

Pour publication dans :

C.R. Académie d'Agriculture de France, séance du 5 mai 2004.

<http://www.academie-agriculture.fr>.(on line)

## **Les bases écologiques d'une fertilité durable des écosystèmes tropicaux cultivés et leurs perspectives**

Christian Feller<sup>1</sup>, Yves-Marie Cabidoche<sup>2</sup>, Antoine Findeling<sup>3</sup>, Florent Maraux<sup>3</sup>, Aurélie Metay<sup>3</sup>

<sup>1</sup> IRD – Unité de Recherche “Séquestration du Carbone”- UR041, Montpellier, France.

<sup>2</sup> INRA – Unité de Recherche Agropédoclimatique de la Zone Caraïbe- URAPC, Petit-Bourg, Guadeloupe, France.

<sup>3</sup> CIRAD – Département AMIS, Programme Agronomie, Montpellier, France.

### **Résumé :**

Jusque vers les années 1980, la gestion raisonnée de la fertilité des sols était essentiellement basée sur celle des intrants. Les conséquences de telles pratiques n'ont pas tardé à se faire sentir, avec l'émergence au Nord, de problèmes environnementaux et, au Sud, l'insuffisance du « tout minéral » pour assurer une productivité durable des terres.

D'un système sol - plante, on passe à des systèmes climat-sol-plante-atmosphère dans lesquels toute modification dans l'une des composantes aura des conséquences sur les trois autres. L'objectif de ce travail est de montrer et d'illustrer sur les cycles du carbone, de l'azote et de l'eau comment les connaissances se sont organisées dans cette nouvelle perspective.

Sur un plan historique, la première approche quantifiée de la durabilité des systèmes de culture est le fait de l'agronome allemand Thaer, qui restera une référence pendant toute la première moitié du 19<sup>ème</sup> siècle, et qui introduira même les premiers modèles.

Depuis, bien du chemin a été parcouru, et on dispose de nombreux modèles, dans lesquels on peut prédire les effets d'un paramètre (ou de ses variations) sur les variables agri-environnementales.

On choisira nos exemples parmi de nouveaux systèmes de culture, dits « agro-écologiques », qui donnent un rôle prépondérant à l'apport de matières organiques au sol (cultures semées à cet effet, ou résidus de culture)

On étudiera successivement l'effet physique du mulch sur le fonctionnement hydrique et thermique, l'effet biologique du mulch sur les cycles de C et N et sur l'activité biologique du sol et de sa faune.

Le modèle PASTIS intègrera ces effets, en devenant le modèle PASTIS-paillis, qui permet de simuler sur des pas de temps courts le fonctionnement (eau, C, N) de systèmes de culture utilisant des paillis de résidus. D'autres modèles, comme DAYCENT, avec d'autres pas de temps et conditions de paramétrage, prédisent les flux de gaz à effets de serre. Adossés et validés sur des mesures ponctuelles, les modèles permettent de fiabiliser des appréciations de flux et de bilans par une approche quantitative, et donc de porter des jugements sur les effets attendus des pratiques agricoles. Ils sont aussi utilisés pour aider la décision, fixer des seuils, raisonner des stratégies, tant au Nord qu'au Sud.

Sur le plan de la compréhension des cycles biogéochimiques au sein du système sol-plante-atmosphère, les priorités de recherche concernent aussi bien un approfondissement des processus fondamentaux, que l'organisation des connaissances nouvelles dans des outils aux architectures nécessairement de plus en plus complexes, visant à quantifier les effets des modalités de gestion sur les sorties (production / environnement) du système.

1 **Mots-Clés : écosystèmes tropicaux, agronomie, environnement, carbone, biologie du sol,**  
2 **modélisation, mulch, durabilité**

3  
4 **Summary:**

5 Until the 1980 decade, the integrated management of soil fertility was primarily based on the  
6 inputs. The consequences of such practices quickly arose, with emergence in the North of  
7 environmental problems and, in the Southern countries, the limits of the "mineral" approach  
8 to ensure a sustainable productivity of agriculture.

9 From a soil-plant system, the more and more complex scientific questions led to a climate-  
10 soil-plant-atmosphere system, in which any change in one of the component will have  
11 consequences on the three others. The objective of this work is to show and illustrate with the  
12 cycles of carbon, nitrogen and water how knowledge has been reorganized in this new scope.

13 From an historical point of view, a German agronomist (Thaer) first developed a quantified  
14 approach of the sustainability of farming systems at the beginning of the 19<sup>th</sup> century. This  
15 approach, including the introduction of conceptual modelling, would remain a reference  
16 during all first half of the 19<sup>th</sup> century.

17 Since then, significant improvements have been achieved and many mathematical models are  
18 available, with which one can predict the effects of a parameter (or its variations) on key  
19 agronomic and environmental variables.

20 The presented examples are chosen among new farming systems known as "agro-ecological",  
21 which focus on the organic matter contribution to the soil associated with cover crops or  
22 restitution of crop residues.

23 The physical effect of the mulch on hydric and thermal variables, the biological effect of the  
24 mulch on the C and N cycles and on the soil activity (including fauna) will be successively  
25 studied.

26 The PASTIS model has been adapted to account for these effects and becomes the model  
27 Pastis-paillis, which makes possible to simulate short time variation of the water, C and N  
28 budgets of farming systems using crop residues. Other models, like DAYCENT, with larger  
29 time steps and different parameters setting, aim at predicting greenhouse gases emissions.

30 Based on, and validated with specific measurements, the models make it possible to calculate  
31 accurate estimation of fluxes and balances, and thus to establish relevant opinions on the  
32 environmental effects of such agronomic practices. They are also used to help decision  
33 making, to set thresholds, to reason strategies, in Northern and Southern countries.

34 In the field of the comprehension of the biogeochemical cycles within the soil-plant-  
35 atmosphere system, research mainly aims at a better knowledge of the fundamental processes,  
36 as well as organising the new knowledge into complex mechanistic models, with the final  
37 purpose of quantifying the effects of the cropping systems on key productive and  
38 environmental issues.

39 **Key-words: tropical ecosystems, modelling, agronomy, environment, carbon, soil**  
40 **biology, mulch, sustainability**

41  
42 **1. Introduction**

43  
44 Jusque vers les années 1980, la gestion de la fertilité était essentiellement ciblée sur celle des  
45 intrants, en quantités non limitantes (au moins pour les pays du Nord), afin de passer outre  
46 aux contraintes du milieu. Le choix et la gestion de ces intrants étaient basés sur : (i)  
47 l'établissement de bilans biogéochimiques au niveau du système sol-plante en vue de  
48 compenser les pertes au niveau du sol par des entrées égales ou supérieures dans le système,  
49 (ii) sur l'étude de la biodisponibilité des nutriments pour la plante, (iii) sur la recherche d'un  
50 rendement végétal maximum. Cette démarche générale pour les pays du Nord a été appliquée

1 dans les pays du Sud, même si, dans le meilleur des cas, on s'est efforcé de valoriser au mieux  
2 les ressources minérales locales.

3 Les conséquences de telles pratiques n'ont pas tardé à se faire sentir : au Nord, émergence de  
4 problèmes environnementaux forts (pollution des eaux de surface et de profondeur par les  
5 nitrates, pollution des eaux et des sols par les métaux lourds et molécules xénobiotiques,  
6 accroissement de l'érosion et colmatages en aval, etc.) et, au Sud, insuffisance du « tout  
7 minéral » pour assurer une productivité durable des terres. Par ailleurs, au Nord comme au  
8 Sud, le fait de considérer l'agriculture comme une activité intégrée dans la lutte contre l'effet  
9 de serre, va faire apparaître un changement radical d'attitude dans la gestion des  
10 agrosystèmes, avec deux conséquences majeures :

- 11 - la « maximisation » du rendement n'est plus l'objectif à atteindre, mais plutôt son  
12 « optimisation » à un niveau ne pénalisant que raisonnablement l'environnement,
- 13 - les ressources naturelles, et particulièrement biologiques, sont re-considérées, pour des  
14 effets attendus bénéfiques pour la planète en ce qui concerne ses ressources en sols,  
15 eaux, et au niveau de facteurs écologiques comme la biodiversité et les gaz à effet de  
16 serre.

17 D'un système sol-plante sans composante environnementale, on passe à des systèmes où  
18 l'ensemble des entrées et sorties est étudié, et pour lesquels les grands cycles  
19 biogéochimiques sont analysés, entre autres, en terme de recyclage. Ces nouveaux systèmes  
20 peuvent mettre en œuvre des restitutions organiques au sol importantes comme des déchets,  
21 des résidus de culture ou plantes de couverture, des arbres et leurs sous produits, etc.

22 Par simplification, nous regrouperons l'ensemble de ces pratiques sous le qualificatif  
23 générique de « agro-écologiques ». Ceci recouvre à la fois l'agriculture biologique,  
24 l'agroforesterie, le semis direct dans des couvertures végétales (systèmes SCV), les cultures  
25 associées, ou encore d'autres systèmes, tels que la culture de canne à sucre sans brûlis,  
26 maximisant les restitutions organiques.

27 Si les processus fondamentaux du fonctionnement du système sol-plante ne sont pas remis en  
28 cause, il y a par contre un renouvellement dans l'approche, tant au niveau des échelles que  
29 des systèmes : l'échelle temporelle de la période de croissance va devoir être complétée par  
30 des échelles pluriannuelles, voire pluridécennales ; le système eau-sol-plante est à intégrer  
31 dans un système climat-sol-plante-atmosphère plus vaste ; enfin, les échelles délimitées du  
32 pédon ou de la parcelle devront être ouvertes, tant à leur amont qu'à leur aval.

33

34 L'objectif de ce travail est de :

- 35 - montrer comment, à travers un bref aperçu historique, les connaissances se sont organisées  
36 dans cette nouvelle perspective,
- 37 - voir comment le paillis, un des éléments souvent rencontrés dans ces nouveaux itinéraires  
38 techniques, va interférer sur l'ensemble du fonctionnement du système sol-eau-plante-  
39 atmosphère,
- 40 - illustrer ces propos par quelques études actuelles sur les sorties agronomiques et  
41 environnementales de ces diverses pratiques,
- 42 - dégager quelques propositions de recherches prioritaires pour le futur.

43

## 44 **2. Etat des connaissances et conceptualisation du fonctionnement d'un écosystème**

45

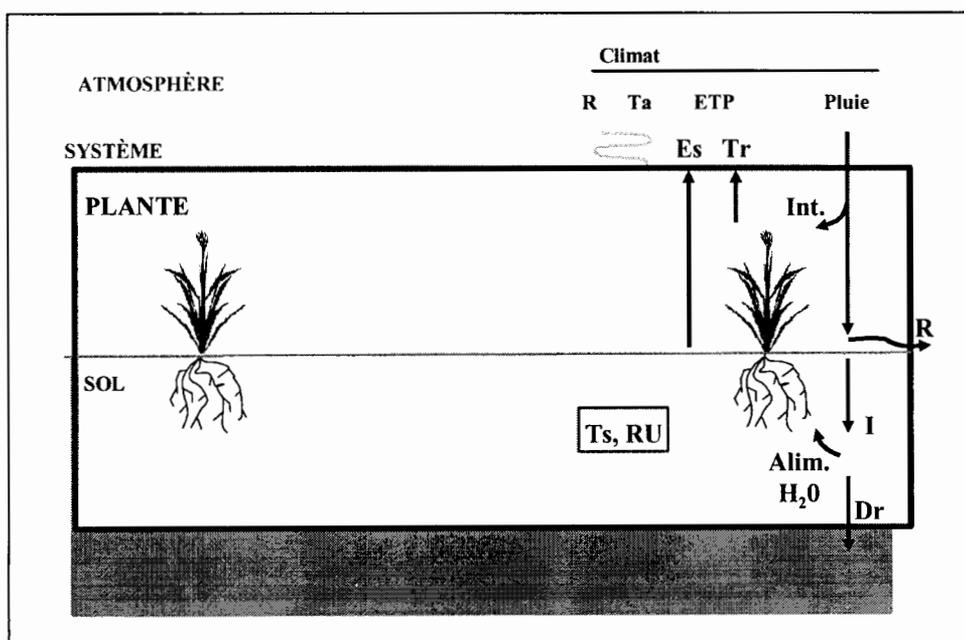
46 Nous centrerons notre exposé sur les cycles du carbone, de l'azote et de l'eau, à l'échelle de la  
47 parcelle. Une façon intéressante de suivre l'évolution des concepts et/ou l'analyse des  
48 processus pour la description de systèmes complexes comme les systèmes naturels est de  
49 suivre l'évolution de la modélisation de ces systèmes. En effet, selon Whistler et al. (1986),  
50 Boote et al. (1996, 1998) et d'autres auteurs, les modèles ont le triple intérêt : (i) d'être un

1 outil de recherche agronomique à partir d'une mise en forme des connaissances, (ii) d'aider à  
 2 l'interprétation des résultats, voire remettre en cause une loi admise (suite au  
 3 dysfonctionnement du modèle), (iii) d'être un outil pour le diagnostic agronomique, et, l'on  
 4 pourrait maintenant ajouter, environnemental.  
 5 Pour introduire le sujet, rappelons que, sur un plan historique, la première approche quantifiée  
 6 de la durabilité des systèmes de culture est le fait de l'agronome allemand A.D. Thaer, avec  
 7 son ouvrage sur « Les principes raisonnés d'agriculture » (1811-1816, édition française) qui  
 8 restera une référence pour les agronomes-praticiens pendant toute la première moitié du 19<sup>ème</sup>  
 9 siècle, voire même au-delà. Dans cet ouvrage basé sur une théorie qui s'avèrera partiellement  
 10 fausse - la « théorie de l'humus » - Thaer développe un système quantifié de l'analyse et de la  
 11 prédiction de la fertilité (à partir d'un important inventaire de données) basé sur un unique  
 12 indicateur de fertilité (des « degrés de fertilité ») utilisé à la fois pour : (i) quantifier les  
 13 propriétés du sol, (ii) estimer la productivité végétale et (iii) élaborer des bilans économiques  
 14 à l'échelle de l'exploitation. Il peut ainsi, sur des bases quantifiées, et à partir d'une typologie  
 15 des systèmes de culture développés en Allemagne, montrer quels systèmes sont durables ou  
 16 non, et proposer des alternatives raisonnées de modification des systèmes non durables. Il fait  
 17 même de la simulation et compare les résultats aux valeurs mesurées. C'est en quelque sorte,  
 18 avant l'heure, un modélisateur du fonctionnement des systèmes de culture de l'époque (Feller  
 19 et al., 2001, 2004). Il est intéressant de remarquer que le qualificatif de « raisonnée » appliqué  
 20 à l'agriculture est de nouveau à la mode avec « l'agriculture raisonnée » (Paillotin, 2000).  
 21 Venons-en donc à la deuxième moitié du 20<sup>ème</sup> siècle. L'essentiel des réflexions faites ci-  
 22 dessous s'appuient sur les articles suivants : Sinclair & Seligman (1996) et Brisson et al.  
 23 (2003, 2004).

### 2.1. Modélisation du fonctionnement du système sol-plante

26 Après les tous premiers modèles développés dans les années 1960-70 pour estimer l'impact  
 27 de l'interception de la lumière sur la photosynthèse et la croissance (de Wit, 1970), et les  
 28 cycles biogéochimiques au niveau de la parcelle cultivée, en référence au système sol (occupé  
 29 par les racines)-plante, la modélisation intègre dans les années 1970 l'alimentation hydrique  
 30 de la plante, à certains stades phénologiques puis durant le cycle entier (années 1980,  
 31 modèles SUCROS, TOMGRO) (Fig. 1).

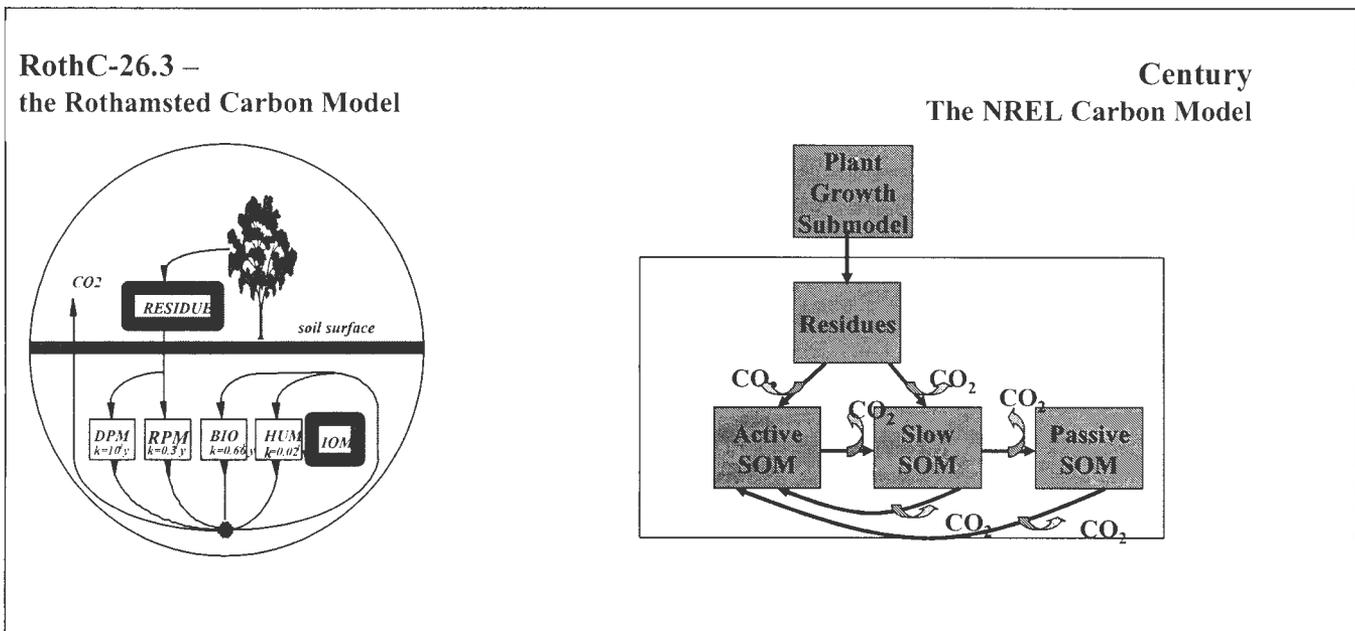
34 **Figure 1.** Schéma simplifié des premiers modèles de croissance d'une plante sous les seuls  
 35 effets des conditions climatiques



1 Puis un certain nombre de facteurs agronomiques sont pris en compte, dont la nutrition  
 2 minérale avec GOSSYM, DSSAT, CROPGRO. Faisant suite aux travaux précurseurs de  
 3 Jenny (1944), Hénin & Dupuis (1945), pour d'autres objectifs et à d'autres échelles de temps,  
 4 apparaissent parallèlement des modèles centrés sur le sol, en particulier la dynamique de  
 5 l'azote organique (Norg) ou de la matière organique du sol (MOS) font leur apparition,  
 6 comme le modèle anglais RothC (Jenkinson et Rayner, 1977) ou américain CENTURY  
 7 (Parton et al., 1987) (Fig. 2).

8  
 9  
 10  
 11

12 **Figure 2.** Deux modèles historiques de la dynamique de la matière organique dans les sols :  
 13 le modèle anglais RothC et le modèle américain Century. (Schémas respectivement adaptés  
 14 de Coleman & Jenkinson, 1996 et GEF-SOC program, 2002).

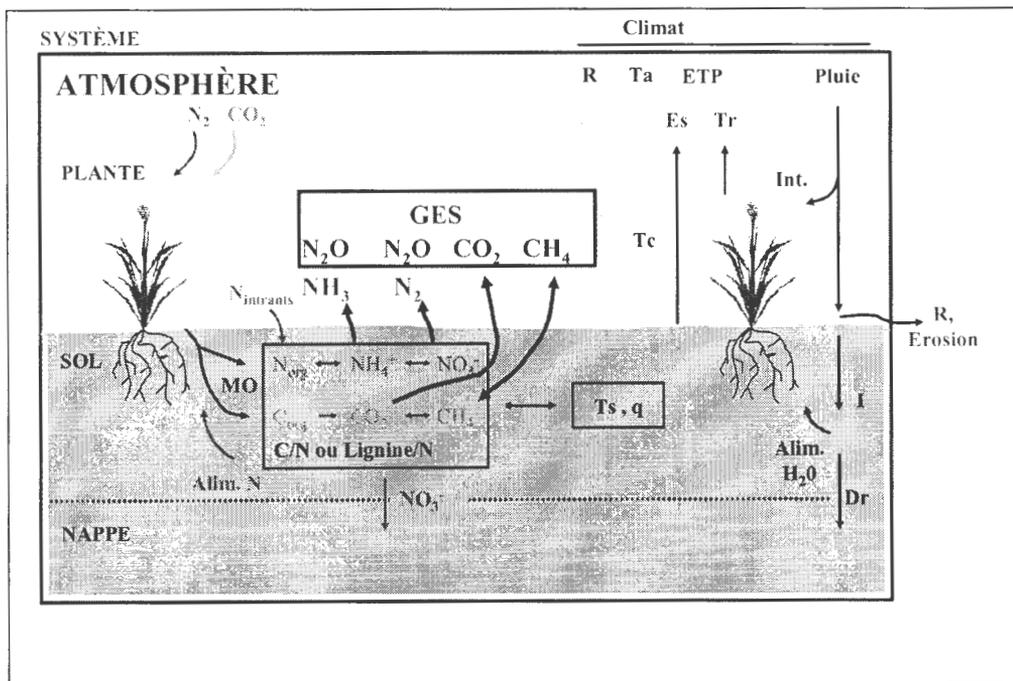


1 Les modules Norg ou MOS des ces types de modèles seront alors rapidement intégrés aux  
 2 modèles de croissance des plantes, pour tenir compte de la fourniture d'azote par le sol à la  
 3 plante : CERES (Jones & Kiniry, 1986) puis STICS (1980-2000) (Brisson et al., 2003) et de  
 4 nombreux autres.

5 Avec l'émergence de problèmes environnementaux de plus en plus cruciaux comme celui de  
 6 la lixiviation des nitrates et la pollution des nappes, ou encore les processus accélérés  
 7 d'érosions éolienne et hydrique au niveau de la parcelle, les modèles se complexifient et le  
 8 système considéré n'est plus uniquement le système sol-plante centré sur des seules sorties  
 9 plante et prenant seulement en compte la zone du sol colonisée par les racines, mais aussi les  
 10 transferts solides et liquides en surface (érosion, ruissellement) et de solutés vers les horizons  
 11 de profondeur du sol jusqu'à la roche-mère et la nappe. C'est le cas du modèle EPIC (Jones et  
 12 al, 1991), qui, couplé avec des modèles hydrologiques, permet de simuler les transferts de  
 13 matière à des échelles beaucoup plus petites que celle de la parcelle cultivée (pente, petit  
 14 bassin-versant). A noter aussi que EPIC comprend un module « économie » intégrant les  
 15 coûts de dégradation ou de conservation des sols (Williams, 1989). On entre dans l'ère des  
 16 modèles agro-environnementaux.

17 Depuis 2000, avec l'importance accrue consacrée au problème des interactions entre mode de  
 18 gestion des terres et flux de gaz à effet de serre (GES), on voit les modèles se complexifier à  
 19 un niveau supplémentaire pour intégrer les interactions sol-plante-atmosphère concernant les  
 20 GES. En France, des modèles dérivés de PASTIS (Lafolie, 1991) comme PASTIS-paillis  
 21 (Findeling, 2001 et travaux en cours), ou aux USA dérivés de CENTURY comme  
 22 DAYCENT (Del Grosso et al., 2001), sont représentatifs de cette démarche (Fig. 3).

23  
 24 **Figure 3.** Schéma simplifié des modèles prenant en compte l'alimentation hydrique et  
 25 minérale de la plante, la dynamique de la matière organique du sol et divers transferts tels  
 26 que les eaux de lixiviation et de ruissellement, et les flux de gaz à effet de serre entre le  
 27 système sol-plante et l'atmosphère.



1  
2 On est donc passé de modèles simples de croissance de la plante soumise à des contraintes  
3 climatiques (Fig. 1), à des modèles très complexifiés visant à appréhender l'ensemble du  
4 système sol-plante-atmosphère, avec des sorties à la fois agronomiques et environnementales  
5 (Fig. 3). On perçoit bien ainsi que l'évolution du questionnement scientifique, voire sociétal,  
6 représente aussi une « driving force » pour la modélisation, qui, en retour, va servir d'objet  
7 formel intégrant une grande partie des connaissances acquises, au-delà des autres fonctions  
8 déjà mentionnées.

9 Finalement, le défi relevé par la recherche durant ces 30 dernières années a été, outre  
10 l'indispensable approfondissement des connaissances des processus fondamentaux, un  
11 formidable accroissement du nombre d'interactions prises en compte dans des systèmes de  
12 plus en plus complexes et leur intégration dans des modèles.

### 14 3. Avec les pratiques agro-écologiques, un niveau supplémentaire de complexification

15  
16 Les nouveaux systèmes de culture, dits « systèmes agro-écologiques », mis généralement en  
17 œuvre en régions intertropicales, en vue de répondre à la fois à des critères d'augmentation de  
18 la productivité, et d'amélioration de l'environnement, ont en commun :

- 19 - l'apport de matières organiques au sol, sous forme morte ou vivante, enfouies ou  
20 laissées à la surface du sol,
- 21 - la recherche de l'économie du travail du sol et d'intrants, tels que engrais azotés et  
22 pesticides par une gestion plus biologique des sols (apports d'azote par des  
23 légumineuses, lutte biologique contre les adventices etc.),
- 24 - une valorisation *in situ* de l'eau dans les régions à contraintes hydriques,
- 25 - et de plus en plus souvent, l'association de divers peuplements végétaux sur la même  
26 parcelle cultivée : culture et arbres (agroforesterie), culture et plante de couverture  
27 (semis direct dans couverture végétale, SCV), diverses plantes cultivées (cultures  
28 associées).

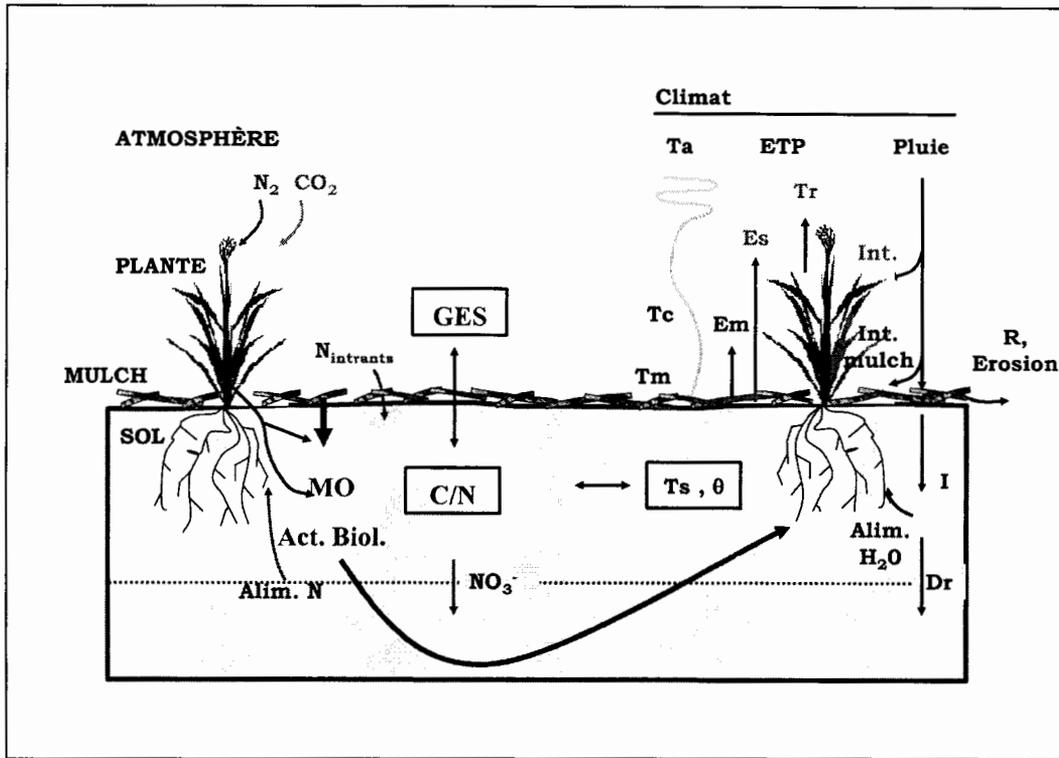
29  
30 Bien souvent, pour de nombreuses alternatives, l'itinéraire technique implique la mise en  
31 œuvre d'un mulch pailleux. Nous utiliserons cet exemple pour montrer les nouveaux défis qui  
32 sont alors lancés à la recherche pour mieux décrire quantitativement le fonctionnement des  
33 systèmes.

34 Quels vont être les effets d'un mulch sur le fonctionnement du système plante-sol-atmosphère  
35 tel que représenté sur la figure 3 ? Ceci est commenté à partir d'un schéma conceptuel  
36 représenté sur la figure 4 et illustré par des données mesurées sur diverses situations.

#### 39 a) Effet physique du mulch sur le fonctionnement hydrique et thermique

40  
41 Le mulch est un compartiment de plus dans le système qui va : (i) directement intercepter,  
42 stocker et évaporer les eaux atmosphériques (Bussière & Cellier, 1994), (ii) indirectement  
43 modifier fortement le bilan et les flux hydriques au niveau du sol, donc aussi de la plante : on  
44 observe généralement une forte diminution du ruissellement, donc une augmentation de  
45 l'infiltration, et, par voie de conséquence, une plus grande réserve d'eau pour la plante. C'est  
46 le cas de mulchs en système SCV étudiés par Findeling (2001) au Mexique ou Reyes (2002)  
47 au Brésil. Un des effets environnementaux indirects bien connu est la très forte diminution de  
48 l'érosion (Scopel et al. soumis).

1 **Figure 4.** Modèle identique à celui de la figure 3 mais complexifié par la présence d'un  
 2 mulch  
 3



25  
26  
27 Le mulch tamponne aussi fortement les variations journalières de température du sol  
 28 (situation SCV au Mexique, Findeling 2001) et influe donc, via la modification des transferts  
 29 de chaleur (Bussièrè & Cellier, 1994), sur les variables telles que les jours-thermiques et  
 30 l'évapotranspiration, utilisés dans la plupart des modèles.

31  
32 b) Effet biologique du mulch sur les cycles de C et N et sur l'activité biologique du sol

33  
34 b1. Mulch et niveau des activités biologiques

35 Le mulch, de par sa décomposition au cours du cycle cultural, va modifier les activités  
 36 microbiennes et les cycles de C et N et donc intervenir sur un certain nombre de sorties  
 37 agronomiques et environnementales telles que la disponibilité de l'azote pour la plante, la  
 38 lixiviation des nitrates, les flux de GES.

39 Par ailleurs, les mulchs ont très souvent un effet spectaculaire sur les populations fauniques  
 40 du sol (densités, diversités, biomasses et activités) comme le montre l'exemple, pour la canne  
 41 à sucre récoltée sans brûlis, d'un important mulch foliaire laissé à la surface du sol après  
 42 récolte (de Campos, 2003). En moins de 3 années de cette pratique, les populations de faune  
 43 du sol vont être totalement transformées par rapport à ce qu'elles sont sous la pratique  
 44 traditionnelle de brûlis avant récolte (absence de mulch), et se rapprocher dans leur biomasse  
 45 et biodiversité de situations forestières (Feller, 2001).

46  
47 b2. Rétroaction de la faune sur la décomposition du mulch et le fonctionnement hydrique  
 48 du sol.

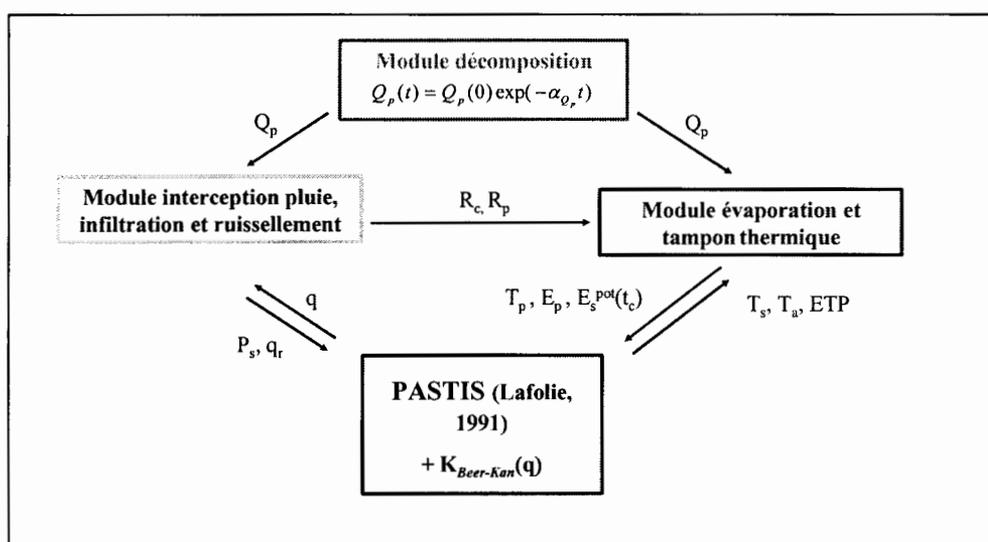
1 Le mulch, par ses effets sur la faune du sol, va aussi agir rétroactivement sur deux importants  
 2 processus de fonctionnement du système (Fig. 4) : l'accélération de la décomposition des MO  
 3 restituées, la modification des porosités du sol, donc des flux hydriques.

4 Le premier processus est illustré avec l'exemple des vitesses de décomposition dans le sol de  
 5 racines de ligneux dans des systèmes à jachères au Sénégal (Manlay et al. 2004). Cette vitesse  
 6 se trouve très fortement ralentie, pratiquement divisée par 2, lorsque l'on empêche la  
 7 macrofaune de taille supérieure à 2mm de participer à la décomposition des racines.

8  
 9 L'effet sur le fonctionnement hydrique est illustré par les travaux de Léonard (2000), Léonard  
 10 & Rajot (1998, 2001) pour des sols sableux encroûtés au Niger, où le ruissellement est  
 11 extrêmement important avec des conséquences très négatives en terme d'érosion et de reprise  
 12 de la végétation en début de saison des pluies dans des systèmes à jachères. Dans l'optique de  
 13 l'amélioration des jachères traditionnelles, un seul paillis de fin de saison sèche a été testé  
 14 visant à quantifier le rôle de la faune du sol sur l'infiltration, avec des expérimentations visant  
 15 à éliminer (par traitement biocidal) ou non le rôle des termites. Les auteurs notent un  
 16 spectaculaire effet positif du mulch sur l'infiltration et d'autant plus marqué que l'action des  
 17 termites est conservée. Cet effet d'un simple mulch + termites initial, par l'action positive sur  
 18 la végétation herbacée qui se réinstalle alors beaucoup plus facilement, est encore observable  
 19 trois années après la mise en place du paillis.

20  
 21 L'importance des effets directs ou indirects du mulch est tel, qu'il est nécessaire de  
 22 complexifier les modèles existants pour les rendre opérationnels dans l'analyse du  
 23 fonctionnement de ces nouveaux systèmes. C'est ce qui est représenté à la figure 5.

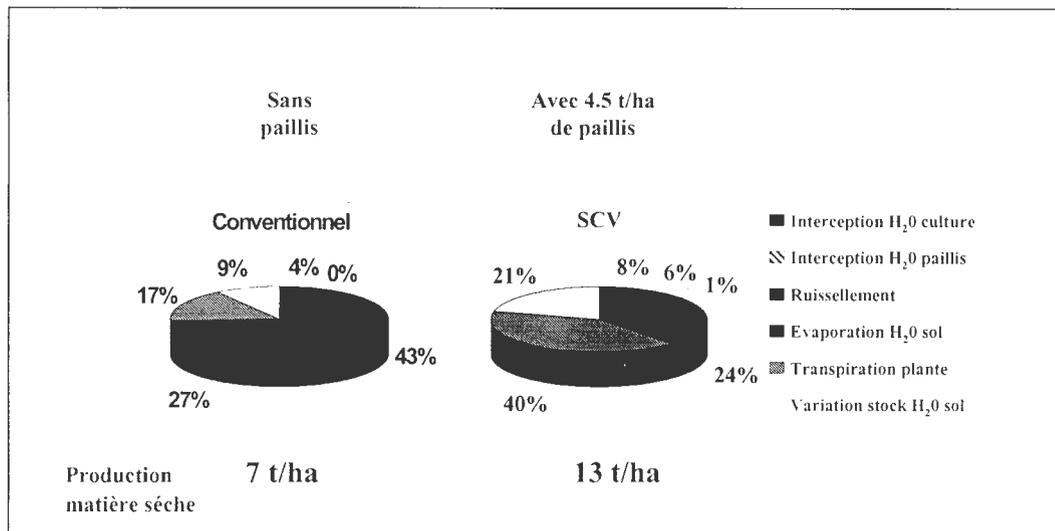
24  
 25 **Figure 5.** Modèle PASTIS modifié par l'ajout de nouveaux modules afin de le rendre  
 26 opérationnel avec la présence d'un mulch.



27  
 28  
 29  
 30  
 31  
 32  
 33  
 34  
 35  
 36  
 37  
 38  
 39  
 40  
 41  
 42  
 43  
 44 Le modèle PASTIS (Lafolie, 1991) a été modifié en « PASTIS-paillis » (Findeling, 2001) par  
 45 l'addition d'un module de décomposition du mulch qui agit sur les modules initiaux de  
 46 PASTIS via les modules des fonctionnements hydrique (interception pluie, etc.) et thermique  
 47 (évaporation et tampon thermique). Le modèle PASTIS-paillis a été appliqué avec succès  
 48 pour simuler la productivité en matière sèche et le bilan hydrique pour le système SCV au  
 49 Mexique déjà cité (Fig. 6). L'effet du système SCV, par rapport au système conventionnel, se  
 50 traduit par une forte diminution du ruissellement (donc une augmentation de l'infiltration),

1 une plus grande réserve utile pour la plante qui conduit à une augmentation de la productivité  
 2 en MS, via un fort accroissement de la transpiration de la plante.

3  
 4  
 5 **Figure 6.** Un exemple de sorties du Modèle PASTIS-Paillis pour des systèmes de culture de  
 6 type Conventionnel (travail du sol et non paillis) et de type Semis direct dans couverture  
 7 végétale (SCV, non travail du sol et paillis) au Mexique (Findeling, 2001).



#### 4. Pratiques agro-écologiques et « séquestration du carbone » dans le sol

29 Nous venons d'illustrer la modélisation du fonctionnement d'un système SCV, par rapport à  
 30 des sorties agronomiques. Qu'en est-il concernant des sorties environnementales, telle que la  
 31 séquestration du C pour des alternatives agro-écologiques tropicales ?

32 En fait, il faut signaler que peu de travaux ont concerné la modélisation de ces systèmes  
 33 incluant les flux de GES en milieu tropical. Les efforts de modélisation ont surtout porté sur  
 34 des situations tempérées, par exemple avec l'utilisation du modèle DAYCENT pour prédire  
 35 les flux de GES pour différents systèmes de culture aux USA (Del Grosso et al., 2001). Pour  
 36 les situations tropicales, les équipes sont dans la phase d'accumulation de données mesurées,  
 37 et nous allons en présenter quelques exemples.

38 Sous la notion de « séquestration du carbone », nous incluons deux aspects (Bernoux et al.,  
 39 sous presse) :

- 40 - d'une part, la variation du stock de C du sol sous l'effet d'une pratique dite  
 41 « séquestrante ». Ceci réfère à la fixation de C- CO<sub>2</sub> de l'atmosphère par le sol, sous  
 42 forme de MO, via les restitutions par la plante,
- 43 - d'autre part, la variation des flux des GES autres que CO<sub>2</sub> (principalement CH<sub>4</sub> et  
 44 N<sub>2</sub>O) suite au changement de pratique testé. Le bilan de ces flux peut aller dans le sens  
 45 d'une fixation par le système sol-plante ou d'une émission. Compte tenu du pouvoir  
 46 de réchauffement global (PRG) beaucoup plus important de CH<sub>4</sub> et N<sub>2</sub>O que celui de  
 47 CO<sub>2</sub> (respectivement, environ 20 et 300 fois supérieurs), on comprend qu'il suffit  
 48 d'une faible émission supplémentaire de CH<sub>4</sub> et/ou N<sub>2</sub>O par la pratique séquestrante  
 49 pour diminuer fortement l'effet positif qui a pu être acquis par un stockage  
 50 supplémentaire de C dans le sol. Afin de pouvoir sommer arithmétiquement les effets

1 de variations de stocks de C du sol et ceux des flux des autres GES, on exprime ces  
2 derniers en « équivalents C- CO<sub>2</sub> » (eq.C-CO<sub>2</sub> ) prenant en compte les PRG des GES  
3 autres que CO<sub>2</sub>.

4  
5 a) Stockage du C dans le sol par les pratiques agro-écologiques

6  
7 Sans entrer dans le détail, et comme cela a été rapporté récemment à diverses reprises à  
8 l'Académie d'Agriculture de France, les pratiques agro-écologiques conduisent souvent en  
9 milieu tropical à un stockage supplémentaire de C variant entre 0 et plus de 1000 kg C/ha/an,  
10 avec, peut-être, des valeurs moyennes autour de 500 kg C/ha/an.

11 Toutefois, il reste une question majeure en suspens: quels sont les effets de ces pratiques sur  
12 les bilans en autres GES exprimés en eq.C-CO<sub>2</sub> ? Nous étudierons le cas des flux de N<sub>2</sub>O.

13  
14 b) Flux de N<sub>2</sub>O associés à différentes pratiques agro-écologiques

15  
16 N<sub>2</sub>O peut-être émis au cours des 2 étapes du cycle de l'azote : nitrification et dénitrification  
17 (Firestone & Davidson, 1989). Si l'importance de la dénitrification dépend fortement des  
18 conditions d'anoxie du sol (dénitrification élevée à partir de 80 % de la porosité totale  
19 occupée par l'eau), l'émission de N<sub>2</sub>O au cours du processus de nitrification peut avoir lieu  
20 dans des sols bien aérés. Autrement dit, le risque d'émission de N<sub>2</sub>O existe potentiellement  
21 pour tous les sols, indépendamment de leur état hydrique. Rappelons que les autres facteurs  
22 intervenant sur les processus d'émission de N<sub>2</sub>O sont : la température, les teneurs en NH<sub>4</sub> et  
23 NO<sub>3</sub>, les teneurs en MO et particulièrement en MO solubles.

24 Nous rapportons ci-dessous quelques résultats récents obtenus dans le cadre de situations  
25 agro-écologiques tropicales.

- 26 - Système SCV. Au Brésil, dans l'Etat de Goias, en système SCV, sur un sol  
27 ferrallitique argileux très bien drainant, on n'observe pas de différences significatives  
28 dans les émissions de N<sub>2</sub>O entre un traitement Conventionnel (labour superficiel et  
29 non restitution des résidus de récolte) et deux traitements SCV (rotation riz-crotalaire  
30 ou soja-bracchiaria) pour un même niveau de fertilisation minérale. La différence  
31 moyenne des émissions de N<sub>2</sub>O entre les traitements Conventionnel et SCV varie de 0  
32 à 20 kg eq.C-CO<sub>2</sub>/ha/an et est donc négligeable par rapport à la séquestration du C  
33 dans le sol estimée à 350 kgC/ha/an (Metay, thèse en cours).
- 34 - Système canne à sucre. Au Brésil, dans l'Etat de São Paulo, en système cannier et sur  
35 un sol ferrallitique argileux bien drainé, la pratique de non brûlis de la canne à sucre  
36 qui permet la restitution d'environ 5 à 7 tC/ha/an sous forme d'un mulch constitué des  
37 feuilles de canne à sucre (Cerri et al., 2004), ne conduit pas non plus à une différence  
38 significative des émissions de CH<sub>4</sub> et N<sub>2</sub>O entre traitement Conventionnel (avec  
39 brûlis) et traitement Non Brûlis. Les valeurs moyennes obtenues pour les différences  
40 de flux à la surface du sol sont d'environ 20 et 140 kg eq.C-CO<sub>2</sub>/ha/an respectivement  
41 pour CH<sub>4</sub> et N<sub>2</sub>O (Cerri et al., 2004) et restent donc négligeables par rapport au  
42 stockage du C dans le sol de l'ordre de 1600 kgC/ha/an.
- 43 - Systèmes agroforestiers. Au Kenya, sur des sols ferrugineux tropicaux argileux, des  
44 différences de l'ordre de 100 kg eq.C-CO<sub>2</sub>/ha/an ont été trouvées pour les émissions  
45 supplémentaires de N<sub>2</sub>O par une jachère améliorée impliquant l'utilisation de  
46 légumineuses arborées en comparaison avec une jachère traditionnelle (Projet  
47 IMPALA, comm. pers. A. Albrecht, non publié). Ces valeurs commencent à ne plus  
48 être négligeables par rapport au stockage du C dans le sol estimé à environ 1000  
49 kgC/ha/an. Au Kenya aussi, sur le même type de sol, mais pour d'autres  
50 expérimentations, des valeurs variant de 50 à 500 kg eq.C-CO<sub>2</sub>/ha/an ont été trouvées

1 pour des émissions supplémentaires de N<sub>2</sub>O par enfouissement de feuilles de diverses  
2 légumineuses arborées. Le niveau des émissions varie avec les quantités de MS  
3 restituées et la teneur en azote des feuilles (Millar et al., 2004). Des valeurs de 500 kg  
4 eq.C-CO<sub>2</sub>/ha/an peuvent largement diminuer, voire pratiquement annuler, l'effet  
5 positif de stockage de C dans le sol observé par ces pratiques d'agroforesterie, de  
6 l'ordre de 400 à 1000 kgC/ha/an (Albrecht & Kandji, 2003).

## 8 5. Quelques priorités à développer en terme de recherche

10 Nous aborderons très rapidement seulement deux aspects concernant les priorités de  
11 recherches à développer :

- 12 - au niveau de l'analyse de processus et/ou d'interactions entre divers compartiments du
- 13 systèmes sol-plante-atmosphère,
- 14 - au niveau de l'aide à la décision.

### 16 a) Processus et interactions à approfondir

17  
18 Le rôle important joué par les activités biologiques dans les cycles biogéochimiques est bien  
19 connu. Toutefois, dans le cadre des systèmes agro-écologiques leur rôle est encore amplifié  
20 dans les sorties agro-environnementales observées par la mise en place de ces nouvelles  
21 pratiques.

22 Nous avons, dans ce travail, volontairement mis l'accent sur les activités fauniques car celles-  
23 ci ne sont jamais prises en compte, à notre connaissance, dans la modélisation comme un  
24 facteur majeur du fonctionnement, alors que leur effet est spectaculaire (cf. section 3b) tant  
25 sur le fonctionnement hydrophysique que biologique du sol et sur la dynamique de la MO. Il  
26 y a donc là, un effort important de recherche à développer visant :

- 27 - à une approche quantifiée des interactions faune-sol/climat-gestion des terres,
- 28 - à intégrer ces lois quantifiées dans des modèles généraux de fonctionnement des ces
- 29 systèmes agro-écologiques (Smith et al., 1998).

30 Des connaissances sont aussi à développer concernant les interactions bio-organo-minérales :  
31 (i) au niveau de la rhizosphère, en particulier, au niveau du cycle du phosphore, voire (ii) dans  
32 des horizons de profondeur qui peuvent commander l'hydrodynamique du sol. C'est ainsi que  
33 Cabidoche et al. (2000) ont pu montrer le rôle majeur des actinomycètes sur  
34 l'hydrodynamique dans un Vertisol, rôle variable selon le mode de travail et d'usage de ce  
35 sol. Il est alors évident qu'un retour sur les compartiments hydrophysiques des modèles sera  
36 nécessaire, dans le sens d'une plus grande complexité. L'usage notamment des fonctions de  
37 « pédotransfert », permettant d'évaluer des propriétés hydrodynamiques à partir des seuls  
38 critères texturaux, aura alors moins de pertinence.

### 40 b) Les outils d'aide à la décision

42 Nous prendrons ici deux cas :

- 44 - l'utilisation de la modélisation

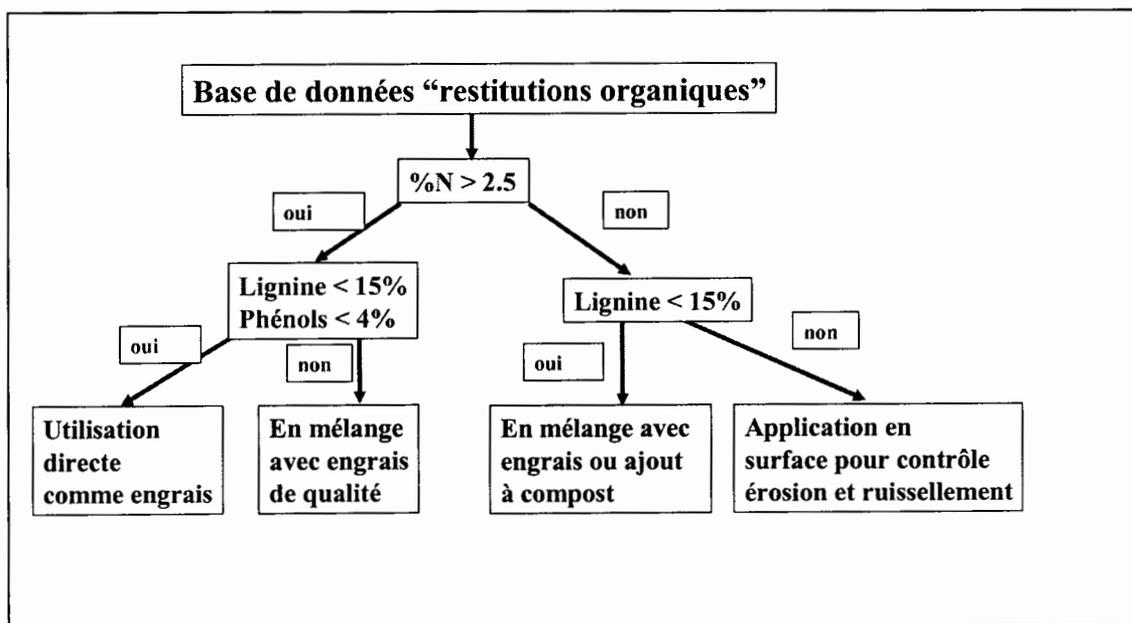
45 Outre leur fonction d'assembleur de connaissance, les modèles peuvent être utilisés aux  
46 échelles locales et régionales, pour le diagnostic, pour le pronostic, pour le test d'itinéraires  
47 techniques et leurs effets sur la production ou sur l'environnement. Un bon exemple de cette  
48 démarche est fourni par les applications du modèle STICS (Brisson et al., 2003) faites dans  
49 les régions françaises par les organismes AGROTRANSFERTS,  
50 (<http://www.avignon.inra.fr/stics/partenaires/partenaires.php>) qui se situent à l'interface entre

1 la recherche et les utilisateurs, et tentent de répondre en terme opérationnels à des questions  
 2 très pratiques. On en cite ici quelques unes, à titre d'exemple sur l'agriculture irriguée : Quels  
 3 besoins en eau pour la culture ? Dans une région donnée, comment utiliser au mieux une  
 4 ressource en eau limitée ? Quand faut il démarrer l'irrigation ? Ces questions sont de nature  
 5 stratégiques ou tactiques, et les réponses données vont conditionner des décisions ou  
 6 investissements à long terme, ou des décisions en temps réel. Donner une bonne réponse à ces  
 7 questions est complexe, et le devient de plus en plus lorsqu'on vise en même temps des  
 8 objectifs environnementaux (accomplissement de normes, etc.). A titre d'exemple, comment  
 9 déterminer l'apport d'azote optimal pour produire au mieux, tout en minimisant la quantité de  
 10 nitrates transférés dans les nappes ? De plus en plus, dans les pays du Nord comme du Sud, on  
 11 a besoin de rechercher des optimums biophysiques, ou sociaux, ou les deux à la fois. Les  
 12 modèles, couplés à des systèmes d'informations géographiques, des bases de données  
 13 économiques, sont et seront des outils précieux pour cela.

14  
 15 - l'aide à la décision par des systèmes – experts

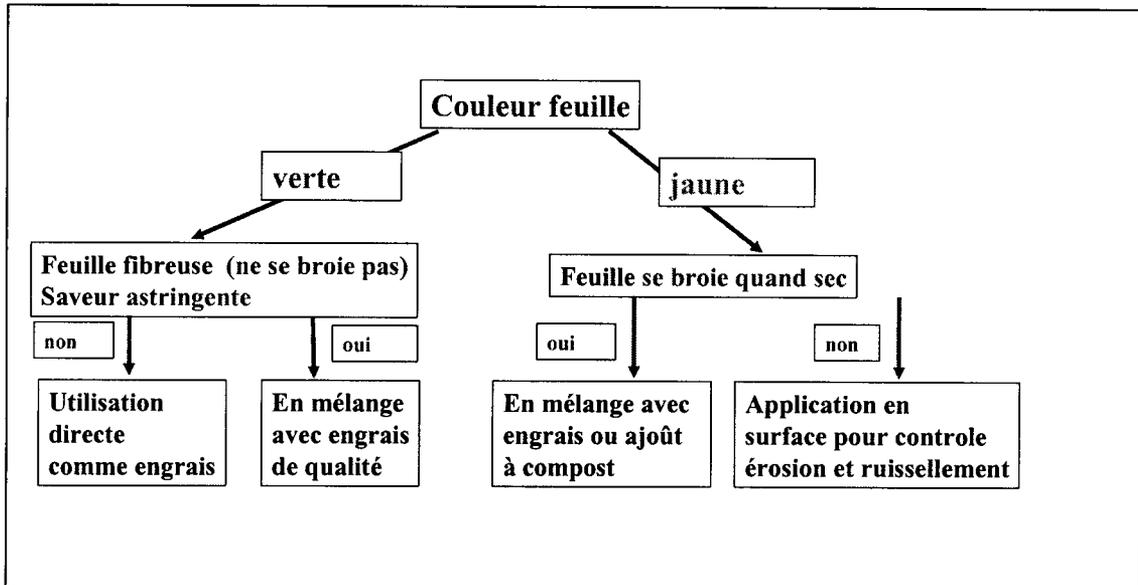
16 Un bel exemple de cette démarche est présenté en figure 7a,b et concerne la gestion des  
 17 restitutions organiques en agroforesterie (Palm et al. 1997, 2000 ; Giller, 2000). A partir d'une  
 18 base de données sur la qualité des restitutions organiques possibles en systèmes  
 19 agroforestiers, un « arbre scientifique d'aide à la décision » est construit (Fig. 7a). Selon la  
 20 teneur en azote d'une part (valeur seuil 2,5 %), et en lignine et phénols d'autre part (valeurs  
 21 seuils 15 et 4 % respectivement), l'arbre oriente, soit vers l'utilisation directe comme engrais  
 22 (A), soit vers la fabrication d'un engrais composé par mélange du matériel végétal avec  
 23 d'autres engrais de bonne qualité (B et C), soit vers une utilisation en mulch pour lutter contre  
 24 l'érosion et le ruissellement (D).

25  
 26 **Figure 7a.** L'arbre « scientifique » d'aide à la décision pour la gestion des restitutions  
 27 organiques au sol selon leur qualité (d'après Palm & Roland 1997, Palm et al. 2000, Giller  
 28 2000).



1 Ce schéma est transféré directement au paysan (Fig. 7b) en remplaçant : la teneur en azote par  
2 l'appréciation d'une couleur (verte ou jaune), la teneur en lignine par la difficulté de broyer le  
3 matériel végétal, et la teneur en phénols par sa saveur astringente ou non.

4  
5  
6 **Figure 7b.** L'arbre « scientifique » d'aide à la décision pour la gestion des restitutions  
7 organiques au sol selon leur qualité transformé pour un transfert direct à l'exploitant  
8 agricole (d'après Giller 2000).



28  
29  
30 Ces démarches sont complémentaires. Elles ont parfois pour cible l'agriculteur, et parfois des  
31 organismes intermédiaires. Il n'empêche que, indépendamment de la simplicité du produit  
32 final, celui-ci s'adosse toujours sur des connaissances produites par la recherche, et dont la  
33 robustesse a été amplement validée.

## 34 35 6. Conclusions

36  
37 Cette séance sur la « révolution doublement verte » a mis en évidence l'importance tant  
38 agricole qu'environnementale des alternatives offertes aux pays du Sud par les agricultures  
39 de type agro-écologique.

40 Sur le plan de la recherche, et notamment de la compréhension et modélisation des cycles  
41 biogéochimiques au sein des systèmes sol-plante-atmosphère intégrant à la fois des sorties  
42 agronomiques et environnementales, de nouveaux défis sont lancés, tant les interactions sont  
43 nombreuses et de nouvelles questions sont posées (Boiffin et al., 2001). Les priorités de  
44 recherche concernent aussi bien un approfondissement ou une remise en perspective des  
45 processus fondamentaux que l'organisation des connaissances dans des modèles complexes  
46 mécanistes déterministes ou stochastiques en vue de quantifier les sorties environnementales  
47 des systèmes de culture, et les prédire selon différentes alternatives de gestion.

1 **Remerciements.** Nous remercions vivement MM. Eric Malézieux (CIRAD, UMR System) et  
2 Jacques Wéry (AGRO-M, UMR System) pour leurs conseils scientifiques et la recherche  
3 bibliographique.

## 5 **Références**

- 6  
7 Albrecht A., Kandji S.T., 2003. Agroforestry practices and carbon sequestration. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 99 : 15-27.
- 8  
9 Bernoux M., Feller C., Cerri C.C., Eschenbrenner V., Cerri C.E.P., sous presse. Soil carbon sequestration. In: In: Roose E., Lal, R., Feller C., Barthès B., Stewart B. (Eds) *Soil Erosion and carbon Dynamics, Advances in Soil Science*, CRC Press, Boca Raton, Floride, USA, *sous presse*.
- 10  
11 Boiffin J., Malezieux E., Picard D., 2001. Cropping systems for the future. Chap. 16, pp. 261-279. In J. Nösberger, H.H. Geiger, P.C. Struik (eds), *CAB International. Crop Science*.
- 12  
13 Boote K.J., Jones J.W., Pickering N.B., 1996. Potential uses and limitations of crop growth: CROPGRO Model. Chapter 18, pp. 651-692.
- 14  
15 Boote K.J., Jones J.W., Hoogenboom G., 1998. Potential uses and limitations of crop models. *Agron. J.*, 88: 704-716.
- 16  
17 Brisson N., Gary C., Justes E., Roche R., Mary B., Ripoche D., Zimmer D., Sierra J., Bertuzzi P., Burger P., Bussièrre F., Cabidoche Y.M., Cellier P., Debaeke P., Gaudillère J.P., Maraux F., Seguin F. B., Sinoquet H., 2003.- An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy*, 18 (3-4): 309-332.
- 18  
19 Brisson N., Wery J., Boote K., 2004. An introduction to crop models. In "Working with crop models", D. Wallach ed. *Accepté, sous presse (ou ça?)*.
- 20  
21 Bussièrre F., Cellier P., 1994. Modification of the soil temperature and water content regimes by a crop residue mulch – Experiment and Modeling. *Agricultural and Forest meteorology*, 68 (1-2): 1-28.
- 22  
23 Cabidoche Y.M., Guillaume P., Hartmann C., Ruy S., Blanchart E, Albrecht A., Mahieu M., Achouak W., Heulin T., Villemin G., Watteau F., Bellier G., 2000. Déterminants biologiques du système poral de vertisols cultivés (Petites Antilles). Conséquences sur la disponibilité de l'eau des sols pour les plantes. *Etude et Gestion des Sols*, 7 : 329-352.
- 24  
25 Cerri C.C., Bernoux M., Feller C., Campos D., De Luca E., Eschenbrenner V., 2004. Canne à sucre : l'exemple du Brésil. Canne à sucre et séquestration du carbone. *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France*, séance du 17 mars 2004, 15 p. <http://www.academie-agriculture.fr>.
- 26  
27 Coleman K. & Jenkinson D.S., 1996. RothC-26.3- A Model for the turnover of carbon in soil. In: *Evaluation of Soil Organic Matter Models Using Existing, Long-Term Datasets*, pp. 237-246 (Eds. D.S. Powlson, P. Smith and J.U. Smith) *NATO ASI Series I, Vol.38*. Springer-Verlag, Heidelberg.
- 28  
29 de Campos C., 2003. Potencialidade do sistema de colheita sem queima da cana-de-açúcar para o sequestro de carbono. Thèse Université de São paulo, Escola Superior de Agricultura « Luiz de Queiroz », Piracicaba, Brésil. 103 p.
- 30  
31 Del Grosso et al., 2001. Simulated interaction of C dynamics and N trace gas fluxes using the Daycent model. Chapter 8, pp. 303-332. *In Modeling C and N dynamics for soil management*, M.J. Shaffer, L. Ma, S. Hansen eds., *Lewis Publishers, Boca Raton, USA*
- 32  
33 de Wit C.T., 1970. Dynamic concepts in biology. In I. Setlik (ed) "Prediction and measurement of photosynthetic activity". *Pudoc, Wageningen, Netherlands*.
- 34  
35 Feller C., 2001. Efeitos da colheita sem queima da cana-de-açúcar sobre a dinâmica do carbono e propriedades do solo. Relatório final. Processo FAPESP n° 98/12648-3. *Rapp. Mult. CENA-IRD*, 145 p.+Annexes.
- 36  
37 Feller C., Boulaine J., Pedro G., 2001. Indicateurs de fertilité et durabilité des systèmes de culture au début du XIXe siècle. L'approche de Albrecht Thaër (1752-1828). *Etude et Gestion des Sols*, 8 : 33-46.
- 38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51

- 1 Feller C., Thuriès L., Manlay R., Robin P., Frossard E. 2003. « The principles of rational  
2 agriculture » by A.D. Thaer (1752-1828). An approach of the sustainability of cropping  
3 systems at the beginning of the 19th Century<sup>1</sup> *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*,  
4 166: 687-698.
- 5 Findeling A., 2001. Etude et modélisation de certains effets du semis direct avec paillis de  
6 résidus sur les bilans hydrique, thermique et azoté d'une culture de maïs pluvial au  
7 Mexique. Mémoire de thèse soutenue le 8 février 2001, ENGREF, Montpellier, 355 p. +  
8 Annexes XXXIV p.
- 9 Firestone M.K., Davidson E.A., 1989 Microbiological basis of NO and N<sub>2</sub>O production and  
10 consumption in soil. In Andrea M.O., Schimel D.S. (Ed.), *Exchange of trace gases*  
11 *between terrestrial ecosystems and the atmosphere*, J.Wiley and L. Sons, Chichester,  
12 United Kingdom, pp. 7-21.
- 13 GEF-SOC program, 2002. Presentation de Century par K. Paustian (NLRE, Colorado) au  
14 Projet GEF-SOC, Juillet 2002, Univ. Reading, UK.
- 15 Giller K.E., 2000. Translating science into action for agricultural development in the tropics:  
16 An example from decomposition studies. *Applied Soil Ecology*, 14:1-3.
- 17 Henin & Dupuis, 1945. Essai de bilan de la matière organique. *Ann. Agron.* 15, 17-29.
- 18 IMPALA project, 2001. First annual report of IMPALA Project, covering the period October  
19 2000-December 2001. Nairobi, Kenya, 68 pp.
- 20 Jenkinson D.S. & Rayner J.H., 1977. The turnover of soil organic matter in some of the  
21 Rothamsted classical experiments. *Soil Sci.* 123: 298-305.
- 22 Jones, C.A. and Kiniry, J.R., 1986. CERES-Maize: A Simulation Model of Maize Growth and  
23 Development. Texas A&M University Press, College Station, TX.
- 24 Jones C.A., Dyke P.T., Williams J.R., Kiniry J.R., Benson V.W., Griggs R.H., 1991. EPIC –  
25 An operational model for evaluation of agricultural sustainability. *Agricultural systems* 37  
26 (4): 341-350.
- 27 Jenny, H., 1941. *Factors of soil formation*. Mac Graw Hill, New York USA, 281 p.
- 28 Lafolie F., 1991. Modelling water flow, nitrogen transport and root uptake including physical  
29 non-equilibrium and optimization of the root water potential. *Fertilizer Research*, 27: 215-  
30 231.
- 31 Leonard J., 2000. Interaction entre le ruissellement et les macropores créés par les termites  
32 dans le cas d'un sol encroûté au Sahel. Etude expérimentale et modélisation. Mémoire de  
33 thèse. Univ. Paris-6, p.
- 34 Leonard J. & Rajot J.L., 1998. Effets induits du paillage post-cultural d'un sols sableux  
35 encroûté au Sahel. Conséquences sur l'amélioration de son fonctionnement hydrique.  
36 *Agriculture et Développement (Spécial Sols Tropicaux)*, 18: 39-45
- 37 Leonard J. & Rajot J.L., 2001. Influence of termites on runoff and infiltration: quantification  
38 and analysis. *Geoderma*, 104:17-40.
- 39 Manlay R.J., Masse D., Chevallier T., Russell-Smith A., Friot D., Feller C., 2004. Post-fallow  
40 decomposition of woody roots in the West African savanna. *Plant and Soil*, 260: 123-136.
- 41 Millar N., Ndufa J.K, Cadisch G, Baggs E.M., 2004. Nitrous oxide emissions following  
42 incorporation of improved-fallow residues in the humid tropics. *Global Biogeochemical*  
43 *Cycles*, 18(1): 1-9.
- 44 Paillot G., 2000 – L'agriculture raisonnée. Rapport remis au Ministre de l'Agriculture et de  
45 la pêche, le 23/02/2000. Site Internet [www.agriculture.gouv.fr/medi/etude/welcome.html](http://www.agriculture.gouv.fr/medi/etude/welcome.html)
- 46 Palm, C.A., & Rowland A.P., 1997. A minimum dataset for characterization of plant quality  
47 for decomposition. pp. 379-392, In G. Cadish & K.E. Giller (eds) "Driven by Nature",  
48 Wallington, CAB International.

- 1 Palm, C.A., C.N. Gachengo, R.J. Delve, G. Cadisch, and K.E. Giller, 2000. Organic inputs for  
2 soil fertility management in tropical agroecosystems: application of an organic residue  
3 database. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 83: 27-42.
- 4 Parton W.J., Schimel D.S., Cole C.V. & Ojima D.S., 1987. Analysis of factors controlling soil  
5 organic matter level in Great Plains grasslands. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 51, 1173-1179.
- 6 Reyes Gomez V.M., 2002. Quantification et modélisation des flux hydriques, thermiques et  
7 azotes dans les systèmes de culture en semis direct avec couverture végétale dans la région  
8 des Cerrados brésiliens. Mémoire de thèse soutenue le 24 octobre 2002, ENGREF,  
9 Montpellier, 355 p. + Annexes XXXIV p.
- 10 Scopel, E., A. Findeling and E. Chavez Guerra, soumis. Impact de techniques de semis direct  
11 avec paillis sur la réduction de l'érosion et l'évolution des stocks de C dans des systèmes  
12 de maïs pluvial en zones semi-arides de l'ouest mexicain. *Agronomie, soumis*.
- 13 Sinclair T.R. & Seligman N.G., 1996. Crop Modeling: From Infancy to Maturity. *Agron. J.*,  
14 88: 698-704.
- 15 Smith, P., Andren, O., Brussaard, L., Dangerfield, M., Ekschmitt, K., Lavelle, P. & Tate, K.  
16 1998. Soil biota and global change at the ecosystem level: describing soil biota in  
17 mathematical models. *Global. Change Biology* 4: 773-784.
- 18 Thaer A.D., 1811-1816. Principes raisonnés d'agriculture. Traduit de l'Allemand par E.V.B.  
19 Crud, J.J. Pechoud ed., 4 tomes, Paris.
- 20 Whistler J.R., Acock B., Baker D.N., Fye R.E., Hodges H.F., Lambert J.R., Lemmon H.E.,  
21 McKinion J.M., Reddy V.R., 1986. Crop simulation models in agronomic systems.  
22 *Advances in Agronomy*, 40: 141-208.
- 23 Williams J.R., 1989. EPIC: The Erosion-Productivity Impact Calculator. In "Proceedings of  
24 the 1989 Summer Computer Simulation Conference", ed. J.K. Clema, Conference  
25 Sponsor SCS,USA, pp. 676-681. (Reproduit aussi dans " Training Program Simulation of  
26 Crop Growth and Management Responses", 1992, 16-29 June, IBSNAT Project,  
27 Honolulu, Hawaii, pp. 451-457).
- 28

## **LES BASES ÉCOLOGIQUES DU PILOTAGE D'UNE FERTILITÉ DURABLE DES ÉCOSYSTÈMES TROPICAUX CULTIVÉS ET LEURS PERSPECTIVES**

Christian Feller<sup>1</sup>, Yves-Marie Cabidoche<sup>2</sup>,  
Antoine Findeling<sup>3</sup> et Florent Maraux<sup>3</sup>

*(Note présentée par Christian Feller)*

Jusque vers les années 1980, la gestion de la fertilité était essentiellement ciblée sur celle des intrants, en quantités non limitantes (au moins pour les pays du Nord), afin de passer outre aux contraintes du milieu. Le choix et la gestion de ces intrants étaient basés (i) sur l'établissement de bilans biogéochimiques au niveau du système sol-plante en vue de compenser les pertes au niveau du sol par des entrées égales ou supérieures dans le système, (ii) sur l'étude de la biodisponibilité des nutriments pour la plante, (iii) sur la recherche d'un rendement végétal maximum. Cette démarche générale pour les pays du Nord a été appliquée dans les pays du Sud, même si, dans le meilleur des cas, on s'est efforcé de valoriser au mieux les ressources minérales locales.

Les conséquences de telles pratiques n'ont pas tardé à se faire sentir : émergence au Nord, de problèmes environnementaux forts (pollution des eaux de surface et de profondeur par les nitrates, pollution des eaux et des sols par les métaux lourds et molécules xénobiotiques, accroissement de l'érosion et colmatages en aval, etc.), et au Sud, l'insuffisance du « tout minéral » pour assurer une productivité durable des terres. Par ailleurs, au Nord comme au Sud, le fait de considérer l'agriculture comme une activité aussi au service de la lutte contre l'effet de serre, va faire apparaître un changement radical d'attitude, tant au Nord qu'au Sud, dans la gestion des agrosystèmes, avec deux conséquences majeures :

La « maximisation » du rendement n'est plus l'objectif à atteindre, mais plutôt son « optimisation » à un niveau pénalisant raisonnablement les autres aspects environnementaux.

Les ressources naturelles, et particulièrement biologiques, sont re-considérées, pour des effets attendus plus bénéfiques pour la planète et ses

ressources en sol, eau et autres facteurs écologiques comme la biodiversité et les gaz à effet de serre.

D'un système sol-plante sans composante environnementale, on passe à des systèmes où l'ensemble des entrées et sorties est étudié, et pour lesquels les grands cycles biogéochimiques sont analysés, entre autres, en terme de recyclage. Ces nouveaux systèmes peuvent mettre en œuvre des restitutions organiques au sol importantes comme des déchets, des résidus de culture ou plantes de couverture, des arbres et leurs sous produits, etc. Si les processus fondamentaux du fonctionnement du système sol-plante ne sont pas remis en cause, il y a, par contre, un renouvellement dans l'approche, tant au niveau des échelles que des systèmes : à l'échelle temporaire de la période de croissance, il va falloir substituer des échelles pluriannuelles, voire pluridécennales ; au seul système eau-sol-plante, il faut s'ouvrir vers un système climat-sol-plante-atmosphère, à l'échelle du pédon ou de la parcelle, il faut intégrer les notions d'amont et d'aval. A cela s'ajoute un niveau de complication supplémentaire pour la recherche, à savoir le besoin de modéliser, pour les piloter, des cycles de croissance végétale imbriqués, sur le court et le moyen terme dès lors que l'on s'intéresse à de systèmes comme les cultures associées, l'agroforesterie, etc.

Pour la recherche, ceci implique une remise en forme des connaissances fondamentales sur les cycles biogéochimiques, pour leur intégration dans des schémas couplés dans lesquels des processus différents interviennent simultanément dans le même compartiment (par exemple précipitation / dissolution / transport d'eau et de minéraux) et interagissent avec d'autres compartiments (par exemple les interactions sol-racine, ou plante-plante).

Avec l'aide des outils mathématiques et informatiques, on construit alors des modèles, en assemblant des connaissances selon des choix de simplifications et de prise en compte prioritaire de tel ou tel processus, pas de temps, échelle spatiale, ou système de culture (par ex. modèle PASTIS ou STICS pour la France ou DAYCENT pour les États-Unis). Ceux-ci visent d'une part, à illustrer les acquis, d'autre part, à approfondir les recherches, pour prédire quantitativement des sorties productives ou environnementales.

Pour illustrer ce propos, on montrera en quoi une problématique comme celle de la prise en considération des flux de gaz à effet de serre, oblige à repenser les approches classiques.

1. Correspondant de l'Académie d'Agriculture, IRD - Unité de Recherche « Séquestration du Carbone » - UR041, Montpellier, France.

2. INRA - Unité de Recherche « Agronomie, Pédologie, Climatologie » - URAPC, Petit-Bourg, Guadeloupe, France.

3. CIRAD - Département AMIS, Programme Agronomie, Montpellier, France.

# LES BASES ÉCOLOGIQUES DU PILOTAGE D'UNE FERTILITÉ DURABLE DES ÉCOSYSTÈMES TROPICAUX CULTIVÉS ET LEURS PERSPECTIVES

par Christian **Feller**<sup>1</sup>, Yves-Marie **Cabidoche**<sup>2</sup>, Antoine **Findeling**<sup>3</sup> et Florent **Maraux**<sup>3</sup>

Jusque vers les années 1980, la gestion de la fertilité était essentiellement ciblée sur celle des intrants, en quantités non limitantes (au moins pour les pays du Nord), afin de passer outre aux contraintes du milieu. Le choix et la gestion de ces intrants étaient basés (i) sur l'établissement de bilans biogéochimiques au niveau du système sol-plante en vue de compenser les pertes au niveau du sol par des entrées égales ou supérieures dans le système, (ii) sur l'étude de la biodisponibilité des nutriments pour la plante, (iii) sur la recherche d'un rendement végétal maximum. Cette démarche générale pour les pays du Nord a été appliquée dans les pays du Sud, même si, dans le meilleur des cas, on s'est efforcé de valoriser au mieux les ressources minérales locales.

Les conséquences de telles pratiques n'ont pas tardé à se faire sentir : émergence au Nord, de problèmes environnementaux forts (pollution des eaux de surface et de profondeur par les nitrates, pollution des eaux et des sols par les métaux lourds et molécules xénobiotiques, accroissement de l'érosion et colmatages en aval, etc.), et au Sud, l'insuffisance du « tout minéral » pour assurer une productivité durable des terres. Par ailleurs, au Nord comme au Sud, le fait de considérer l'agriculture comme une activité aussi au service de la lutte contre l'effet de serre, va faire apparaître un changement radical d'attitude, tant au Nord qu'au Sud, dans la gestion des agrosystèmes, avec deux conséquences majeures :

- la « maximisation » du rendement n'est plus l'objectif à atteindre, mais plutôt son « optimisation » à un niveau pénalisant raisonnablement les autres aspects environnementaux,
- les ressources naturelles, et particulièrement biologiques, sont re-considérées, pour des effets attendus plus bénéfiques pour la planète et ses ressources en sol, eau et autres facteurs écologiques comme la biodiversité et les gaz à effet de serre.

D'un système sol-plante sans composante environnementale, on passe à des systèmes où l'ensemble des entrées et sorties est étudié, et pour lesquels les grands cycles biogéochimiques sont analysés, entre autres, en terme de recyclage. Ces nouveaux systèmes peuvent mettre en œuvre des restitutions organiques au sol importantes comme des déchets, des résidus de culture ou plantes de couverture, des arbres et leurs sous produits etc. Si les processus fondamentaux du fonctionnement du système sol-plante ne sont pas remis en cause, il y a, par contre, un renouvellement dans l'approche, tant au niveau des échelles que des systèmes : à l'échelle temporaire de la période de croissance, il va falloir substituer des échelles pluriannuelles, voire pluridécennales ; au seul système eau-sol-plante, il faut s'ouvrir vers un système climat-sol-plante-atmosphère, à l'échelle du pédon ou de la parcelle, il faut intégrer les notions d'amont et d'aval. A cela s'ajoute un niveau de complexation supplémentaire pour la recherche, à savoir le besoin de modéliser, pour les piloter,

<sup>1</sup> Correspondant de l'Académie d'Agriculture, IRD - Unité de Recherche "Séquestration du Carbone"- UR041, Montpellier, France.

<sup>2</sup> INRA - Unité de Recherche "Agronomie, Pédologie, Climatologie"- URAPC, Petit-Bourg, Guadeloupe.

<sup>3</sup> CIRAD - Département AMIS, Programme Agronomie, Montpellier, France.

des cycles de croissance végétale imbriqués, sur le court et le moyen terme dès lors que l'on s'intéresse à de systèmes comme les cultures associées, l'agroforesterie, etc.

Pour la recherche, ceci implique une remise en forme des connaissances fondamentales sur les cycles biogéochimiques, pour leur intégration dans des schémas couplés dans lesquels des processus différents interviennent simultanément dans le même compartiment (par exemple précipitation / dissolution / transport d'eau et de minéraux) et interagissent avec d'autres compartiments (par exemple les interactions sol-racine, ou plante-plante).

Avec l'aide des outils mathématiques et informatiques, on construit alors des modèles, en rassemblant des connaissances selon des choix de simplifications et de prise en compte prioritaire de tel ou tel processus, pas de temps, échelle spatiale, ou système de culture (par ex. modèle PASTIS ou STICS pour la France ou DAYCENT pour les Etats-Unis). Ceux-ci visent d'une part, à illustrer les acquis, d'autre part, à approfondir les recherches, pour prédire quantitativement des sorties productives ou environnementales.

Pour illustrer ce propos, on montrera en quoi une problématique comme celle de la prise en considération des flux de gaz à effet de serre, oblige à repenser les approches classiques.