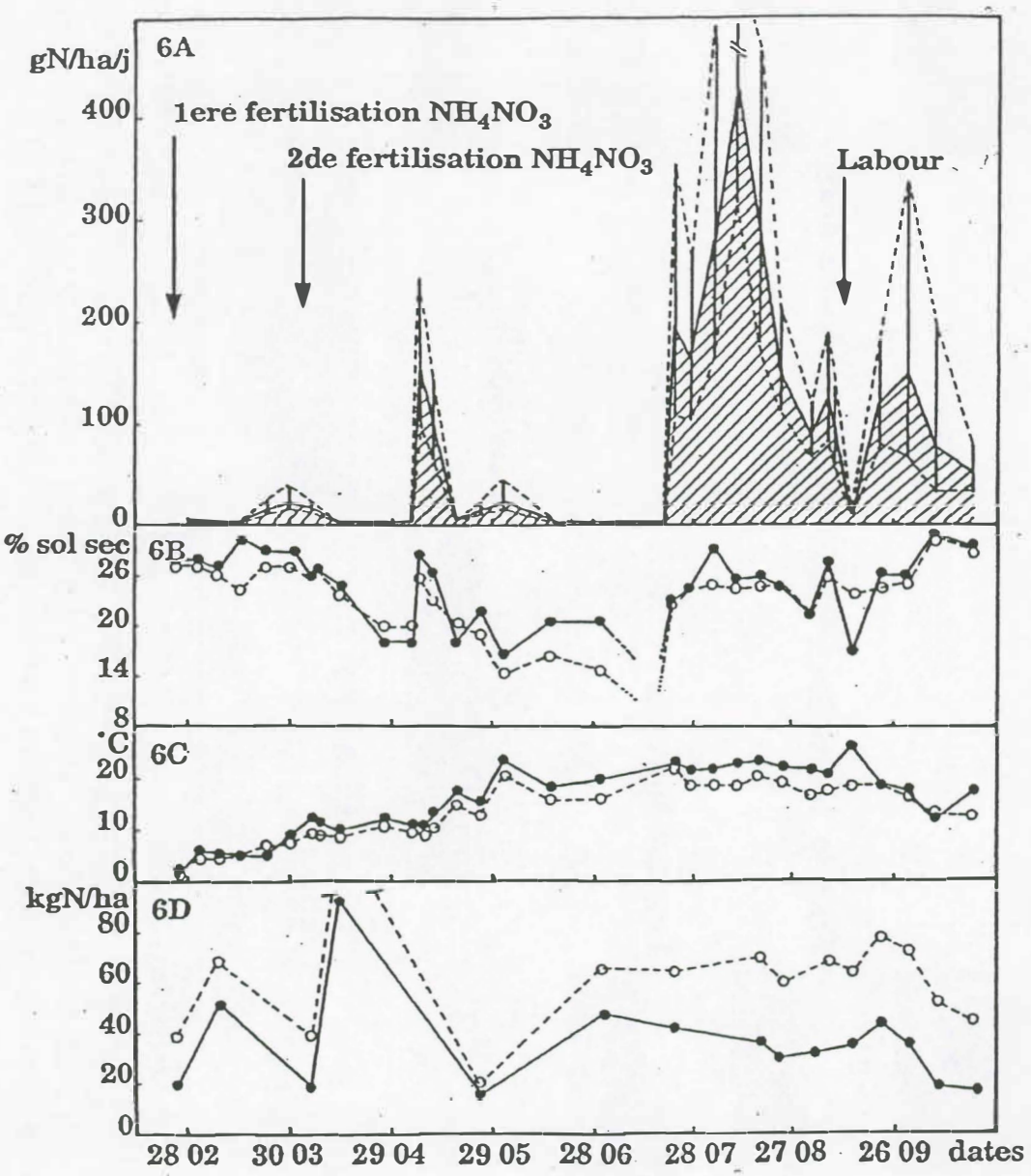
Sites	Micrométéorologie		Chambres	
	Flux moyens	Variabilité	Flux moyens	Variabilité
Bourgogne	9	4 (44%)	8	5 (63%)
Landes	126	20 (22%)	105	47 (42%)
Faux Perche	61	30 (49%)	58	33 (57%)

Comparaison des émissions de N_2O (ng $N\text{-}N_2O.m^2.s^{-1}$) mesurées par méthodes des chambres et méthodes micrométéorologiques dans 3 situations correspondant à différentes intensités d'émission.



Cinétiques d'émissions de N_2O sous cultures de blé et de colza (d'après Hénault et all, 1998)

J.C. Germon, Académie d'Agriculture, mai 1999



Intégration dans le temps des mesures de dénitrification dans le sol et des principaux paramètres de régulation

(Germon et al, 1985 ; in Hénault et Germon, 1995)

Facteurs étudiés			% de N apporté émis en N_2O
agronomique	climatique	pédologique	
Colza fertilisé (170 kg N ha^{-1})	France, Nord Est - 1997	Luvisol[1]	
- nitrate d'ammonium			0.53
- sulfate d'ammonium			0.55
- urée			0.42
- nitrate de potassium			0.42
Colza fertilisé, dose N	France, Nord Est - 1995	Moyenne de 3 sols différents	
- suboptimale			1.0
- suboptimale + 100 kg ha^{-1}			1.1
Culture fertilisée (170 kg ha^{-1})	France, Nord Est - 1997	Luvisol[1]	
- Blé			0.33
- Colza			0.53
Colza fertilisé, dose N *suboptimale*	France, Nord Est	Luvisol[1]	
- 1995			2.49
- 1997			0.53
Colza fertilisé, dose N *suboptimale*	France, Nord Est - 1995		
		- Luvisol[1]	2.49
		- Rendosol[1]	0.18
		- Calcosol[1]	0.66

Comparison des effets de différents facteurs sur la proportion d'azote appliqué émis sous forme de N_2O au cours des 5 mois suivant l'apport de fertilisants.

(1) Luvisol :sol brun lessivé des plaine de la Saône ; Rendosol : rendzine sur craie de Champagne ; Calcosol : sol brun calcaire sur calcaire dur (Petites Terres des plateaux en Côte d'Or)

Méthodologie pour estimer les émissions directes de N_2O à partir des sols agricoles :

$$N_2O_{Direct} = [(F_{SN} + F_{AW} + F_{BN} + F_{CR}) \times EF_1] + F_{OS} \times EF_2$$

- N_2O_{Direc} Emissions directes de N_2O à partir des sols agricoles d'un pays (kg N/an)

- EF_1 Facteur d'émissions directes par les sols (kg N-N_2O / kg N apporté

- F_{SN} N fertilisant apporté (kg N/an)
- F_{AW} N effluents anim^x corrigés (kg N/an)
- F_{BN} N fixé biologiq^t dans le pays (kg N/an)
- F_{cr} N résidus culture enfouis (kg N/an)

- EF_2 Facteur d'émissions directes par minéralisation des sols organiques mis en culture (kg N-N_2O /ha/an)

- F_{os} Surface sols cultivés organiques (ha)

Source : revised 1996 IPCC Guidelines

Structure du modèle d'émission de N_2O

$$N_2O_{total} = N_2O_{dénit} + N_2O_{nit}$$

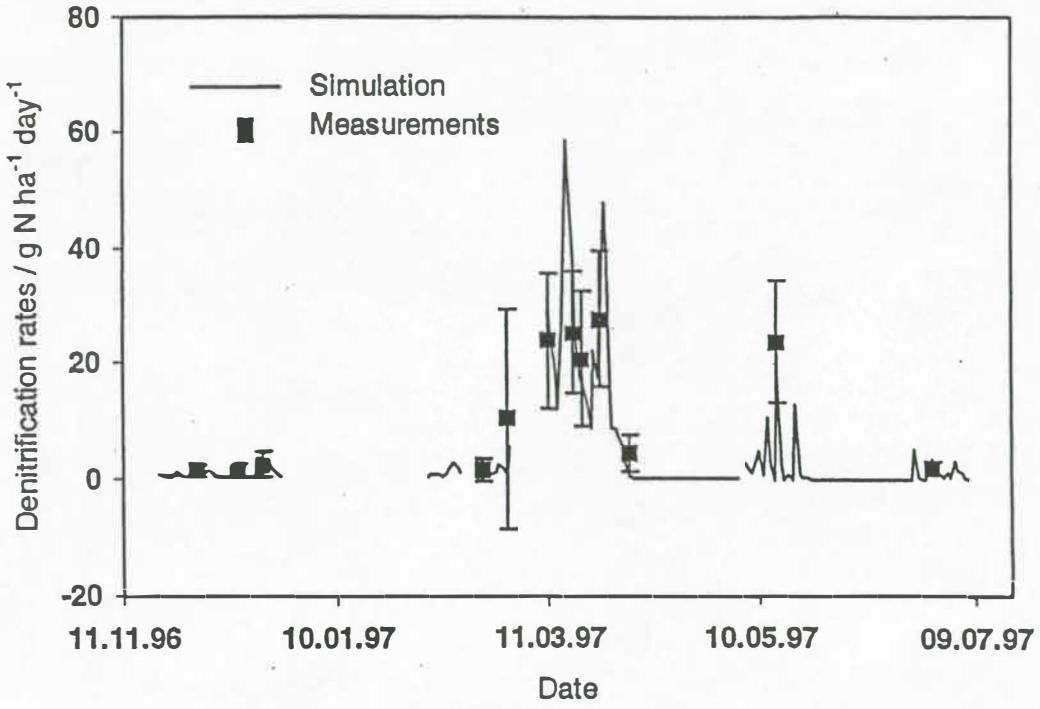
$$N_2O_{dénit} = r \times K \times F_n \times F_t \times F_w$$

NEMIS, 2000

Déterminé au cours de tests de laboratoire

$$N_2O_{nit} = f\,[\,nit\,(hum, [NH_4^+], temp\,)\,]$$

Déterminée au cours de tests de laboratoire

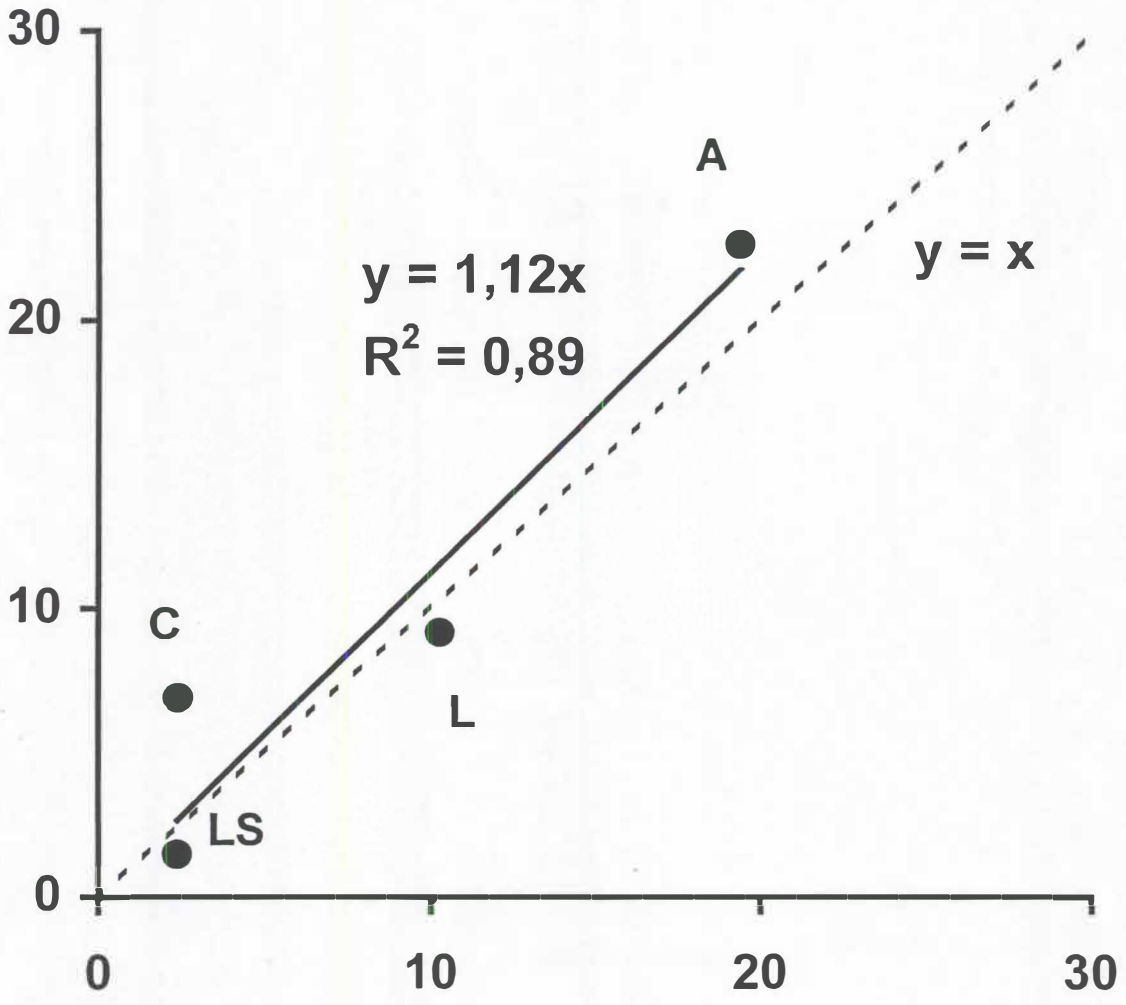


Simulation de la dénitrification dans le sol à l'aide du modèle NEMIS (Hénault et Germon, 2000).

Test de la validité du module N_2O , NOE

Test sur 4 sites expérimentaux (1 cinquième site est en cours de traitement)

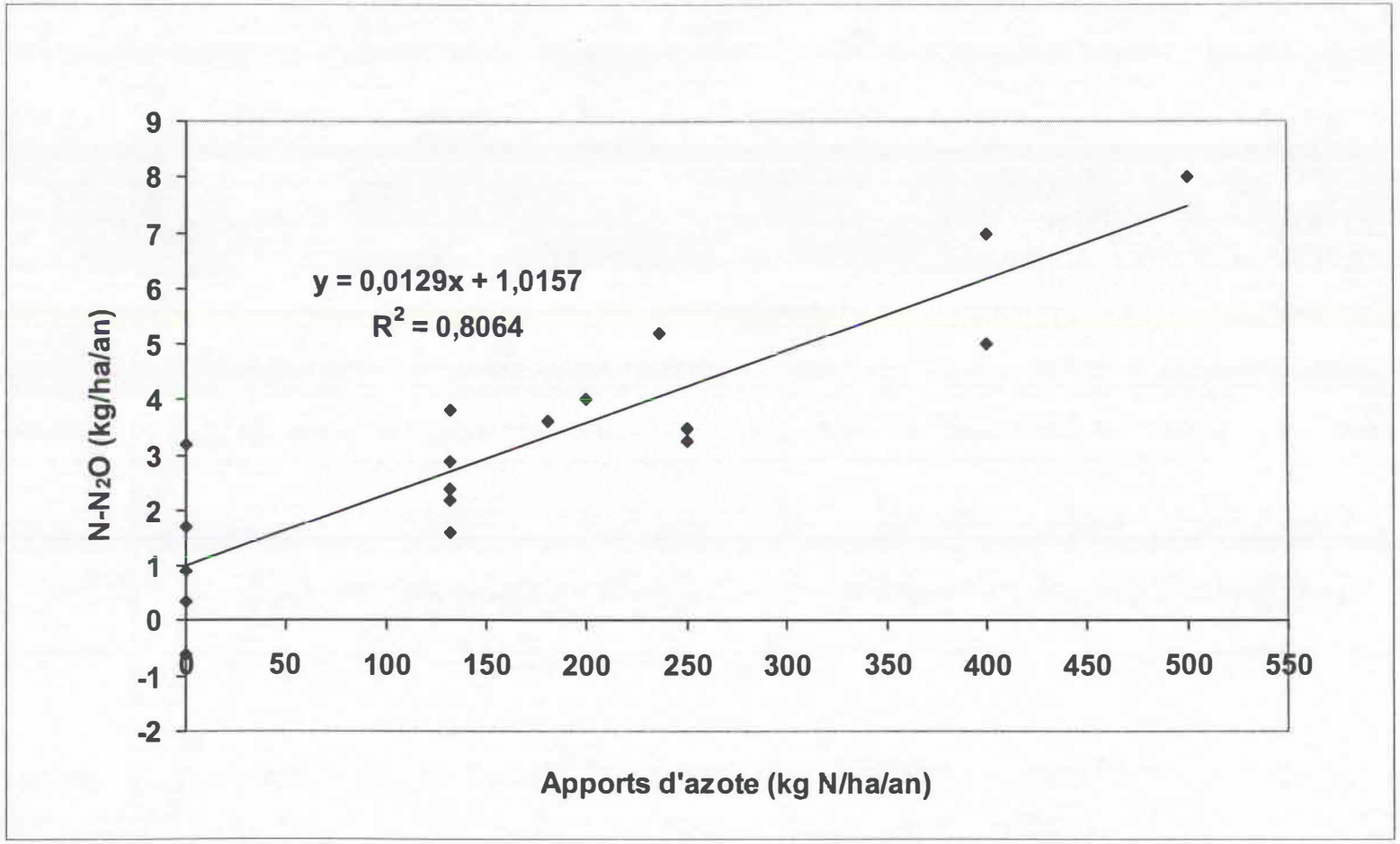
Flux moyen simulé, en fonction du flux moyen mesuré (g N ha^{-1} j^{-1})



C. Hénault et al (AFES, 2000)

	CO_2	CH_4	N_2O	CFC-11	CFC-12	HCFC-22 substitut des CFC	CF_4 (perfluoro carbone)
Concentration pré-industrielle	280 ppmv	700 ppbv	275 ppbv	0	0	0	0
Concentration en 1994	358 ppmv	1720 ppbv	312 ppbv	268 pptv	503 pptv	110 pptv	72 pptv
Augmentation annuelle	1,5 ppmv /an	10 ppbv /an	0,8 ppbv /an	0 pptv /an	7 pptv /an	5 pptv /an	1,2 pptv /an
	0,4 %/an	0,6 %/an	0,25 %/an	0 %/an	1,4 %/an	5 %/an	2 %/an
Durée de vie (années)	50-200	12	120	50	102	12	50000
Contribution estimée au forçage radiatif	1,56 W m^{-2}	0,47 W m^{-2}	0,14 W m^{-2}	0,06 W m^{-2}	0,14 W m^{-2}	≈ 0,08 W m^{-2}	
	63,7 %	19,2 %	5,7 %	2,4 %	5,7%	3,2 %	

Evolution de la concentration atmosphérique des principaux gaz à effet de serre affectés par l'activité humaine et de leur contribution respective au forçage radiatif (IPCC, 1996).



Emissions de N_2O en fonction des apports d'azote dans différentes expérimentations conduites sur une année à travers le monde. Ensemble des données ayant servi de base à la méthode d'évaluation de l'IPCC (d'après Bouwman, 1996).

Sols de cultures ou de prairies, non organiques recevant une fertilisation minérale d'au plus 500 kg N/ha/an

Facteurs étudiés			% de N apporté émis en N_2O
agronomique	climatique	pédologique	
Colza fertilisé (170 kg N ha^{-1})	France, Nord Est - 1997	Luvisol[1]	
- *nitrate d'ammonium*			0.53
- *sulfate d'ammonium*			0.55
- *urée*			0.42
- *nitrate de potassium*			0.42
Colza fertilisé, dose N	France, Nord Est - 1995	Moyenne de 3 sols différents	
- *suboptimale*			1.0
- *suboptimale + 100 kg ha^{-1}*			1.1
Culture fertilisée (170 kg ha^{-1})	France, Nord Est - 1997	Luvisol[1]	
- *Blé*			0.33
- *Colza*			0.53
Colza fertilisé, dose N *suboptimale*	France, Nord Est	Luvisol[1]	
	- *1995*		2.49
	- *1997*		0.53
Colza fertilisé, dose N *suboptimale*	France, Nord Est - 1995	- *Luvisol* [1]	2.49
		- *Rendosol* [1]	0.18
		- *Calcosol* [1]	0.66

Comparison des effets de différents facteurs sur la proportion d'azote appliqué émis sous forme de N_2O au cours des 5 mois suivant l'apport de fertilisants.

(1) Luvisol :sol brun lessivé des plaine de la Saône ; Rendosol : rendzine sur craie de Champagne ; Calcosol : sol brun calcaire sur calcaire dur (Petites Terres des plateaux en Côte d'Or)

Estimation grossière des émissions et consommations journalières moyennes de méthane dans les sols français*

	Surface km^2	Activité** g CH_4 ha^{-1} j^{-1}	Bilan t CH_4 j^{-1}	Total
Sols exondés				
Terres cultivées	180500	-5,5	-99	
Prairies et paturages	115000	-6,5	-75	
Friches agricoles	35810	-8,3	-30	
Forêts	127850	-9,9	-127	**-330**
Sols inondées hors zones maritimes				
Rizières	166	3000	50	
Marais maraichers	80	720	6	
Roselières	300	730	22	
Tourbières	300	433	13	**91**
Sols humides à engorgement temporaire				
Prairies humides	10000	3	3	
Landes humides	200	3	0,06	
Boisements humides	2500	3	0,75	**3,81**

* Les activités sont celles des tableaux 1 et 2. Les estimations de surfaces proviennent de l'Encyclopedia Universalis et de Barnaud 1998 (3). ** Médiane

Source : P. Roger, J. Le Mer et C. Joulians, 1999, C.R. Acad. Agric. Fr., 85, 193-210

Sources naturelles :

- Océans	1-5
- Sols tropicaux	
- Forêts humides	*2,2-3,7*
- Savanes sèches	*0,5-2,0*
- Sols des zones tempérées	
- Forêts	*0,1-2,0*
- Prairies	*0,5-2,0*

Sources anthropiques :

- Sols cultivés	*1,8-5,3*
- Brûlage de la biomasse	0,2-1,0
- Sources industrielles	0,7-1,8
- Animaux et élevage	0,2-0,5

Puits :

- Absorption par les sols	*?*
- Photolyse dans l'atmosphère	9-16

Augmentation atmosphérique :	**3,1-4,7**

Estimation des principales sources et des principaux puits de protoxyde d'azote (N_2O) à l'échelle de la terre, en Tg (10^6 t) de N par an.

Source : Climate Change 1994, IPCC, 1995

Sources naturelles identifiées :		
- *Zones Humides*	*115 (55 - 150)*	
- Termites	20 (10 - 50)	
- Océans	10 (5 - 50)	
- Autres	15 (10 - 40)	
- Sous total		160 (110 - 210)
Sources anthropiques :		
liées aux carburants fossiles		
- Gaz naturels	40 (25 - 50)	
- Mines de charbon	30 (15 - 45)	
- Industrie pétrolière	15 (5 - 30)	
- Combustion du charbon	? (1 - 30)	
- Sous total		100 (70 - 120)
liées aux émissions de la biosphère		
- Fermentations entériques	85 (65 - 100)	
- *Sols de rizières*	*60 (20 - 120)*	
- Combustion de biomasse	40 (20 - 80)	
- Décharges	40 (20- 70)	
- Effluents d'élevage	25 (20 - 30)	
- Effluents domestiques	25 (15 - 80)	
- Sous total		275 (200 - 350)
Total des sources identifiées		535 (410 - 660)
Puits :		
- Destruction troposphèrique		445 (360 - 530)
- Destruction atmosphèrique		40 (32 - 48)
- *Destruction par les sols*		*30 (15 - 45)*
Augmentation atmosphèrique :		37 (35 - 40)

Estimation des principales sources et des principaux puits de méthane (CH_4) à l'échelle de la terre, en Tg (10^6 t) de CH_4 par an. Source : Climate Change 1994, IPCC, 1995

Méthodologie pour estimer les émissions directes de N_2O à partir des sols agricoles :

$$N_2O_{Direct} = [(F_{SN} + F_{AW} + F_{BN} + F_{CR}) \times EF_1] + F_{OS} \times EF_2$$

- N_2O_{Direc} Emissions directes de N_2O à partir des sols agricoles d'un pays (kg N/an)

- EF_1 Facteur d'émissions directes par les sols (kg N-N_2O / kg N apporté

- F_{SN} N fertilisant apporté (kg N/an)
- F_{AW} N effluents anim^x corrigés (kg N/an)
- F_{BN} N fixé biologiq^t dans le pays (kg N/an)
- F_{cr} N résidus culture enfouis (kg N/an)

- EF_2 Facteur d'émissions directes par minéralisation des sols organiques mis en culture (kg N-N_2O /ha/an)

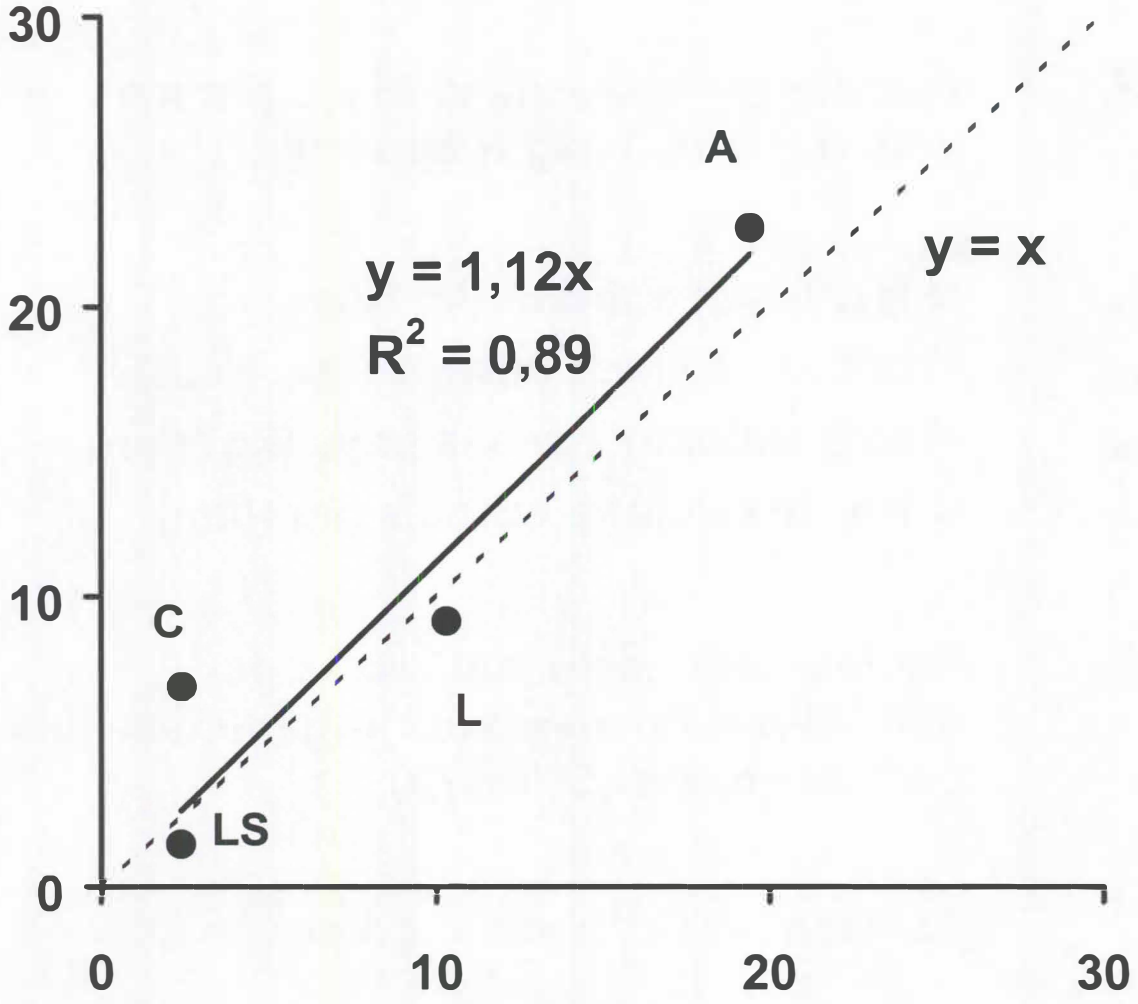
- F_{os} Surface sols cultivés organiques (ha)

Source : revised 1996 IPCC Guidelines

Test de la validité du module N_2O , NOE

Test sur 4 sites expérimentaux (1 cinquième site est en cours de traitement)

Flux moyen simulé, en fonction du flux moyen mesuré (g N ha^{-1} j^{-1})



C. Hénault et al (AFES, 2000)

Facteurs d'émission de N_2O liés aux cultures
(d'après Skiba et al, 1996 ; in Cellier et Laville, 1999)

Cultures	Facteur d'émission (%)
Prairie pâturée	3,1
Prairie fauchée	1,0.
Orge de printemps	0,8
Blé d'hiver	0,5
Orge d'hiver	0,5
Colza	0,5
Autres céréales	0,8
Pomme de terre	1,6
Betterave à sucre	1,6
Cultures maraîchères	1,6
Cultures fourragères	1,6

Evaluation des émissions : difficulté de prendre en compte les facteurs liés au sol :

1 : Grande variabilité spatiale des stocks et des flux : souvent lois de distribution de type log-normal

- **Comment prendre en compte cette variabilité spatiale pour l'évaluation des stocks de carbone, directement liée aux caractéristiques des sols ?**

- **Peut-on continuer à faire l'impasse sur le facteur sol dans l'évaluation des émissions de N_2O comme le propose la méthode d'évaluation retenue par l'IPCC ?**

- **Quel poids peuvent avoir les caractéristiques liés au sol dans la production et la consommation de méthane, qui régulent les émissions ?**

2 : Prise en compte du facteur sol est d'un poids différent selon les objectifs recherchés :

- **Evaluation des stocks et des flux globaux : peut vraisemblablement et pour partie faire l'impasse sur la prise en compte de la variabilité spatiale à petite échelle**

- **Stratégie de maîtrise et de réduction des flux : nécessité d'intervention à des échelles de type agronomique et de prise en compte des caractéristiques de fonctionnement du sol à ces échelles**

Quelques éléments de stratégies agronomiques pour limiter les émissions de N_2O par les sols

- au niveau des pratiques culturales

- gérer au plus juste la fertilisation azotée
  - éviter les apports excédentaires (prise en compte de tous les apports d'azote)
  - maintenir au plus bas la disponibilité en azote minéral
- favoriser l'état d'aération du sol (état structural, limiter l'excès d'eau, éviter l'irrigation sur des sols riches en azote minéral,...)
- gestion stricte de la fertilisation des prairies
- éviter la jachère nue
- éviter l'utilisation d'ammoniac anhydre
- maintien du pH à la neutralité (éviter l'acidification) ?
- gestion adaptée des effluents d'élevage ?
- rôle des inhibiteurs de nitrification ? ?

- au niveau de la gestion du territoire

- détecter les zones fortement émettrices (spatialisation du territoire)
- éviter l'intensification agricole dans ces zones (reforestation)
- éviter de créer artificiellement des zones émettrices (zones anoxiques en bordure de rivière ?...)
- éviter les transferts de pollution (stimuler la dénitrification peut conduire à la production de N_2O)

- autres suggestions ? ?

Quelques pistes pour limiter les émissions de CH_4 par l'agriculture ?

- *au niveau de l'élevage*

- alimentaion des ruminants

- recherche d'un optimum entre productivité et émission de CH_4
- sélection des animaux en fonction de leurs niveaux d'émission de CH_4 ?
- intervention sur la microflore du rumen ?

- gestion des effluents

- éviter la production de méthane au stockage ou collecter le méthane produit

- *au niveau des sols*

- gérer les cultures inondées pour réduire les émissions (mise à sec temporaire des rizières)
- éviter la création de zones émettrices
- accentuer les fonctions puits (gestion de la fertilisation azotée) ?
- ...

AGREGATION ET ACTIVITES DE LA FAUNE DU SOL
OU
LES PROCESSUS ET ATIVITES BIOLOGIQUES EN CAUSE DANS LA SEQUESTRATION DU CARBONE

A. ALBRECHT – E. BLANCHART

Agrégation & activités de la faune du sol

ou

Les processus et activités biologiques en cause dans la séquestration du carbone dans les sols

Alain Albrecht, ICRAF/IRD, Nairobi, Kenya
Éric Blanchart, BOST/IRD, Fort-de-France, Martinique

L'agrégation du sol: définitions

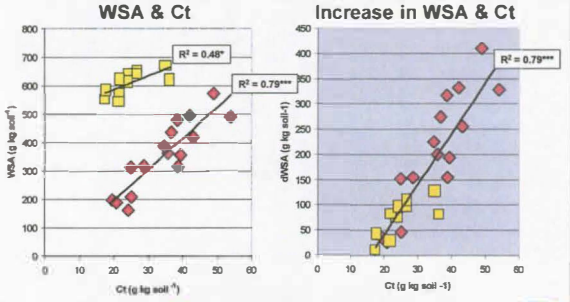
L'agrégation du sol, c'est l'organisation des particules élémentaires du sol à différentes échelles.

Elle s'exprime par une distribution en classes. Il existe divers modes d'obtention, à sec ou après contact dans l'eau (± agitation).

Les agrégats, stables à l'eau (objet de cet exposé), expriment une organisation dont la porosité n'est pas accessible à l'eau et donc aux activités microbiennes.

Ces agrégats « protègent » le carbone contre la minéralisation, celui-ci est « séquestré » !

La relation C/agrégation ou La relation Agrégation/C



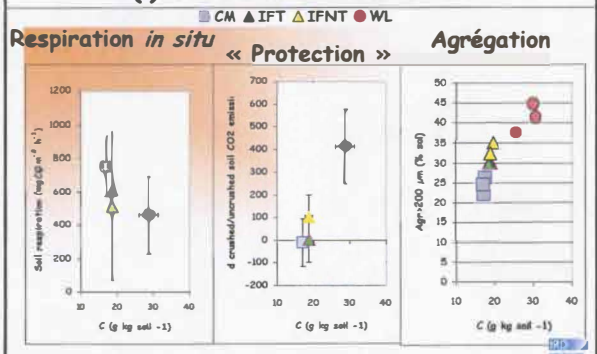
1:1 soils ◆ 2:1 soils

C/agrégation ou Agrégation/C à partir d'un exemple au Kenya

Crotalaria grahamiana

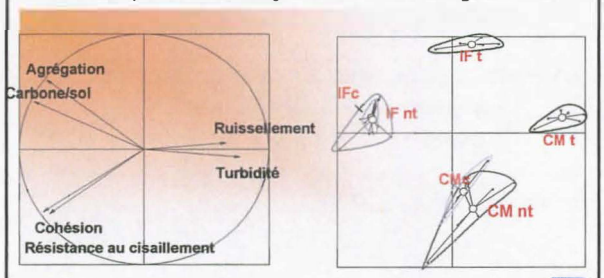
Tephrosia candida

Agrégation et protection du C/sol: (i) contre la minéralisation



Agrégation et protection du C/sol: (ii) contre les pertes par érosion

Érodibilité (sous pluie simulée, 30 mn, 50 mm/h) d'un sol après 8 mois de jachère à *Crotalaria grahamiana*



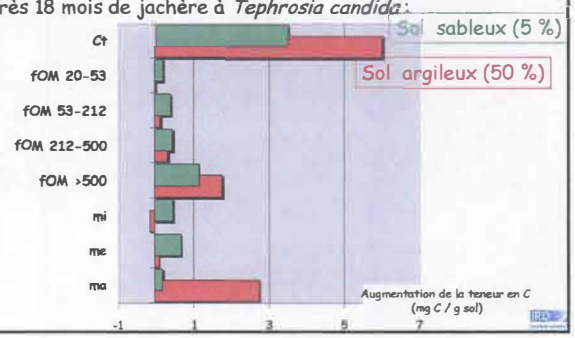
Agrégation et protection du C/sol: (ii) contre les pertes par érosion

Pertes en C (sous pluie simulée, 30 mn, 50 mm/h) d'un sol après 8 mois de jachère à *Crotalaria grahamiana*

	Carbone g kg sol^{-1}	Turbidité g l^{-1}	Pertes Mg ha^{-1}	Pertes en C kg ha^{-1}
CM c	17.3	0.9	0.3	**4.8**
CM nt	17.3	5.0	1.0	**17.1**
CM t	17.1	5.8	2.1	**36.4**
IF c	18.4	0.4	0.1	**1.8**
IF nt	18.4	1.1	0.3	**4.7**
IF t	17.8	1.9	0.6	**11.1**

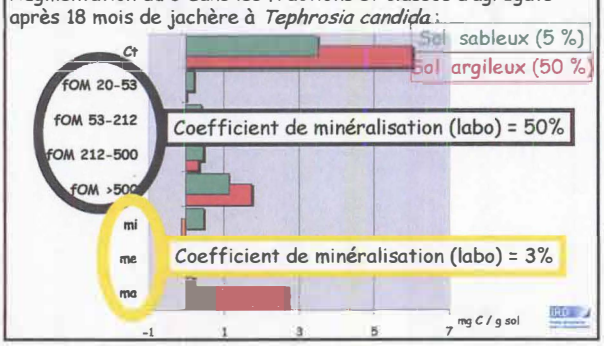
Localisation du carbone dans le sol: pour prédire le devenir du C/sol

Augmentation du C dans les fractions et classes d'agrégats après 18 mois de jachère à *Tephrosia candida*:



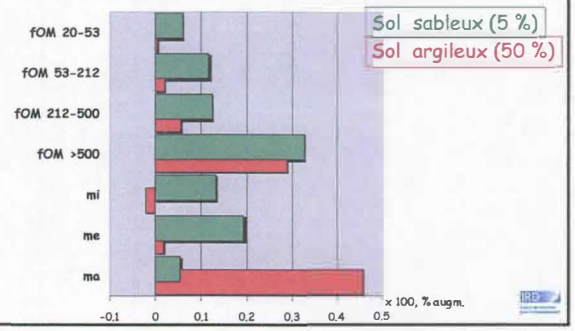
Localisation du carbone dans le sol: pour prédire le devenir du C/sol

Augmentation du C dans les fractions et classes d'agrégats après 18 mois de jachère à *Tephrosia candida*:



Localisation du carbone dans le sol: pour prédire le devenir du C/sol

Contribution à l'augmentation du Ct des fractions/agrégats:



Les déterminants de l'agrégation : (i) les constituants minéraux du sol

Texture: il faut des briques pour construire une maison…

Agents agrégeants et désagrégeants:

- **sesquioxydes de Fe, Al**
- **garniture ionique (Ca^{++}, Mg^{++}, Na^{+})**

Charges et pH…

Les déterminants de l'agrégation : (ii) les modes de gestion

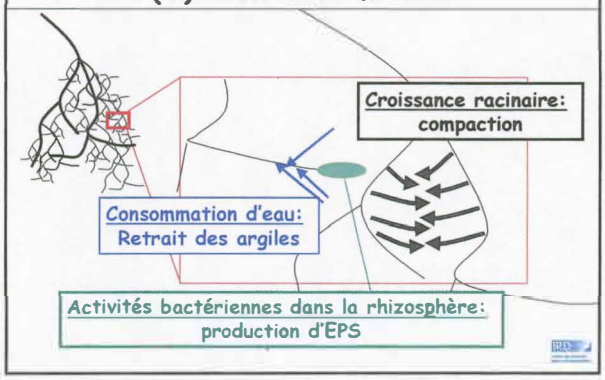
<u>Intrants:</u>

- **quantité**
- **qualité**
- **localisation**

<u>Pratiques culturales</u>

<u>Rotations</u>

Les déterminants de l'agrégation : (iii) « the root model »



Les déterminants de l'agrégation : (iv) la faune du sol

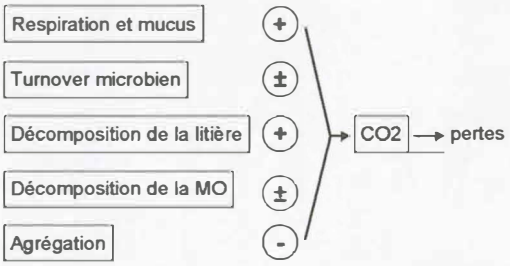
La parole est…

à mon collègue
Éric Blanchart, BOST/IRD

MECANISMES PAR LESQUELS LES VERS DE TERRE PEUVENT AFFECTER LES FLUX DE C

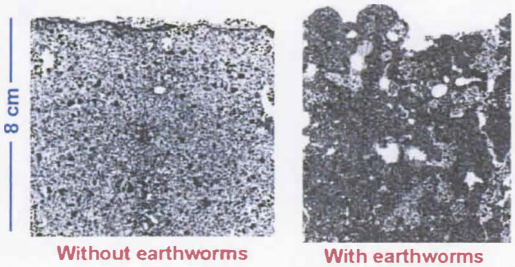
E. BLANCHART

Mécanismes par lesquels les vers de terre peuvent affecter les flux de C



Parmelee et al., 1998

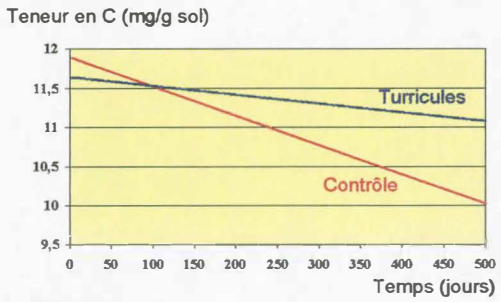
Effet des vers de terre sur la formation de la structure du sol (Lamto)



Without earthworms

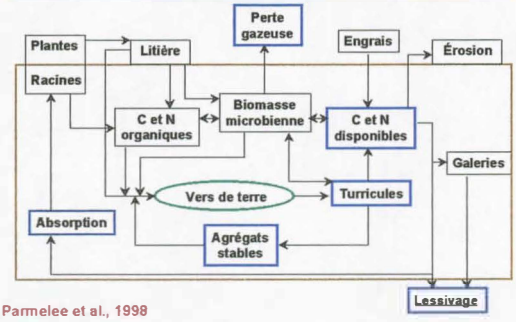
With earthworms

(Blanchart, 1990)



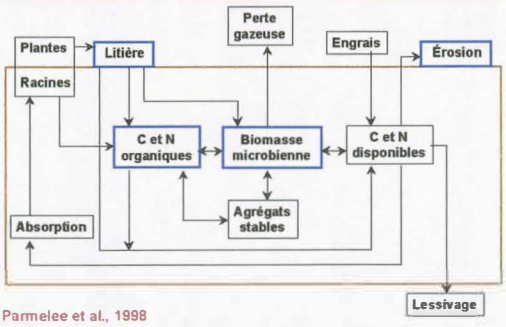
Martin (1992)

Evolution des pools et flux de C et N en présence de vers de terre



Parmelee et al., 1998

Evolution des pools et flux de C et N en absence de vers de terre



Parmelee et al., 1998

MODELES DE LA DYNAMIQUE DU CARBONE DES SOLS : UTILISATION, DONNEES D'ENTREE, PROBLEMES, LIMITES

J. BALESDENT

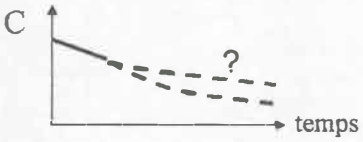
Modèles de la dynamique du carbone des sols : utilisation, données d'entrée, problèmes, limites

Jérôme Balesdent INRA /CEA Cadarache

- Modélisation pour quoi faire ?
- Présentation des modèles compartimentaux du carbone
- Exemple d'utilisation
- Données d'entrée
- Estimer la taille de compartiments des modèles ?
- Conclusions

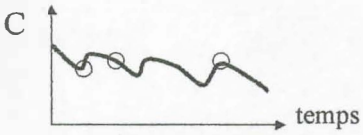
Modèles pourquoi faire ?

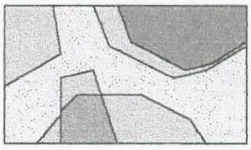
Prévoir
- quantité de matières organiques
- qualité des matières organiques
  - (débris végétaux,BM, resp)



Comprendre et analyser
- variations dans le temps
- variations entre modalités (espace temps)
- variations dans l'espace

Planifier les essais ou les prélèvements

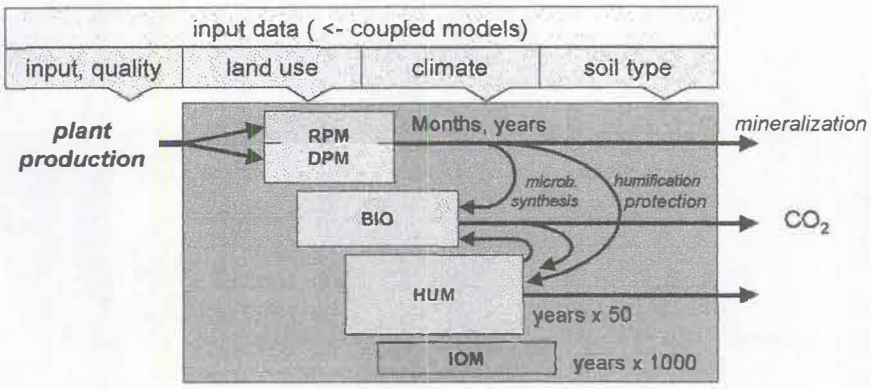




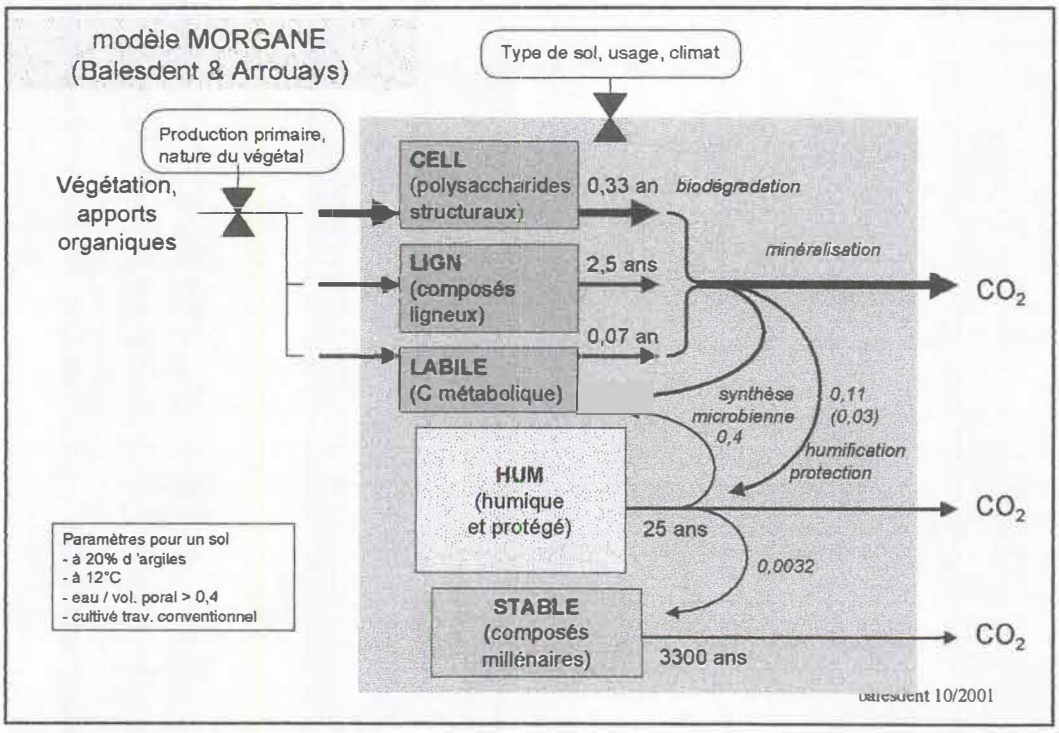
Outil pédagogique

The Rothamsted model of soil C (ROTH C)

- compartimental (décrit la quantité et de la qualité)
- 1er ordre : dC/dt = -kC



balesdent 10/2001



balesdent 10/2001

Equation, état d'équilibre

Equation différentielle générale

$$dC_i/dt = \underbrace{flux*alloc_i}_{\text{apport externe}} \underbrace{- k_i*C_i}_{\text{décomposition}} + \underbrace{\Sigma_j\ transfert_{ij}*k_j*C_i}_{\text{transfert des autres comp.}}$$

En écriture matricielle :

$$dC/dt = flux*alloc - k*C + transfert\ .\ k*C$$

L'équilibre du système est donné par dC/dt = 0 :

$$C = [(transfert-I)^{-1}.\ (flux*alloc)]/k$$ → tableur

balesdent 10/2001

Les données d'entrée de RothC

Etat initial

Apport organique
- annuel ou mensuel → flux
- type de végétation → allocation initiale

(affecte peu le C total)

Climat
- température mensuelle → vitesses
- déficit hydrique mensuel → vitesses

Sol
- % argile → transferts entre compartiments

balesdent 10/2001

Exemple d'application :
Deux Essais de Non Travail du sol (NT) avec témoin labour
Ces essais varient par :
la teneur en argile, la durée, le précédent, la date de prélèvement, le rendement

	sol	climat	usage	travail du sol					précédent	C du sol	
	argile	TMA		trav_sol	debut		rendt moyen			date prelt	C total
	g/g	°C				gMS m-2		=> qx/ha			g m-2
C	0,30	16	cereale	labour			450	*52,9*	cereal lab.	oct 2001	3500
C-NT	0,30	16	cereale	**NT**	[illegible]	14	400	*47,1*	cereal lab.	oct 2001	3950
					1998						
B	0,10	16	cereale	labour			400	*47,1*	prairie ->1988	mai 2001	3630
B-NT	0,10	16	cereale	**NT**	1994	8	400	*47,1*	prairie ->1988	mai 2001	3950

Questions :

1. De combien la biodégradation est-elle ralentie en Non Travail ?
2. Quel stockage de carbone peut-on prévoir sur 20 ans ?

On propose de décrire l'effet de NT vs Labour par une modification des vitesses de biodégradation (protection des matières organiques).

Exemple suite

Démarche suivie

La démarche générale consiste à prendre en compte les effets des différentes facteurs tels qu'ils sont décrits par le modèle, à l'exception de l'effet du travail du sol.

Exemple pour le site C

1. Simulation de l'état d'équilibre et des variations saisonnières du système LABOUR
   (entrer argile, climat, production carbonée).
2. Ajustement du système LABOUR 2001 à la valeur observée
   Ici on a dû multiplier toutes les constantes de vitesse
   (on aurait pu aussi modifier le compartiment stable)
3. Ajustement du système NON TRAVAIL en partant de l'état initial 1988, par un coefficient multiplicateur des constantes de vitesse.

Exemple pour le site D (précédent prairial)

1. Simulation d'un l'état d'équilibre prairial 1988
2. Ajustement du système LABOUR 2001 à la valeur observée
   Ici en déterminant la production carbonée (le carbone total) du système prairial initial
3. Ajustement du système NON TRAVAIL en partant de l'état initial 1994, par un coefficient multiplicateur des constantes de vitesse.

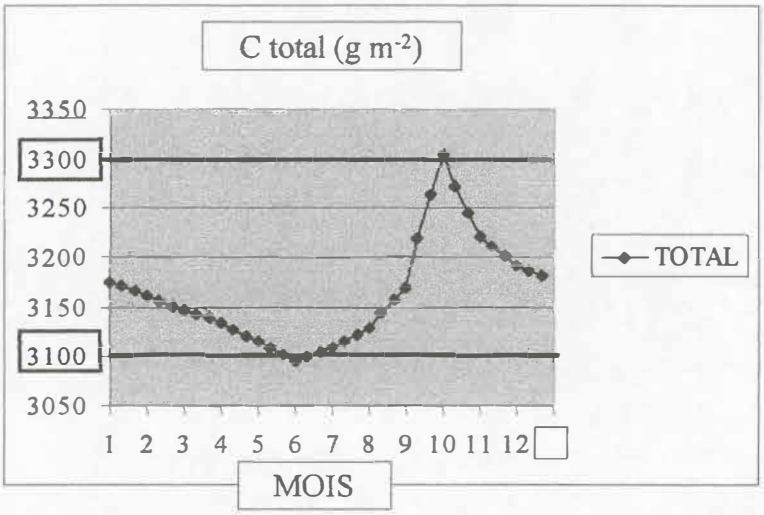
Exemple : suite

Question :

Faut-il y tenir compte des variations dues à la **saison de prélèvement** ?

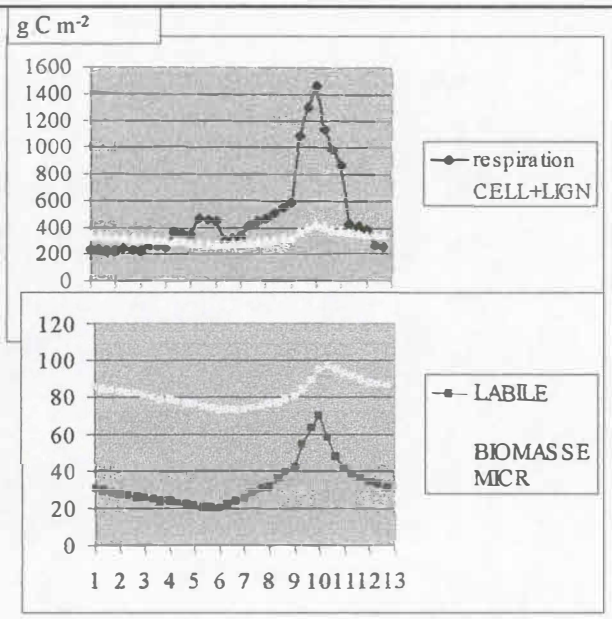
Réponse :

Le modèle prévoit 6% de gamme de variation du C total :
en tenir compte selon la sensibilité requise dans l'étude.

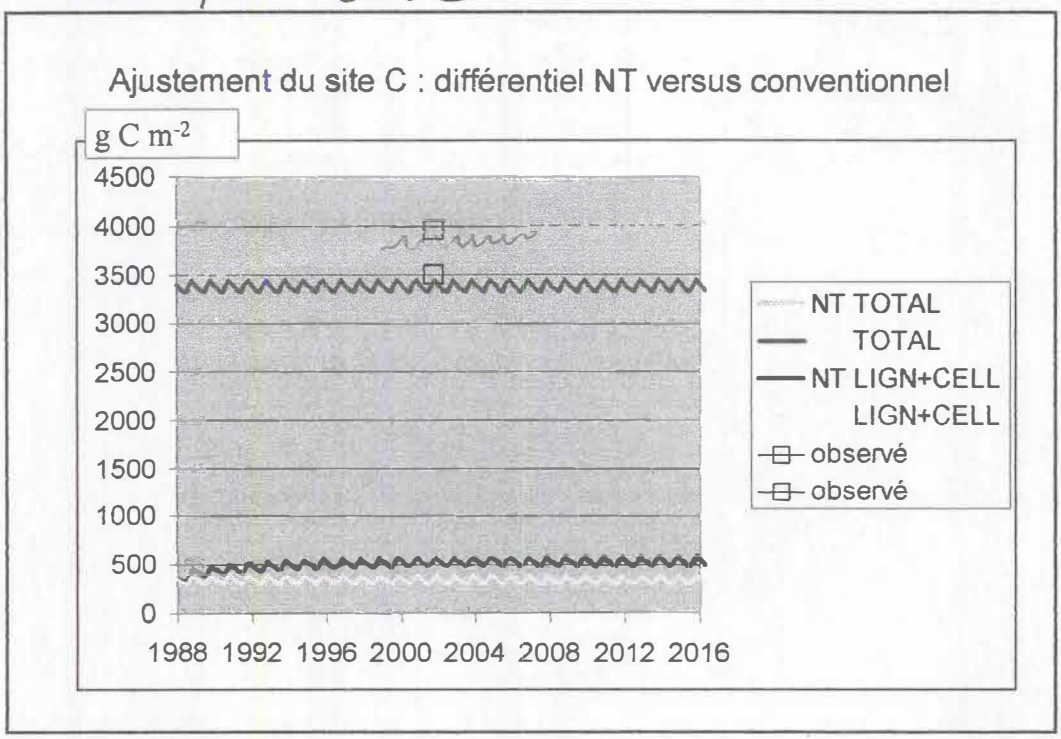


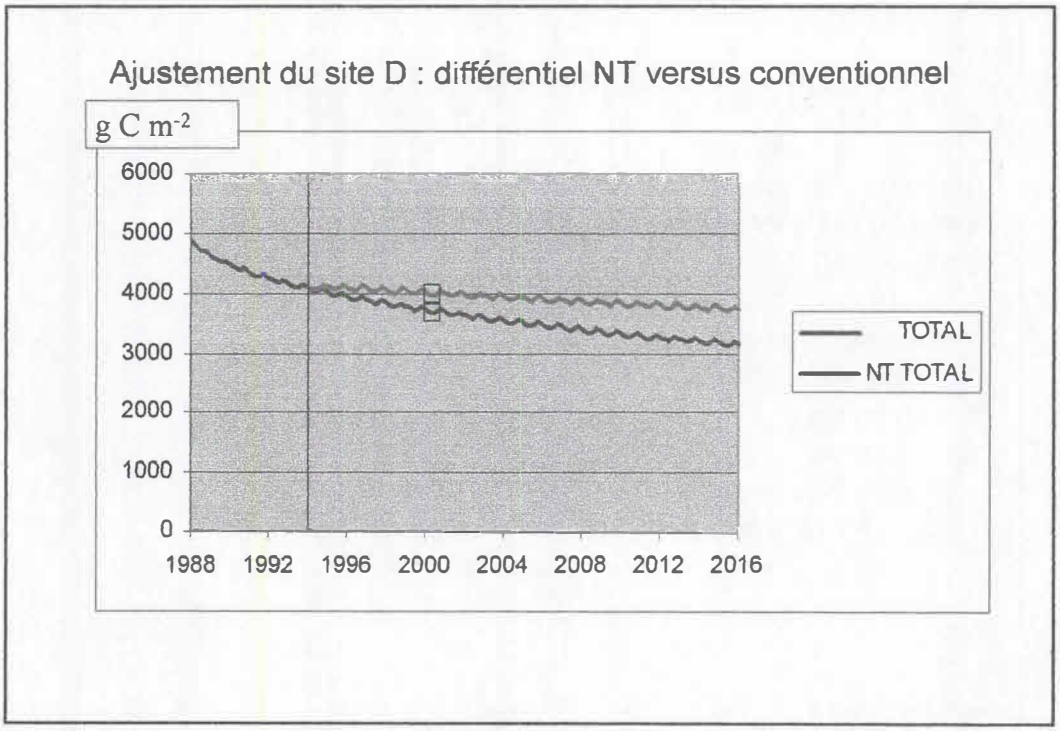
Le modèle permet de prévoir les variations saisonnières des flux et de la taille de certains compartiments

ces variations résultent de la superposition de deux cycles périodiques:
- le cycle climatique
- le cycle des apports



Exemple : suite





Exemple suite et fin

Estimation de l'effet du travail du sol via le modèle

	OBSERVE			MODELE			
g C m^{-2}				Stock à 20 ans	Delta à 20 ans	indice de vitesse	indice de TMR
Site C							
	oct 2001			*jan 2008*	*jan 2008*		
LABOUR	3500			3410		1	1
NON TRAVAIL	3950			3960	550	0,58	1,72
Site D							
	mai 2001	*jan 1988*	*jan 1994*	*jan 2014*	*jan 2014*		
LABOUR	3630	4902	4090	3215		1	1
NON TRAVAIL	3950	4902	4090	3775	560	0,67	1,49

données d'entrée : sol

pas de problème

données d'entrée : climat

pas de temps mensuel ou décadaire :

- Température T
- Paramètre hydrique W (déficit =P-ETP ou humidité du sol)

pas de temps annuel ou équilibre :

- calculer un modificateur moyen annuel des vitesses
  - Moyenne[f(T)*f(W)]

données d'entrée : apports annuels de carbone

1. flux moyen annuel : soit
   - données de rendement + facteur de conversion -> restitutions
   - sortie de modèle de plante

   racines et rhizodéposition : MORGANE les estime comme une proportion fixée des parties aériennes

pour une simulation au pas de temps mensuel ou décadaire :

- introduire éventuellement une répartition saisonnière de l'apport

2. Critère qualitatif dans certains modèles :
   - CENTURY : lignine/N
   - ROTHC : 1 paramètre (affecte peu le C total)
   - MORGANE : donnée d'entrée = type de végétation

données d'entrée : état initial

soit
- (i) considérer l'état initial comme à l'équilibre = erreur
- (ii) utiliser un estimateur analytique des compartiments = difficile
  (voir plus bas)
- (iii) connaître l'historique et faire générer l'état initial par le modèle
  ensuite ajuster le stock à t-X pour ajuster à t = 0

pas de temps mensuel ou décadaire :
prendre en compte la variation saisonnière prévue par le modèle

Estimateurs des compartiments ?

Aucun n'a une valeur universelle
- valeur régionale = créer des références
- OK pour comparaisons entre dates ou traitements

MO grossières Feller (= particulaires)
bon estimateur de RPM = STRUC = LIGN + CELL

Respiration en conditions contrôlées
bon estimateur

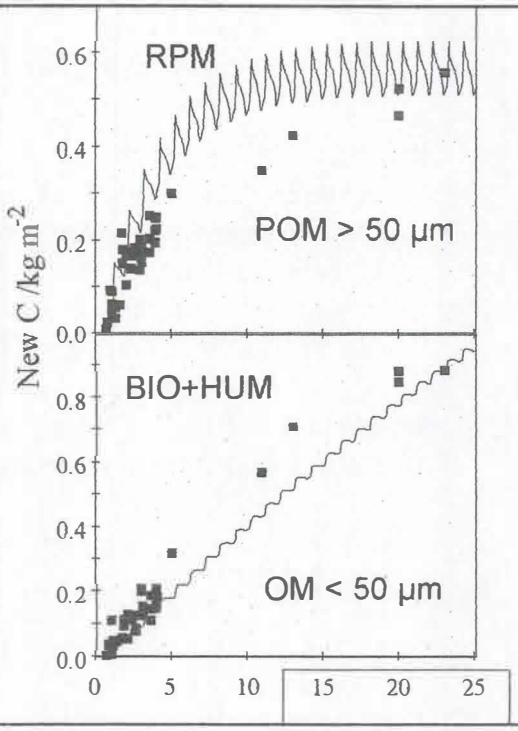
Biomasse microbienne
très délicat, mal décrite par un seul compartiment

Rien pour les compartiments labiles (IOM)
le C soluble est vieux

Rien pour le compartiment de carbone stable (IOM)
le résidu d'hydrolyse (US) est souvent aussi jeune que l'hydrolysable

The ***amount*** of new C in POM > 50 µm

is in general agreement with that of RPM

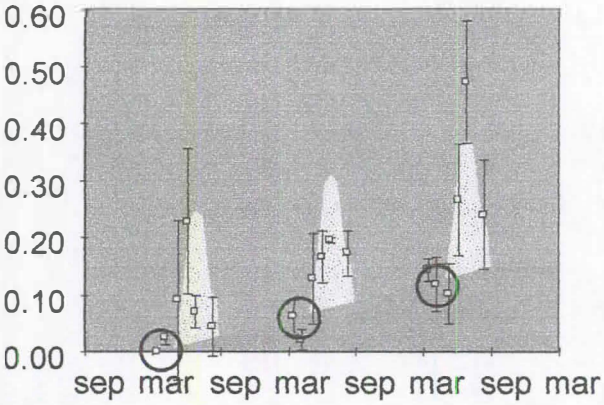


Incorporation of new C in FE-MB

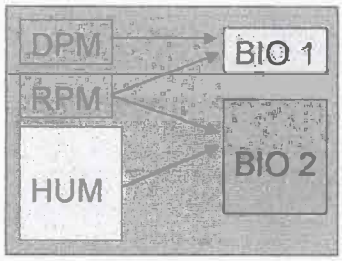
Three growth seasons of maize at Versailles

Ostle et al. Unpublished

Proportion of new C in the Fumigation-Extration Microbial Biomass C pool



Modelling microbial C, within the frame of ROTHC



balesdent 10/2001

Conclusions

1. Acquérir les données d'entrée indispensables
   - UN ESTIMATEUR DE PRODUCTION DE L'AGROSYSTEME
   - CONNAITRE L'HISTORIQUE DE L'AGROSYSTEME

2. Limites :
   - mauvaise simulation du carbone total dans l'absolu (+/-30%)
     (spécificités pédo, carbone stable, apports souterrains ...)
   - application à des comparaisons entre sites, productions,traitements
   - la description de l'effet de l'humidité du sol est très imparfaite
   - les entrées souterraines sont difficiles à estimer

3. Les fractions granulo grossières et la respiratioon en condition contrôlée peuvent aider

4. **Modélisez !**

balesdent 10/2001

SEQUESTRATION DU CARBONE DANS LES SOLS TROPICAUX
EFFET DU SEMIS DIRECT AU BRESIL

CH. FELLER

Séquestration du carbone dans les sols tropicaux
Effet du semis direct au Brésil

Centro de Energia Nuclear na Agricultura — cena
Embrapa Arroz e Feijão
CIRAD
IRD

Compartiments de C dans le sol

- Pourquoi étudier compartiments de C ?
- Stockage et turnover du C sous semis direct
- Trouvez-moi un compartiment stable !
- Localisation et protection du C
- Méthodologies à considérer ?

Pourquoi étudier compartiments de C ?

- Raisons névrotiques

Le « plaisir absolu » des « obsédés » du fractionnement :
* les besogneux : fractions chim., biol., physiques
* les ingénieux : fractions conceptuelles
* les ingénieux-besogneux : modéliser le mesurable

- Raisons scientifiques

* quantifier certains flux. Ex : racines
* préciser mécanismes. Ex : faune-agrégation-SeqC
* localisation et dynamique C séquestré

Mais, d'abord, vérifier qu'il y a stockage C avec semis direct

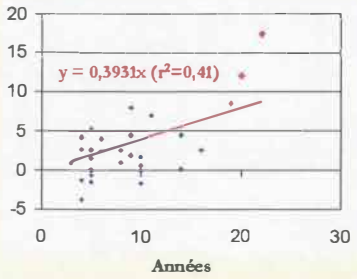
Compartiments de C dans le sol

- Pourquoi étudier compartiments de C ?
- Stockage et turnover du C sous semis direct
- Trouvez-moi un compartiment stable !
- Localisation et protection du C
- Méthodologies à considérer ?

Stockage et turnover du C sous semis direct

Stockage C : situations tropicales et subtropicales

ΔC (SD-SC) t/ha



C séquestré

0,4 t C /ha /an

Stockage et turnover du C sous semis direct

Temps moyen de résidence (TMR) du C avec semis conventionnel (SC) ou semis direct (SD). Situations tempérées (approche ^{13}C).

Référence	Durée exp. (ans)	TMR	
		SC	SD
Balesdent et al. (1990)	17	55	127
Clapp et al. (2000)	11	73	118
		72	54
Ryan et al. (1995)	5	14	26
Six et al. (1998)	26	44	73

Compartiments de C dans le sol

Pourquoi étudier compartiments de C ?

Stockage et turnover du C sous semis direct

Trouvez-moi un compartiment stable !

Localisation et protection du C

Méthodologies à considérer ?

Trouvez-moi un compartiment stable !

- Pour l'ingénieux : facile

je modélise avec :

* 2 compartiments : jeune, vieux
* 3 compartiments : actif, lent passif

… et ça marche toujours !

- Pour le besogneux : plus difficile

la MOS est un continuum (du particulaire au colloïde) et ne se laisse pas fractionner facilement

* jamais de compartiments purs, des tendances
* chacun sa méthode selon l'objectif du jour

… et ça marche parfois !

Trouvez-moi un compartiment stable !

- Trois grandes approches
  * de type « textural » (sable, limon, argile)
  * de type « structural » (macro- et microagrégat)
  * de type « particulo-structural » (MOP, intra- et extra-agrégat)

- et quelques autres …
  * de type « densimétrique » (liée-libre, légère-lourde)
  * de type « humique »
  * etc.

Trouvez-moi un compartiment stable !

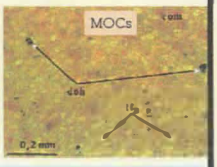
Différentes approches

Ages moyens de différentes fractions biologiques, physiques et chimiques, (d'après Balesdent)

Fraction	Age moyen (années)
- BM	< 1
- MOP 200-2000 µm	7
- MOP 50-200 µm	15
- MO soluble à froid	30
- Fraction 0-50 µm totale	70
* MO soluble à chaud	50
* AH	65
* Résidu hydrolyse acide	80
* Résidu pyrolyse 510°	85
* AF	95
* Résidu H_2O_2	110

Trouvez-moi un compartiment stable !

Approche « texturale » : FGMO



Tamanho (µm)	200-2000	50-200	20-50	2-20	0-2
C/N	26	21	16	13	9
Xilose/Manose	4,7	3,4	1,8	0,8	0,5

D'après Feller, 1995

Trouvez-moi un compartiment stable !

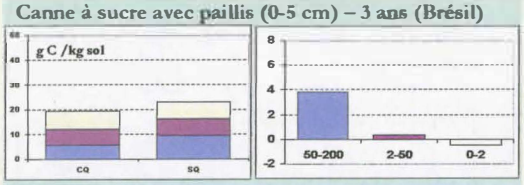
Approche « texturale » : turnover FGMO.

Tab. - Nombre d'années pour que 50 % du C de la fraction provienne de la nouvelle végétation (y)

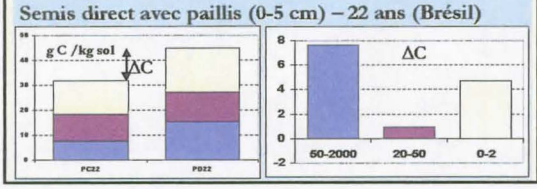
Région	Nbre sites	Teneurs en argile (%)	Nbre années Expérience	Nombre années pour y% = 50		
				Sable	Limon	Argile
Temp.	4	11-23	11-50	25	45	60
Trop.	4	5-25	6-21	12	16	22
Temp/Trop				2,1	2,8	2,7

Trouvez-moi un compartiment stable !

Canne à sucre avec paillis (0-5 cm) – 3 ans (Brésil)



Semis direct avec paillis (0-5 cm) – 22 ans (Brésil)



Trouvez-moi un compartiment stable !

Approche « structurale » : FGAg

- Macroagrégats stables à l'eau : M (>200 ou 250 µm)
- Microagrégats stables à l'eau : m (< 200 ou 250 µm ou de taille 50-250 µm)

(d'après Six and Jastrow, 2001)

Région	Agrosystème (ref.)	TMR-M	TMR-m
Tropicale	Pâturage (1)	60	75
Tempérée	Pâturage (2)	140	412
Tempérée	Soja (3)	1,3	7,0
Tempérée	Maïs (4)	14	61
Tempérée	Maïs (5)	42	691
Tempérée	Blé-jachère / SD (6)	27	137
Tempérée	Blé-jachère / SC (6)	8	79
	Moyenne ± e.t.	42 ± 18	209 ± 95

- Skjemstad et al. 1990, (2) Jastrow et al. 1996, (3) Buyanovsky et al. 1994, (4) Monreal et al. 1997, (5) Angers et Giroux 1996, (6) Six et al. 1999)

Compartiments de C dans le sol

Pourquoi étudier compartiments de C ?

Stockage et turnover du C sous semis direct

Trouvez-moi un compartiment stable !

Localisation et protection du C

Méthodologies à considérer ?

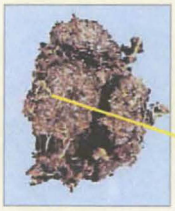
Localisation et protection du C

Trois types de protection invoqués : Méthodes

- physico-chimique (par colloïdes minéraux) : FGMO
- biochimique (molécule récalcitrante) : Chimie, Spectro
- physique (par agrégats) : FGAg + localisation MOP

Localisation et protection du C

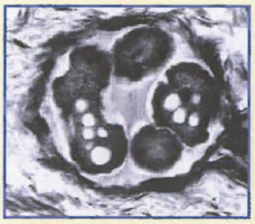
Protection de différentes formes de matière organique dans les agrégats



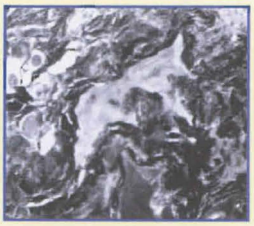
Agrégats avec débris végétaux

Localisation et protection du C

Protection de différentes formes de matière organique dans les agrégats



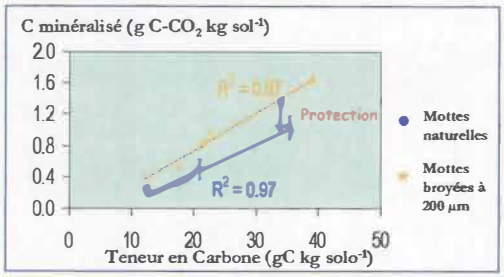
Microagrégats bactériens



Microagrégats avec MO amorphe

Localisation et protection du C

Quantification de la protection par tests de minéralisation en laboratoire. Cas d'un Vertisol



D'après Chevallier et al., 1999

Localisation et protection du C

Quantification de la protection par tests de minéralisation en laboratoire. Exemples de semis direct pour sols à argile 1:1

D'après (1) Beare et al. 1994, et (2) Bossuyt et al., soumis

Type d'agrégats	Traitement (ref.)	C (%)	C minéralisé : rapport Broyé/Intact
Macro-agrégats	SD (1)	2,46	1,30
	SC (1)	1,35	1,17
	SD (2)	2,27	1,20
	SC (2)	1,01	1,17
Micro-agrégats	SD (2)	2,27	1,76
	SC (2)	1,01	1,37

Localisation et protection du C

Trois types de protection invoqués : Méthodes

- physico-chimique (par colloïdes minéraux) : FGMO
- biochimique (molécule récalcitrante) : Chimie, Spectro
- physique (par agrégats) : FGAg + localisation MOP

Localisation et protection du C

La localisation des MOP :
- MOPe : externes aux agrégats
- MOPi : internes aux agrégats

Les diverses approches :
- strictement densimétriques : Golchin et al.
- granulo-densimétriques : Puget et al., Six et al., etc.

Localisation et protection du C

Données de Golchin et al., 1995
- Fle(1,6) : fraction libre (d<1,6) externe aux agrégats
- FLi(1,6) : fraction libre (d<1,6) interne aux agrégats

Origine du C et turnover (approche ^{13}C)

Situation	Fraction	Origine C	
		Pâturage	Forêt
Forêt T0	FLe	0	100
	FLi	0	100
Pâturage T35	FLe	85	15
	FLi	38	62
Pâturage T83	FLe	97	3
	FLi	39	61

Localisation et protection du C

Formes chimiques de C (SM-RMN ^{13}C)

Situation	Fraction	Type de C			
		Carbonyle	Aromatique	O-Alkyle	Alkyle
Forêt T0	FLe	6	24	52	20
	FLi	6	31	40	33
Pâturage T35	FLe	8	15	63	15
	FLi	9	33	30	30
Pâturage T83	FLe	5	13	68	14
	FLi	7	35	37	20

Conclusions. La fraction libre interne aux agrégats est :
- plus stable
- plus aromatique : humification et/ou héritage « Char »

Localisation et protection du C

La localisation des MOP
pour différentes classes d'agrégats.

Travaux de Puget et al., Six et al., etc., 1995 à 2001

* MOPe (> 200 µm) : peu protégées, proche matériel végétal initial, TMR faible
* MOPe (50-200 µm) « jeunes » assurent la stabilisation des macroagrégats

* MOPi (> 200 µm) : TMR ?
* MOPi (50-200 µm) : fortement protégées, plus aromatiques, TMR élevé

Compartiments de C dans le sol

Pourquoi étudier compartiments de C ?

Stockage et turnover du C sous semis direct

Trouvez-moi un compartiment stable !

Localisation et protection du C

Méthodologies à considérer ?

Méthodologies à considérer …

1. Pour une première évaluation des formes et de la durabilité du C séquestré :
→ FGMO (approche « texturale »)
2. Pour une localisation plus détaillée des formes de C séquestré :
→ Croisement de méthodes FGMO/FGAg/MOP
3. Pour une quantification facile du C séquestré sous forme de « Char » et estimation de son turnover : →?

MERCI,
et rendez-vous à demain avec les « ingénieux » et « besogneux » pour une poursuite opérationnelle de cette discussion !

DETERMINATION DES STOCKS DE CARBONE DES SOLS DES PETITES ANTILLES (Martinique, Guadeloupe)

E. BLANCHART – M. BERNOUX

SEMINAIRE
GESSOL

PROJET GESSOL ANTILLES

Déterminants des stocks de carbone des sols des Petites Antilles (Martinique, Guadeloupe).
Alternatives de séquestration du carbone et spatialisation des stocks actuels et simulés

Coordinateurs : E. Blanchart et M. Bernoux (IRD)

PROJET GESSOL ANTILLES

Participants

- IRD-BOST : Eric Blanchart, Corinne Venkatapen
- IRD/CENA-USP : Martial Bernoux
- MOST IRD/CIRAD : Bernard Barthès, Michel Fortier, Francis Ganry, Christine Larré-Larrouy, Robert Oliver, Christian Prat, Eric Roose
- INRA-Infosol : Dominique Arrouays
- INRA-APC : Yves-Marie Cabidoche, Jorge Sierra
- CIRAD-FLHOR : André Lassoudière
- CEMAGREF : Frédéric Saudubray

PROJET GESSOL ANTILLES

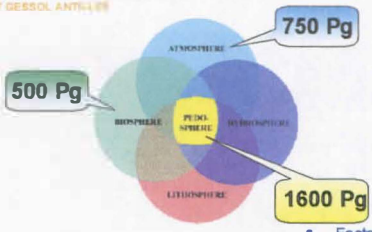
Introduction - Problématique

DETERMINANTS CLIMATIQUES | DETERMINANTS EDAPHIQUES | DETERMINANTS AGRONOMIQUES

→ SEQUESTRATION DU CARBONE

→ LIMITATION DE L'EFFET DE SERRE | AMELIORATION DE LA FERTILITE

PROJET GESSOL ANTILLES



Puits ou sources de carbone

Facteurs naturels et anthropiques

Nécessité d'études au niveau local / régional

Stockage système sol-plante	Emissions de gaz à effet de serre	Rôle MO x propriétés des sols

Bernoux, 1998

PROJET GESSOL ANTILLES

Martinique (géographie)

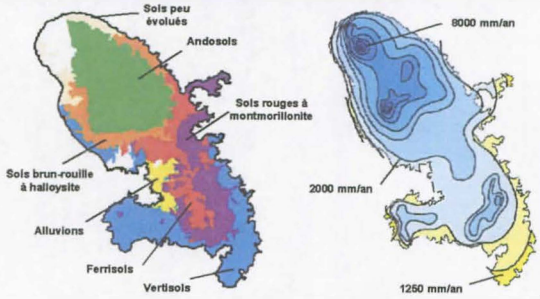
Coordonnées géographiques :
Martinique 14°50 ' N
61°00 ' O
Guadeloupe 16°20 ' N
61°50 O

Superficies :
Martinique 1080 km2
Guadeloupe 1780 km2

Climat (Lamentin) :
26,3° (température moy.)
2077 mm/an (précipitations)

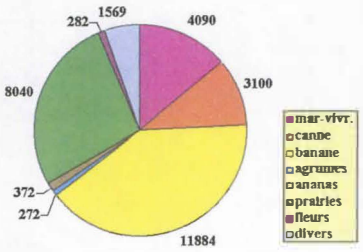
PROJET GESSOL ANTILLES

Sols et climat



Source Atlas de Martinique, 1977

Martinique (agriculture, 1998)

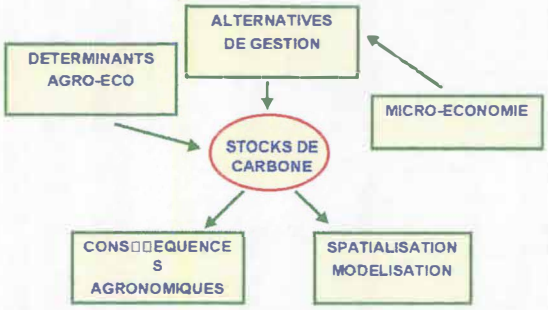


Utilisation du sol (ha)

TOTAL SAU : 33.690 ha

Source Agreste, 2000

Objectifs

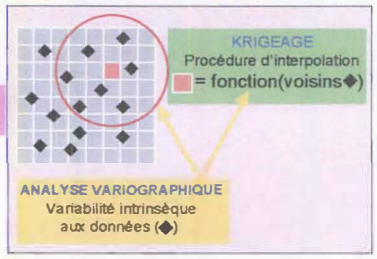


Déterminants
climatiques, pédologiques, agronomiques

- Valorisations de données existantes
- Estimations de données manquantes
- Données à acquérir
- Établissement d'une base de données C
  (climat, sols, modes d'occupation des terres)
- Analyses multivariées
- Hiérarchiser les déterminants

SPATIALISATION DES STOCKS DE C

Approches « géostatistiques »

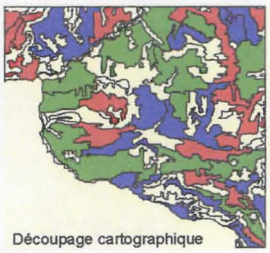


CARTE DE VALEURS ESTIMÉES
+
CARTE DES ERREURS ASSOCIÉES

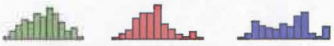
Bernoux, 1998

SPATIALISATION DES STOCKS DE C

Approches « cartographiques »



Découpage cartographique



Statistiques simples : moyenne, médiane, écart-type

Bernoux, 1998

Spatialisation
cartographie - géostatistique

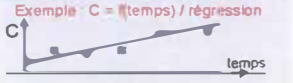
- Parcellaires passés (1970-1972-1974-1977-1980)
- Parcellaire actuel : carte des sols (IGCS)
  carte des cultures (DAF) ?
  4 zones de 50 km² chacune
  photos aériennes (2000)
  SPOT (2000)

Modélisation de l'évolution des stocks de C

« Situation - Modèle - (Théorie) »

Modèles « simples » & « non explicatifs »

Exemple : C = f(temps) / régression

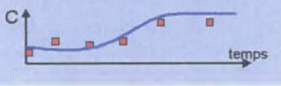


« Théorie - Modèle - Situation »

Modèles « complexes » & « explicatifs »

Exemples :

Modèles basés sur des compartiments fonctionnels



Modèle MORGANE

Bernoux, 1998

Alternatives de gestions

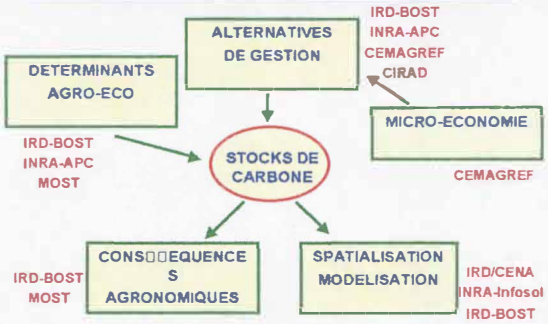
- Recherches d'alternatives de gestion des terres en vue d'une séquestration accrue du C dans le sol
- Quelques exemples :
  - intensification du travail du sol
  - brûlis vs non brûlis
  - agroforesterie
  - etc...

Micro-économie

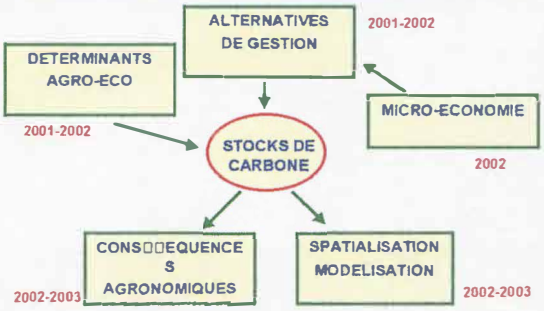
Conséquences agronomiques

- Diversité de la macrofaune du sol
- Stabilité des agrégats / érodibilité
- Protection physique de la MO contre la minéralisation

Rôle des partenaires



Calendrier



Résultats attendus et valorisation

- Pour les gestionnaires :
  - Bases de données géoréférencées, cartes C, modèles de prévision
  - Etat des stocks de C
  - Orientation des pratiques agricoles
- Sur le plan scientifique :
  - Publications scientifiques
  - Formation (thèse, stages)