

MATIERE ORGANIQUE ET FERTILITE
Rôle des bilans et des fractionnements de matière organique
dans les études de système sol-plante

MATERIA ORGÁNICA Y FERTILIDAD
Rol de los balances y de los fraccionamientos de materia orgánica
en los estudios de sistemas suelo-planta

J.M. HÉTIER et G. GUIRAUD

RÉSUMÉ

Mettre en relation matière organique et fertilité revient à étudier son rôle dans l'obtention d'une production végétale abondante et de bonne qualité dans un temps et sur une surface limités. La fertilité sera donc pour nous synonyme de productivité.

Ce rôle est lié aux propriétés édaphiques favorables à la croissance des racines, à savoir :

- une structure facilitant la rétention de l'eau,
- un complexe d'échange ionique facilitant l'adsorption racinaire du phosphore et des oligo-éléments,
- une réserve d'azote organique pouvant devenir assimilable en fonction des besoins de la plante.

La présente communication s'attache surtout à ce dernier point.

Après avoir évoqué les évaluations des apports racinaires de quelques graminées des savanes africaines nous rappelons l'intérêt des informations tirées des mesures d'âge apparent ^{14}C et d'abondance isotopique de ^{15}N en ce qui concerne la dynamique de l'humification dans les éco ou les agro-systèmes.

Les très nombreuses mesures de Coefficients réels d'utilisation (CRU) et les proportions d'azote dérivant du fertilisant (NDF) mettent en évidence le rôle très important du sol qui fournit toujours entre la moitié et les trois quarts de l'azote assimilable même en cas d'apports massifs de fertilisants.

L'utilisation indirecte des traceurs est une manière rapide et peu onéreuse d'évaluer l'effet à long terme des apports organiques. C'est ce que nous montre l'étude des sols des parcelles DEHERAIN effectuée grâce à une culture de plante test sur un échantillon de sol des différentes parcelles après introduction d'un peu d'azote quinze sous forme nitrique avec ou sans entraîneur.

Pour des raisons de prix de revient le marquage direct de la matière organique par la voie racinaire ne peut se faire au champ. C'est pourquoi nous avons effectué une culture de maïs doublement marqué qui a montré que plus de la moitié des apports d'azote organique laissés par une culture sont d'origine racinaire directe (racines vivantes au moment de la récolte) ou indirecte (exsudation et produits de nécrose), lorsque le coefficient réel d'utilisation est poussé à son maximum (80 %). Les composés organiques néoformés sont pour moitié liés aux argiles sous des formes insolubles à pH 10.

Pour valoriser au mieux les résultats des diverses mesures et expériences que nous avons évoqués, il semble souhaitable de les utiliser dans la mise au point et la validation de modèles de simulation mathématique de l'évolution du statut organique des sols. Pour ce faire, il faut non seulement des bilans et des fractionnements permettant de quantifier les échanges entre constituants mais effectuer également sur les mêmes sols les études qualitatives indispensables à la compréhension du rôle des fractions dans la vie des sols aux échelles choisies.

RESUMEN

INTRODUCCION

Relacionar la materia orgánica con la fertilidad conduce a estudiar su rol en la obtención de una producción vegetal abundante y de buena calidad en un tiempo y una superficie limitada, considerando la fertilidad como sinónimo de productividad.

Este rol está ligado a las propiedades del suelo que facilitan el crecimiento radicular, los cuales son :

- una estructura que facilita la retención de agua
- un complejo de intercambio iónico que facilita la absorción radicular del fósforo y de los oligoelementos
- una reserva de nitrógeno orgánico que puede volverse asimilable en función de las necesidades de la planta.

En esta comunicación nosotros nos dedicaremos solo a este último punto, colocando el acento en los aportes de informaciones específicas que se han obtenido en algunos trabajos recientes, gracias a los trazadores naturales y artificiales del carbono y del nitrógeno (^{14}C , ^{15}N).

1. Balance sin trazadores en eco y agro-sistemas tropicales

El término de balance evoca la contabilidad de las entradas y salidas de carbono y de nitrógeno en los eco y agrosistemas, ubicándose el suelo

en el centro de esta estructura como un lugar de almacenamiento a mayor o menor plazo. En ausencia de trazadores, dichos balances pueden alcanzar una cierta precisión solo a escala anual y de la hectárea, tal como lo muestran algunos ejemplos de evaluación de los aportes de las raíces de plantas forrajeras de África tropical.

2. Edad aparente (^{14}C) y abundancia natural del ^{15}N

A partir de resultados de edad aparente de fracciones de suelo, se elaboro un modelo de dos compartimentos mostrando las diferencias de actividad humificadora de dos suelos de pasto de montaña templada.

Por otro lado, las variaciones de abundancia isotópica del ^{15}N constituyen un nuevo parámetro que permite seguir las transformaciones de un suelo forestal en suelo de pasto y luego de cultivo.

3. Balance de sistemas suelo-planta con trazadores introducidos al campo y al laboratorio

El empleo de los trazadores del carbono y del nitrógeno permite una precisión tal que los balances pueden establecerse a la escala del metro cuadrado o del vaso de vegetación. En esta escala, la precisión no depende tanto de la calidad de las medidas, sino mucho más de la heterogeneidad espacial del suelo que hace muy difícil la toma de muestras representativas.

CAMPO :

Hasta ahora la mayor parte de los balances de nitrógeno han sido establecidos en los estudios del devenir de los abonos nitrogenados al finalizar un ciclo de cultivo. Entre los ejemplos de Coeficientes reales de utilización (C.R.U.) medidos en Costa de Marfil y en Senegal, encontramos valores comprendidos entre 25 y 60 %. En la planta, la proporción de nitrógeno derivado del fertilizante (N.D.F.) no pasa del 50 %. Tales resultados ponen claramente en evidencia el rol de la materia orgánica como fuente de nitrógeno aun en el caso de aportes masivos de fertilizante.

LABORATORIO :

Para comprender mejor este rol se han multiplicado las tentativas de fraccionamiento de la materia orgánica. La primera etapa de este fraccionamiento consiste en separar las raíces vivas en el momento de la cosecha. Es lo que se hizo en un experimento de evaluación del efecto del estiércol aportado en pruebas de larga duración impulsados en Francia por DEHERAIN hace 100 años. En este tipo de ensayo, el trazador es utilizado indirectamente a fin de poner en evidencia la aptitud del suelo para diluir el nitrato marcado que puede ser introducido en cantidades infinitesimales. Tales ensayos rápidos y de costo relativamente bajo, merecerían multiplicarse para valorizar los numerosos resultados de experimentos agronómicos clásicos.

Después de un cultivo de maíz doblemente marcado en condiciones controladas (atmósfera $^{14}\text{CO}_2$ y irrigación fertilizante ^{15}N) se hizo un fraccionamiento detallado de la materia orgánica marcada por el aporte radicular y las síntesis microbianas. Aún cuando las extracciones alcalinas sean poco discriminantes frente a las diversas formas de nitrógeno orgánico, hemos logrado poner en evidencia la asociación rápida de la mitad de los compuestos orgánicos neoformados con las fracciones arcillosas.

CONCLUSION

Aún resta mucho que hacer en los años que vienen para mejorar el valor de las informaciones cuantitativas en particular en lo referente a las cinéticas de intercambio entre los diferentes constituyentes, reunidos en subconjuntos por los fraccionamientos químicos, físicos o biológicos. Estos sub-

conjuntos podrian precisar concretamente la definicion de los compartimentos a utilizar en los modelos de simulación matemática de la evolución del estatus orgánico de los suelos. Ello supone necesariamente realizar estudios cualitativos para comprender la función que cumplen estas fracciones y estos compartimentos en la vida de los suelos según las escalas de tiempo y espacio elegidas.

INTRODUCTION

L'étude des rapports entre matière organique des sols et fertilité est un thème qui dépasse de loin les limites d'une simple communication. Aussi limiterons-nous le sujet en donnant, en guise d'introduction, les définitions indispensables au commentaire des résultats que nous avons choisi de présenter.

Le sol est avant tout le milieu de croissance des racines dont la densité apparente diminue vers la surface en fonction de la structuration et de l'accumulation résiduelle des apports organiques principalement racinaires.

Dans la matière organique nous distinguerons d'abord la partie vivante, la ou plutôt les biomasses végétales, animales, bactériennes et fongiques. L'importance qualitative de ces biomasses ne doit pas faire oublier qu'elles ne contiennent que 10 % du carbone et 20 % de l'azote total sol. On ne saurait donc négliger la présence d'une nécromasse importante composée de débris figurés et de substances humiques qui servent de substrats aux décomposeurs.

Dans bien des cas on ne parlera que du stock de matière organique évalué à partir des mesures de densité apparente et des teneurs pondérales de carbone et d'azote total de la terre fine. Certains chercheurs s'attachent à l'étude de certains constituants organiques vivants ou morts qu'ils observent et définissent biologiquement ou chimiquement souvent sans pouvoir les isoler. C'est pourquoi on sera souvent obligé de se contenter des premières étapes d'une démarche analytique qui n'aboutit à distinguer que des groupes plus ou moins hétérogènes de constituants appelés fractions.

Par ailleurs, il est souvent commode, surtout pour les besoins de la modélisation, de regrouper les constituants en sous-ensembles qui sont en général définis de façon plus conceptuelle qu'expérimentale et que l'on appelle compartiments.

L'approche compartimentale préside toujours plus ou moins explicitement à l'établissement des bilans de la matière organique. Nous ne parlerons pas ici des bilans statiques du carbone qui ont très souvent été effectués en vue de comparer des types de pédogénèse. Nous nous limiterons à l'évocation des bilans dynamiques, ce terme désignant les évaluations de flux d'entrée et de sortie dans les systèmes sol-plante qui elles sont directement en rapport avec les problèmes de fertilité.

Nous considérerons ici la fertilité comme la résultante des facteurs édaphiques (*) qui concourent à l'obtention d'une production végétale abondante et de bonne qualité :

* - eau, azote, phosphore et éléments majeurs, éléments traces.

Une telle production pourrait être obtenue sans peine si les surfaces cultivables et la main d'oeuvre n'étaient pas limitées. En fait, le concept de fertilité est synonyme de productivité.

Le facteur eau ne sera évoqué qu'indirectement à travers les résultats concernant les bilans du carbone.

On sait en effet que la capacité de rétention en eau dépend étroitement de la porosité des structures édifiées grâce à des ciments carbonés (CHARREAU 1975) notamment polysaccharidiques (GUCKERT 1973).

Nous nous attarderons surtout sur l'azote tout en souhaitant un jour pouvoir aborder les autres qui résultent aussi en grande partie de l'abondance et des formes du carbone et de l'azote. C'est pour désigner cet ensemble complexe de propriétés liées à la matière organique que nous emploierons l'expression statut organique des sols.

Nous aurons enfin besoin des quelques définitions techniques suivantes :

- Coefficient apparent d'utilisation C.A.U.

$$\frac{\text{N récolte fertilisée} - \text{N récolte témoin}}{\text{N fertilisant}}$$

- Coefficient réel d'utilisation C.R.U.

$$\frac{Q^{15}\text{N plante}}{Q^{15}\text{N fertilisant}}$$

- Excès isotopique
Abondance isotopique échantillon - A.I. référence (air)

- Azote dérivé du fertilisant N.D.F.

$$\frac{\text{Excès N plante}}{\text{Excès N fertilisant}}$$

- Radioactivité spécifique R.A.S.

$$\frac{\text{Quantité de radioactivité de l'isotope radioactif}}{\text{Masse des isotopes du même élément}}$$

1. Evaluations des entrées et sorties de M.O., en l'absence de traceurs

1.1. Exemple d'écosystèmes tropicaux (Tableau I)

En l'absence de traceurs on peut tout d'abord étudier des sols supposés à l'équilibre ou proches de l'équilibre, c'est-à-dire des systèmes sol-plante où les apports annuels compensent exactement les pertes.

Il est possible de mesurer les apports de litière aérienne et racinaire et d'évaluer par des expériences leurs coefficients de décomposition annuels. On en déduit K_f , le coefficient de décomposition du stock de carbone total souvent appelé coefficient isohumique (HENIN DUPUIS 1945).

Dans les jachères herbacées proches des savanes naturelles on peut ainsi raisonner à partir des données suivantes :

Tableau I (de Boissezon, 1973)

	Carbone T/ha dans la couche 0-30 cm	Azote Kg/ha
Stock existant	20 à 50	1 500 à 3 000
Apports annuels P.A.	1 à 3	30 à 100
Racines	0,3 à 1	10 à 30

De telles évaluations ont également été faites pour des écosystèmes forestiers. Elles gardent toute leur valeur pour des études écologiques du cycle du carbone ou de l'azote à l'échelle du bassin versant ou du kilomètre carré.

1.2. Exemple d'étude d'agrosystèmes tropicaux (Tableau II et III)

Après la mise en culture de sols où le stock initial est très bas, on peut observer des accroissements rapides des teneurs de carbone et d'azote total (TALINEAU et al 1980). Mais comme le reconnaissent les auteurs, ces résultats restent affectés d'une certaine imprécision à cause de la grande hétérogénéité des prélèvements de sol.

Malgré leurs imperfections, ces résultats sont d'un grand intérêt, car pour huit espèces de prairie tropicale on dispose de valeurs du rapport parties aériennes/racines effectivement établies durant quatre ans avec les répétitions nécessaires et non de simples évaluations. On peut voir dans le tableau II que ces rapports sont généralement compris entre 1 et 2 cas. A part deux espèces, toutes ces plantes de prairie tropicale apportent annuellement de trois à huit tonnes de racines (poids de matière sèche) soit 3,5 tonnes de carbone et trente à quatre-vingt kilos d'azote.

Pour une des espèces étudiées dans cette série d'expériences, *Panicum maximum*, D. PICARD (1976) a étudié dans le détail le rythme d'émission, de croissance et de décomposition des racines en fonction de la fertilisation et de la fréquence des coupes. Un aspect des résultats obtenus est représenté dans le schéma du tableau III qui montre que sans aucun traceur on peut déjà obtenir un bon nombre d'informations nécessaires à l'établissement des bilans. Ces informations sur les variations du stock de racines vivantes d'une graminée seront très utiles pour apprécier le pouvoir de restauration du statut organique des sols par l'introduction des prairies pâturées ou fauchées.

2. Bilans du fonctionnement de systèmes sol-plante utilisant les traceurs isotopiques naturels du carbone et de l'azote

2.1. Age apparent, humification et bilans (Tableau IV)

Les travaux basés sur les mesures d'âge apparent pour évaluer la stabilité biologique des matières organiques sont relativement peu nombreux compte tenu des difficultés d'analyse et d'interprétation. Sans oublier les résultats désormais classiques, obtenus par GUILLET (1972) et TURENNE (1979), il nous a paru important de signaler la démarche originale de J. BALESSENT (1982) qui propose deux types de modèles permettant d'interpréter les mesures d'âge apparent.

L'un des deux modèles propose de distinguer deux compartiments qui peuvent faire l'objet d'une mesure de volume directe par un simple tamisage après destruction des agrégats. Le premier correspond aux débris figurés, racines vivantes comprises. Par l'ensemble des réactions biochimiques de l'humification il nourrit le second qui correspond à la fraction inférieure à 100 μ , tout en perdant une partie du carbone sous forme de CO_2 . On considère que chacun des deux compartiments évolue selon une loi exponentielle du type suivant :

$$Q_1^i = q_0 e^{-b_1 i} \quad \text{avec } Q_1 = q_0 / b_1$$

$$Q_2^k = k q_0 e^{-b_2 i} \quad \text{avec } Q_2 = k q_0 / b_2$$

Les mesures indépendantes de Q_1 , Q_2 et q_0 permettent de vérifier la validité du modèle et de conduire au calcul du paramètre k qui grâce à la mesure concrète des deux compartiments du carbone du sol, reflètera plus fidèlement que le traditionnel coefficient isohumique de HENIN et DUPUIS (1945) la vitesse à laquelle le sol pourra constituer ou reconstituer un stock de matière organique stabilisée.

Cet exemple est donné pour rappeler que les mesures d'âge apparent peuvent et doivent être plus qu'un indice pour la réflexion sur les processus de pédogénèse. Elles peuvent aider à prévoir la réaction des sols impliqués dans des agrosystèmes intensifs.

2.2. Abondance naturelle de l'azote quinze et humification (Tableau V)

Bien qu'il ait été dit (OLSEN 1978) "C'est une catastrophe de la nature qu'il n'existe aucun isotope radioactif de l'azote ayant une période moyenne" il est tout de même possible d'avoir une idée de la stabilité des composés azotés des sols en mesurant l'abondance isotopique naturelle de l'azote quinze.

En effet MARIOTTI (1982) a montré que l'activation des processus biologiques dans un sol provoque une augmentation de l'abondance isotopique qui concerne particulièrement les métabolites microbiens dont le temps de turnover est le plus court. A côté de cela une fraction azotée liée aux supports minéraux ne subit pas de variation à l'occasion de la mise en culture, même après soixante quinze ans de culture continue.

On retrouve ce même type de variation en comparant divers types de sol

classés en fonction de leur activité biologique croissante et de leur rapport C/N décroissant dans l'humine (fraction non extractible par les réactifs alcalins).

Lors d'un inventaire préalable à l'étude d'une station ou à son utilisation pour des expériences de marquage, la multiplication des mesures de ce type permettra d'articuler de mieux en mieux les interprétations des phénomènes de stabilisation du carbone et de l'azote.

3. Bilans de la matière organique des sols après introduction de traceurs artificiels du carbone et de l'azote

3.1. Détermination des coefficients réels d'utilisation des engrais azotés apportés au champ (Tableau VI)

La politique traditionnelle de fertilisation depuis la fin du siècle dernier était étayée sur les mesures de coefficients apparents d'utilisation C.A.U. basés sur l'hypothèse d'un prélèvement identique de l'azote du sol par les plantes des parcelles fertilisées et non fertilisées. De plus on supposait implicitement que l'azote engrais était prélevé avant d'avoir participé aux synthèses microbiennes de composés organiques et qu'il n'était pas réexsudé par les racines avant la récolte.

Les premières mesures de coefficient réel d'utilisation C.R.U. ont vite montré que ces hypothèses n'étaient pas fondées et que la réalité était beaucoup plus complexe.

En effet, l'emploi d'engrais marqués permet de montrer qu'au champ, le coefficient réel d'utilisation ne dépasse pratiquement jamais 60 % des quantités introduites et reste généralement de l'ordre de 30 à 40 %. Dans l'exemple que nous avons tiré de la participation de J. PICHOT (1983) au séminaire de PLANALINA, on voit aussi que le C.R.U. diminue quand augmente la dose d'engrais apporté ou celle de compost ou de paille qui l'accompagne.

Ceci pose le problème du devenir des engrais qui ne sont pas absorbés par la récolte de la première année. Seront-ils utilisés l'année suivante ou sont-ils définitivement perdus ? La réponse dépend du type de sol et de la présence ou de l'absence d'un amendement organique. Mais dans tous les cas pour la connaître, il faut faire un bilan complet et ne pas se contenter d'une simple mesure de coefficient d'utilisation.

Le deuxième exemple que nous avons choisi pour montrer l'intérêt des informations tirées de l'utilisation d'engrais marqués présente les résultats d'une culture de riz pluvial. On voit tout d'abord que l'engrais est beaucoup mieux utilisé si on l'apporte à la montaison qu'au moment du semis. Mais, en outre, on voit que le C.R.U. passe par un maximum bien avant la récolte. Cette constatation montre que la plante réexsude probablement à la fin de sa vie une partie de l'engrais absorbé. Enfin, dans cette même expérience, on a calculé la part de l'azote exporté par les parties aériennes qui venait, directement ou non, de l'engrais. Dans le meilleur des cas elle ne dépasse pas 30 %. Dans cette culture de riz, 70 % de l'azote exporté vient de l'azote du sol ou de l'azote fixé. Dans une expérience similaire sur maïs où la fixation libre est très faible la proportion d'azote dérivé du fertilisant N.D.F., est du même ordre de grandeur que pour le riz mais elle est plus élevée si l'engrais est apporté au moment du semis, que s'il est apporté un mois après.

Sans entrer plus avant dans le détail de l'analyse de tels résultats ces quelques commentaires suffisent à montrer que dès leur introduction dans le sol, les engrais azotés entrent dans un jeu complexe d'échanges multiples avec l'azote minéral et organique préexistant dans le sol, avant d'être absorbé par la plante. De plus, il peut éventuellement ressortir par exsudation avant même la récolte des parties aériennes. C'est pourquoi la notion d'azote minéralisé ou d'azote minéralisable n'est que faussement simple car l'apparition ou même l'accumulation d'azote minéral qui peut parfois se produire n'est que le résultat net des processus contradictoires de minéralisation et d'organisation. Seuls les traceurs isotopiques permettent d'aborder ces problèmes qui sont en relation directe avec l'optimisation de la fertilisation et le contrôle de la pollution des eaux.

3.2. Etude des sols provenant des expériences de longue durée à l'aide de cultures de plante test (Tableau VII)

Il n'est pas toujours possible ni même souhaitable d'organiser au champ des expériences avec des engrais marqués car elles sont toujours onéreuses et que l'on n'est jamais sûr de les réussir puisqu'on ne maîtrise pas les conditions météorologiques.

Enfin une expérience d'enfouissement d'azote quinze au champ ne peut être suivie plus de cinq ou six ans avec une précision suffisante au niveau de la mesure des excès isotopiques dans les échantillons de plante.

Ce sont ces deux raisons qui donnent tout son intérêt à la méthode indirecte d'utilisation du traceur.

Parmi les nombreuses expériences dont les résultats ont été présentés récemment par G. GUIRAUD (1984) nous avons retenu celle qui a servi à étudier l'effet d'une fertilisation minérale organique et mixte au bout de cent ans de culture ininterrompue pour le témoin sans engrais.

Les autres traitements sont les suivants :

- N.P.K. (87, 40, 75) pendant 73 ans
- Fumier d'étable (10 T/Ha) pendant 46 ans
- Fumier pendant 46 ans + N.P.K. pendant 9 ans

La culture de Ray-grass (*Lolium perenne* var. *italicum*) a été effectuée sur des pots de 200 g de terre ayant reçu soit 9 ug/g d'azote quinze presque pur soit 75 ug/g d'azote quinze dilué au deux tiers ($E = 33\%$).

Si on prend soin de calculer les quantités qui viennent du sol dans l'ensemble de l'azote exporté par les parties aériennes, on s'aperçoit que l'on peut classer les parcelles par ordre de fertilité croissante : T, NPK, F, F+NPK les deux dernières n'étant pas significativement différentes entre elles.

Par ailleurs, si on regarde les excès de l'azote des racines on s'aperçoit tout d'abord qu'il est systématiquement inférieur à celui des parties aériennes dans tous les traitements et qu'en plus, il est d'autant plus bas que le sol est au départ plus riche en azote organique. Cette différence est moindre lorsqu'on a ajouté au sol les 75 ug d'azote minéral. Ce résultat parmi beaucoup d'autres semblables nous a conduit à penser qu'il est possible que les racines transfèrent avec un certain retard l'azote provenant du stock d'azote organique du sol.

Cette expérience est riche d'enseignement sur beaucoup de plans. En ce qui concerne l'évaluation de la fertilité, nous en retiendrons que de simples cultures de plante test en vase de végétation peuvent permettre d'évaluer très finement la participation de la matière organique du sol à la fertilité. Elle permet en outre de séparer plus facilement les racines qu'au champ après la culture et de faire un bilan complet ce qui permet d'évaluer les pertes par voie gazeuse avec précision grâce à l'absence de tout lessivage. Enfin elle n'oblige pas l'expérimentateur à faire des hypothèses comme celles sur lesquelles repose le calcul de la valeur A (FRIED 1980) dont les variations apparemment incompréhensibles sont dues au fait que l'on néglige les pertes et les échanges réciproques et constants entre formes organiques et minérales de l'azote pendant toute la durée de la culture.

3.3. Culture de plantes doublement marquées en conditions contrôlées (Tableau VIII)

Il est impossible de faire des bilans complets et simultanés des apports de carbone et d'azote par une culture effectuée au champ. L'apport de carbone photosynthétisé pendant une culture ne peut être évalué et l'azote introduit dans le sol est dilué dans une telle quantité de matière organique préexistante qu'il devient très difficile de le mesurer avec précision.

Pour être complets et précis, ce genre de bilans doit donc être effectué au laboratoire.

La culture de maïs doublement marqué que nous avons réalisée avait trois objectifs principaux :

- faire un bilan des apports organiques au sol en essayant de distinguer les apports racinaires s.s. la rhizodéposition et l'organisation microbienne.
- optimiser le coefficient réel d'utilisation de l'engrais azoté en asservissant l'irrigation fertilisante à la photosynthèse et à la courbe de transpiration.
- étudier par un fractionnement de la matière organique marquée, la répartition du carbone et de l'azote apportés au sol par la rhizodéposition.

Quatre pieds de maïs ont donc été cultivés jusqu'à maturité sur quatre colonnes contenant chacune 30 kg de sol préalablement fertilisé à raison de 150 mg/kg de P et K. Les 150 mg d'azote nitrique ont été apportés en 17 fois à concentration constante avec l'eau d'irrigation dont la quantité était déterminée par la transpiration de la semaine précédente. Les colonnes de sol étaient maintenues en dépression par rapport à l'atmosphère de la cellule de culture pour évacuer le CO_2 de la respiration du sol et des racines.

3.3.1. Le bilan de la culture

Les pertes d'azote sont réduites au minimum, les C.R.U. pour les P.A. atteignent 80 %, il ne reste pas d'azote minéral au moment de la récolte, où l'apport d'azote organique au sol est de l'ordre de 15 % de l'engrais apporté dont 9 % dans les racines. Les 6 % restant résultent pour moitié de la rhizodéposition et pour moitié de l'organisation microbienne.

La moitié de l'azote exporté provient du fertilisant. Le sol a donné une quantité d'azote équivalente à 40 % de l'azote apporté par le fertilisant, soit trois fois plus qu'il n'en a reçu. Seule une restitution des pailles permettrait de compenser ces pertes et même de procurer au sol un enrichissement égal environ au tiers de l'engrais apporté.

Ce genre de bilans n'est pas aussi facile à calculer pour le carbone.

On peut apprécier les gains de carbone par la mesure de la radioactivité présente dans le sol et les racines à la fin de la culture. Ils sont de l'ordre de 25 g par pied de maïs. Les conditions de l'expérience tendent à exagérer les pertes que nous avons estimées à 55 g par pied. Le déficit pour le sol serait donc de l'ordre de 30 g dont quinze pourraient provenir du carbone préexistant à cette culture. Le sol s'appauvrit donc en C à l'occasion d'une culture.

Pour replacer ces résultats dans un contexte plus réaliste nous pouvons les transposer aux conditions du champ sur la base d'une densité de 80 000 pieds de maïs à l'hectare.

Si on admet que la perte annuelle de carbone est de l'ordre d'une tonne par respiration du carbone préexistant et que 80 % du carbone des résidus de récolte sont destinés à être métabolisés dans l'année on aura une perte de 600 kg de carbone si on ne restitue pas les pailles et un gain de 500 kg si on restitue 6 T de paille.

En ce qui concerne l'azote, compte tenu des pertes par dénitrification, le sol perdra 130 kg d'azote si on ne restitue pas les pailles et en gagnera 70 si on les restitue.

De tels bilans correspondant à une récolte moyenne (5,5 T de grains par hectare) permettent de prévoir l'éventuelle dégradation des sols sous l'effet de la culture sans restitution des résidus de récolte. L'éventuelle amélioration de leur statut organique sous l'effet de ces restitutions est à estimer en fonction de leur état initial, mais aussi des pertes par lessivage et par érosion que nous n'avons pas pris en compte dans nos raisonnements. Elle dépendra également de la stabilisation à plus ou moins long terme des apports organiques laissés par chaque culture.

3.4. Répartition du carbone restant au sol après la culture (Tableau VIII)

Pour avoir une idée de cette stabilisation, nous avons tamisé la matière organique marquée par cette culture avant et après extraction alcaline par le pyrophosphate de sodium afin d'estimer l'importance respective des débris figurés, ces ciments solubles par échange ionique et complexation et des particules insolubles et métabolites adsorbés sur les argiles.

C'est dans cette dernière fraction que nous avons trouvé environ la moitié du ^{14}C et du ^{15}N restant dans le sol après élimination des racines vivantes au moment de la récolte.

Cette fraction insoluble est obtenue après dissolution des ciments humiques par le pyrophosphate de sodium ces ciments contenant un peu plus du tiers de l'azote mais seulement 10 % du carbone marqué. En effet, les prétraitements par l'eau et l'acide dilué avaient préalablement entraîné un tiers du carbone quatorze mais pas d'azote quinze.

Le pouvoir discriminant de ce fractionnement est assez bon pour le carbone mais quasi nul pour l'azote puisque toutes les fractions sont à peu près uniformément marquées.

Son avantage est d'avoir clairement montré le rôle stabilisant des argiles vis à vis des exsudats racinaires et des métabolites microbiens. En effet cette fraction fine insoluble a un rapport C/N de l'ordre de 7 qui correspond à ce type de composés.

CONCLUSION

Sans anticiper sur les résultats de ces expériences en cours, nous pouvons maintenant conclure en revenant à notre propos initial.

Nous avons dit en introduction que le concept de fertilité était finalement assez proche de celui de productivité du système sol-plante. Mais pour évaluer correctement cette productivité il faut tenir compte non seulement des gains mais aussi des pertes.

Nous avons vu qu'il est possible, sinon facile d'évaluer une partie des gains connaissant la quantité de matière sèche récoltée et le rapport racines/parties aériennes, et ceci sans aucun traceur.

L'évaluation des apports non racinaires est impossible sans traceur dans des expériences de courte durée, car ils viennent se diluer dans une telle masse de carbone et d'azote préexistant qui est réparti de manière tellement hétérogène que les quantités à évaluer sont bien inférieures à la précision des dosages chimiques.

De la même manière les pertes se font en partie aux dépens du stock de matière organique accumulé depuis des millénaires dont les variations annuelles sont trop infimes pour être décelables. Faute de pouvoir organiser beaucoup d'expériences séculaires, il nous faut donc multiplier les expériences dans lesquelles les traceurs isotopiques nous font accéder à la cinétique des flux d'entrée et de sortie.

L'utilisation des traceurs isotopiques naturels constitue une première étape qui doit être effectuée avant toute pollution des sites par les traceurs artificiels. A elle seule, elle peut apporter beaucoup de renseignements sur la dynamique du carbone et de l'azote dans la matière organique du sol de la station considérée. Ceci fait, on pourra organiser des expériences de marquage artificiel dont l'intérêt sera d'autant plus grand que les arrière effets pouvant être suivis plusieurs années.

Les résultats de telles expériences pluriannuelles pouvant servir à la validation de modèles simulant mathématiquement l'évolution du statut organique des sols. La structure de ces modèles pourra être très différente selon que l'on voudra faire des prévisions à l'échelle de la saison de végétation et de l'hectare ou tester telle ou telle hypothèse sur l'importance d'un mécanisme particulier tel que la cellulolyse, la volatilisation ou la dénitrification.

Pour mettre en rapport la fertilité avec la matière organique il faut établir des bilans auxquels seuls les traceurs pouvaient donner une précision convenable.

C'est là une condition nécessaire mais non suffisante. Les études qualitatives chimiques, biologiques, écologiques sont plus que jamais nécessaires pour mieux connaître les constituants organiques des sols et être capable de prévoir leur comportement.

Nous souhaitons quant à nous que de telles recherches soient faites dans le cadre de bilans quantitatifs les plus précis possibles en associant chaque fois que ce sera possible les traceurs du carbone et de l'azote au laboratoire, comme au champ.

BIBLIOGRAPHIE

BALESDENT J., 1982. Etude de la dynamique de l'humification des sols de prairie d'altitude (Haut Jura) au moyen des datations ^{14}C des matières organiques. Thèse Doc. Ing. Univ. Nancy I, 90 p.

BOISSEZON de P. MOUREAUX C., BOQUEL G., BACHELIER G., 1973. La matière organique et la vie dans les sols ferrallitiques. In Les sols ferrallitiques, tome IV, Initiation-Documents techniques, n° 21 ORSTOM Paris 1973.

CHARREAU C., 1974. Organic matter and biochemical properties of soil in the dry tropical zone of west africa. Report of the FAO/SIDA Expert consultation Rome 2/6 décembre 1974.

FELLER C., GUIRAUD G., GANRY F., 1982. Soil organic matter and nitrogen interaction in a tropical agrosystem. Study by size organic matter fractionation and isotope techniques. Coloquio regional sobre materia organica do solo. Brasil.

FRIED M., 1980. ^{15}E , L, and A values. FAO AIEA Interregional training course on the use of ^{15}N in soil science and plant nutrition. Edited by H. FAUST 1980 n° 32, 76-92.

GUCKERT A., 1973. Contribution à l'étude des polysaccharides dans les sols et leur rôle dans les mécanismes d'agrégation. Thèse Doc. Etat Univ. Nancy I, 124 p.

GUILLET B., 1972. Relation entre l'histoire de la végétation et la podzolisation dans les Vosges. Thèse Doc. Etat Univ. Nancy I, 112 p.

GUIRAUD G., 1984. Contribution du marquage isotopique à l'évaluation des transferts d'azote entre les compartiments organiques et minéraux dans les systèmes sol-plante. Thèse Doc. Etat Univ. Paris VI, 335 p.

HENIN S., DUPUIS M., 1945. Essai de bilan de matière organique du sol. Ann. Agro. 15, p. 17-29.

HETIER J.M., GUIRAUD G., MOUTONNET P., BOSSY A., MAROL Ch., CHONE Th., SCHOULLER E., FARDEAU J.C., ANDREUX F., 1980. Culture de maïs en milieu contrôlé : Analyse des bilans d'azote et de carbone par ^{15}N et ^{14}C . Sc. du sol, 2, 127-139.

HETIER J.M., ANDREUX F., SCHOULLER E., MAROL C., 1984. Rhizodeposition as organic matter input to the soil after a labelled ^{14}C , ^{15}N cultivation (à paraître).

JENKINSON D.S., RAYNER J.H., 1977. The turn over of soil organic matter in some of the Rothamstead experiments. *Soil science*, vol. 123, n° 5, 298-305.

MARIOTTI A., 1982. Apports de la géochimie isotopique à la connaissance du cycle de l'azote. Thèse Doc. Etat Univ. Paris 6, 476 p.

OLSON R.A., 1978. Isotope studies on soil and fertilizer nitrogen. Isotope and radiation studies in research on soil plant relationships A.I.E.A. Vienne 3.32.

PICHOT J., 1983. La balance de l'azote dans quelques systèmes tropicaux. Séminaire I.R.A.T. C.P.A.C. Planaltina Bresil 28/11-03/12/83.

PICARD D., 1976. Dynamique racinaire de *Panicum maximum* Jacq. et apport au sol de matière organique. Thèse Doc. Etat Univ. Clermont-Ferrand, 275 p.

TALINEAU J.C., BONZON B., FILLONEAU C., HAINNEAUX G., 1980. Contribution à l'étude d'un agrosystème prairial dans le milieu tropical humide de la Côte d'Ivoire. 2 Analyse des données relatives à la matière organique. Cah. ORSTOM ser. Pedol. vol. 18, p. 29-47.

TURENNE J.F., RAPAIRE J.L., 1979. Culture itinérante et jachère forestière. Mesure d'activité spécifique du carbone de fractions organiques appliquées à l'étude du renouvellement du stock organique en milieu forestier tropical. In *Isotopes and radiation in research on Soil-Plant relationships*. COLOMBO 11-15/12/1979.

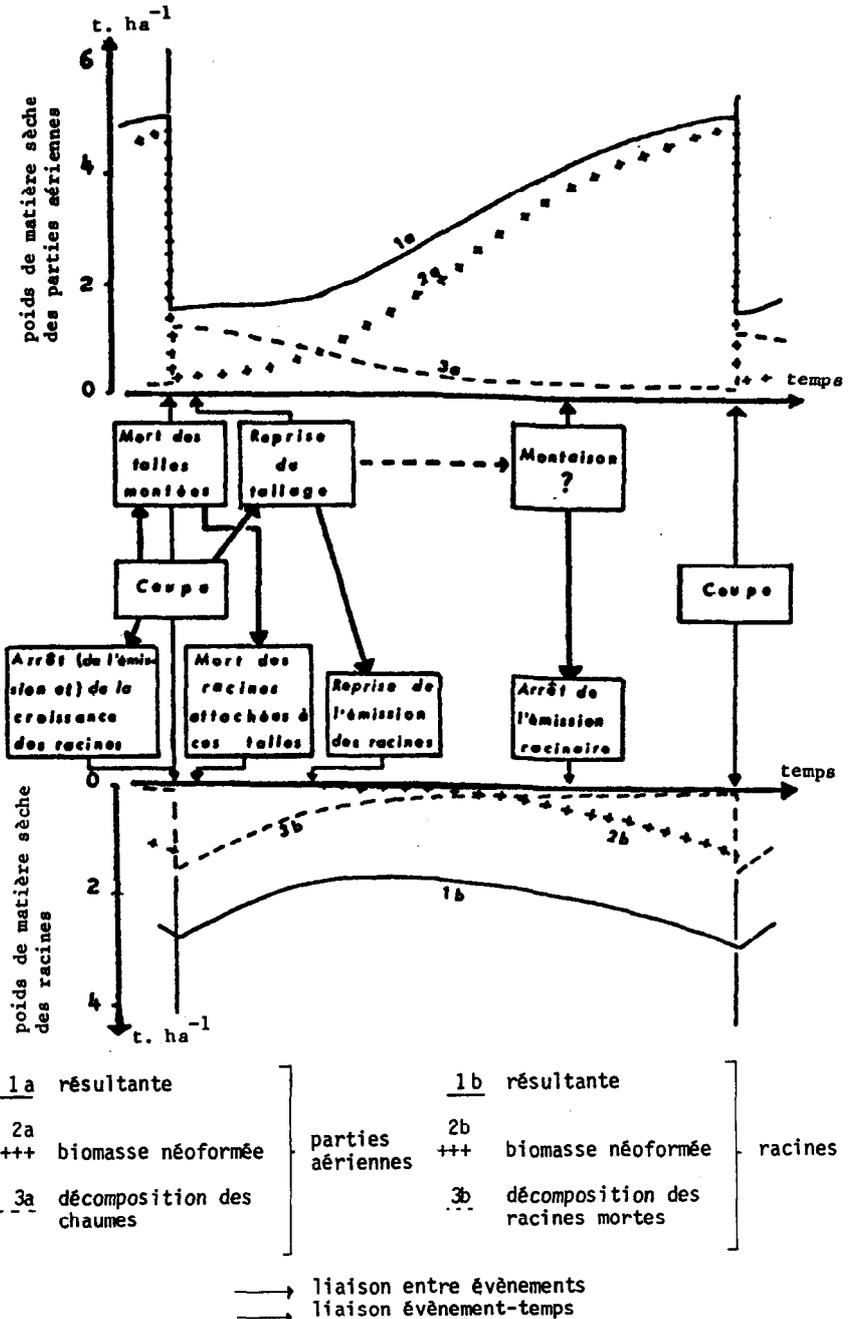
TABLEAUX

TABLAS

	Station	Panicum	Setaria	Penni- setum	Trip- sacum	Bra- chiararia	Cynodon	Stylo- santhes	Centro- sema	
Litière	Apports moyens annuels 3 rép.	A	411	394	435	1 079	565	814	227	423
Racines	Apports moyens annuels 3 rép.	A	278	401	321	801	391	392	38	50

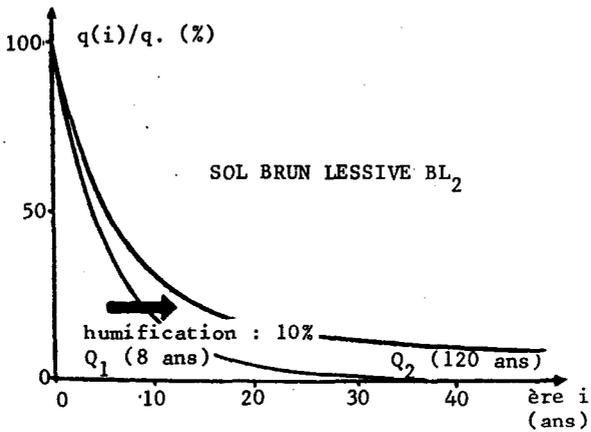
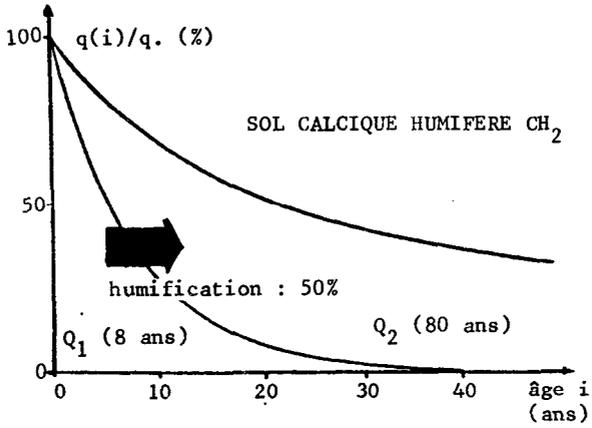
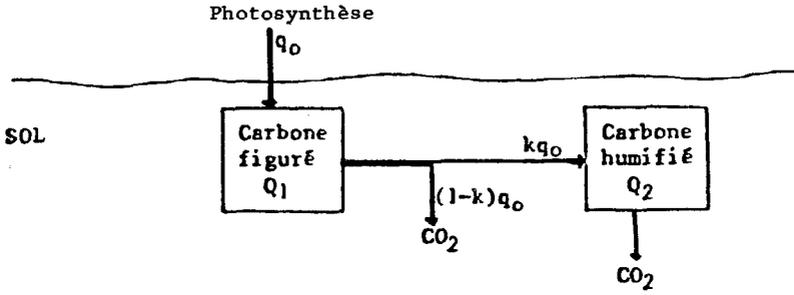
Tab. II (Talineau et al., 1980)

Estimation de la production moyenne annuelle de litière et de racines en g.m⁻² et répartition en première année. Calculs effectués sur 4 ans à Adiopodoumé



Tab. III (Picard, 1976)

Schéma théorique de l'évolution des masses végétales dans un intercoupe



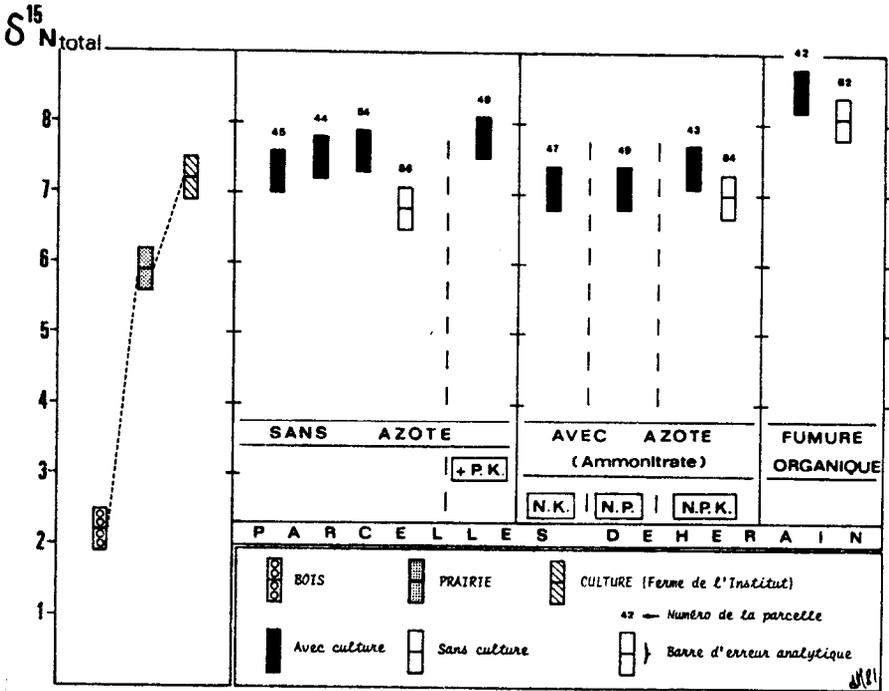
Tab. IV (Balesdent, 1982)

Sol	1/b ₁ (ans)	Q ₂ /Q ₁ en A ₁	δ ¹⁴ C du C humifié (‰) en A ₁	1/coefficient de minéralisation (temps de turnover) 1/b ₂ (ans)	Coefficient d'humification k (%)
CH ₁	12	8,25	- 9 ± 8	250	40
BL ₁	5	5,5	+ 86 ± 10	85	32
CH ₂	8	5,9	+ 82 ± 9	80	59
BL ₂	6	3,2	+ 57 ± 12	120	16

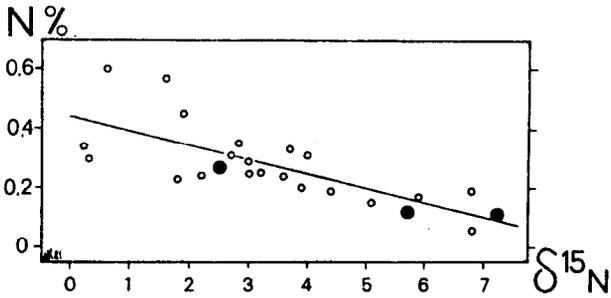
$$\delta^{14}\text{C} = \frac{A - A_0}{A_0} \times 1000 \quad \begin{array}{l} A_0 = \text{R.A.S. étalon} \\ A = \text{R.A.S. échantillon} \end{array}$$

suite tab. IV

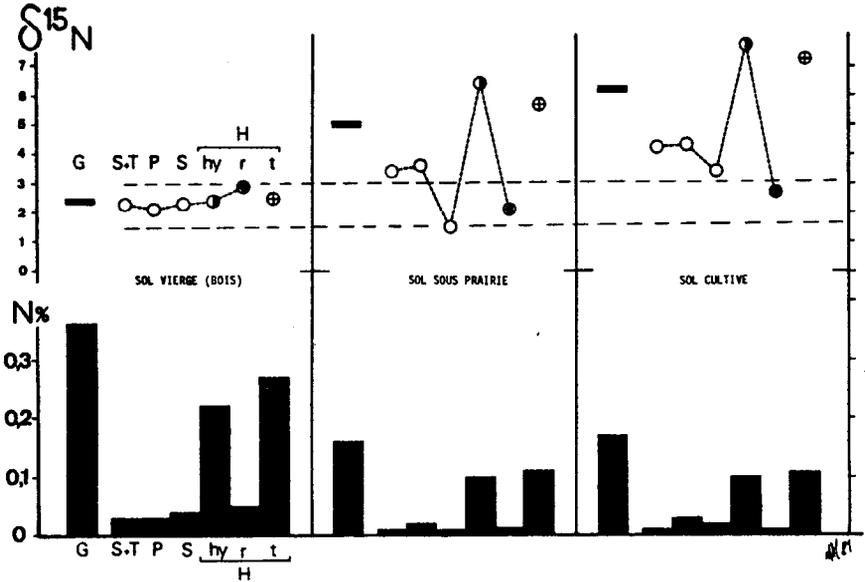
Coefficients de minéralisation b_2 et coefficient d'humidification k_1 des quatre sols, calculés à partir de la mesure de l'activité C du compartiment humifié, du rapport de la qualité Q_2 de carbone humifié à la quantité Q_1 de carbone figuré, et du temps de turnover $1/b_1$ du compartiment figuré.



Grignon. Composition isotopique de l'azote total des sols sous divers couverts végétaux et des sols des parcelles Dehéraïn



Tab. V (Mariotti, 1982)



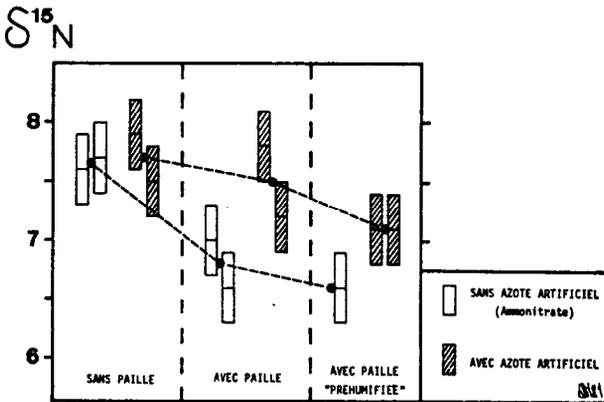
Compositions isotopiques et teneurs en azote des différentes fractions séparées granulométriquement puis par extraction alcaline et hydrolyse acide, sur l'exemple de sols sous divers couverts végétaux.

G : Echantillon total (fraction inférieure à 50 μm)

S + T : Soude + Tétraborate ; P : Pyrophosphate ; S : soude 0,1 N

H : Humine (hy : fraction hydrolysable ; r : résidu d'hydrolyse ;

t : total de l'humine)



Composition isotopique de l'azote total des sols non cultivés du dispositif dit "des 36 parcelles" à Grignon. Par azote "artificiel" on entend "d'origine industrielle"

Tab. V (suite)

Traitements		Rendements kg.ha ⁻¹	Quantité d'azote kg/ha		C.U. réelle %				
					1er apport		2e apport		
					Grains secs	grain	total	grain	total
<u>BOUAKE</u>									
Sans apport de paille	N 100	4 800	85	123	27	46	34	43	
Avec apport de 5T de paille	N 100	5 150	87	132	27	42	33	44	
<u>GAGNOA</u>									
Sans apport de paille	N 50	5 300	88	120	19	30	43	56	
	N 100	5 200	90	127	12	24	32	44	
Avec apport de 5T de paille	N 50	5 400	84	115	21	31	29	46	
	N 100	5 200	85	116	17	26	30	42	
<u>GAGNOA</u>									
Sans compost	N 80	5 000	73	106	22	32	31	46	
Avec compost (10T/ha de M.S.)	N 80	5 500	80	101	23	32	22	37	

Tab. VI (Pichot, 1982)

Utilisation de l'azote-engrais par le maïs H 507 en Côte d'Ivoire
(d'après Chabalier et Pichot (5))

Traitements			Prélèvements en cours de végétation			Prélèvements à la récolte 6-8			
			28.5 1er apport	12.7 1er apport 2e apport		Grains 1er apport 2e apport		Paille 1er apport 2e apport	
100 N	0	Paille	27,0	18,8	12,2	16,1	20,7	21,2	12,8
	5T/ha	Paille	24,7	18,6	10,1	15,0	19,2	17,4	13,2
200 N	0	Paille	35,4	29,6	10,3	27,8	17,4	33,2	11,8
	5T/ha	Paille	37,0	22,8	12,9	24,1	17,7	26,2	13,0

Tab. VI (suite)

Contribution de l'azote-engrais aux prélèvements d'azote par le maïs en Côte d'Ivoire (d'après Chabalier (2))

N.B. : 1er apport : 1/2 au semis - 2è apport : 1/2 à la montaison

Traitements			Prélèvements en cours de végétation				Prélèvements à la récolte			
			24.7 1er apport	10.9 1er apport	28.9 1er apport 2e apport		Grains 1er apport 2e apport		Paille 1er apport 2e apport	
60N	0	Paille	12,3	13,4	17,7	18,1	13,1	22,2	9,3	17,3
	5T/ha	Paille	11,1	10,5	9,7	22,1	9,8	19,5	11,7	17,8
120N	0	Paille	18,3	17,1	20,0	27,4	15,3	32,5	14,7	27,3
	5T/ha	Paille	14,9	15,4	17,1	24,0	14,1	28,5	13,8	24,9

Tab. VI (suite)

Contribution de l'azote-engrais aux prélèvements d'azote par le riz pluvial en Côte d'Ivoire (d'après Chabalier (2))

N.B. : 1er apport : 1/2 au semis - 2è apport : 1/2 à la montaison

		SE		NPK		F		FNPK	
		ON	N	ON	N	ON	N	ON	N
Partie aérienne 1ère coupe	Poids sec (g)	1,17	2,66	1,50	3,02	1,68	2,81	1,66	2,98
	QN (mg)	19,4	58,4	25,0	70,5	28,8	62,1	26,7	68,8
	E %	19,03	22,41	16,55	20,60	13,92	19,31	14,36	19,35
	Q ¹⁵ N (mg)	3,69	13,09	4,14	14,52	4,01	11,99	3,83	13,31
Partie aérienne 2ème coupe	Poids sec (g)	0,47	1,16	0,54	1,03	0,65	1,16	0,58	1,10
	QN (mg)	5,8	11,3	7,0	11,6	8,5	13,2	8,0	12,6
	E %	10,94	16,86	9,77	15,98	7,63	14,99	8,09	15,02
	Q ¹⁵ N (mg)	0,63	1,91	0,68	1,85	0,65	1,98	0,65	1,89
Partie aérienne Total	Poids sec (g)	1,64	3,82	2,04	4,05	2,33	3,97	2,24	4,08
	QN (mg)	25,2	69,7	32,0	82,1	37,3	75,3	34,7	81,4
	Q ¹⁵ N (mg)	4,32	15,00	4,82	16,37	4,66	13,97	4,48	15,20
Racines	QN (mg)	9,8	11,7	12,9	13,5	10,2	16,5	13,7	13,6
	E %	7,39	13,14	6,37	11,81	5,97	10,7	5,29	10,40
	Q ¹⁵ N (mg)	0,72	1,54	0,82	1,59	0,61	1,77	0,72	1,41
Sol	QN (mg)	1066	1056	1223	1266	1443	1409	1416	1366
	E %	0,136	0,246	0,107	0,242	0,103	0,184	0,090	0,198
	Q ¹⁵ N (mg)	1,45	2,60	1,31	3,06	1,49	2,59	1,27	2,70
Total	QN (mg)	1101	1137	1268	1362	1491	1501	1464	1461
	Q ¹⁵ N (mg)	6,49	19,14	6,95	21,02	6,76	18,33	6,48	19,31

	QN ajoutée (mg)	E %	Q ¹⁵ N (mg)
QN	8,9	96,25	8,57
N	73,25	32,64	23,91

- Bilan général azote

	"SE"	"NPK"	"FNPK"	"F"
(ON) :	20,7	26,8	30,1	33,2
(N) :	23,7	31,0	32,1	35,1

Quantité d'azote issue du sol dans les parties aériennes en mg. kg sol⁻¹ (ppm). (les accolades signifient que les valeurs ne sont pas significativement différentes)

Tab. VII (Guiraud, 1984)

TRAITEMENT Treatment	FRACTIONNEMENT GRANULOMETRIQUE DU SOL									
	Soil particle size fraction									
	F 2000		F 200		F 50		FOM		W	
	^{14}C	^{15}N	^{14}C	^{15}N	^{14}C	^{15}N	^{14}C	^{15}N	^{14}C	^{15}N
Pm	8,6	1,6	54,7	36,9	15,5	25,6	18,9	32,2	2,3	3,7
Pm - U	13,1	3,9	53,4	33,3	11,9	23,3	19,2	29,8	2,4	9,7

Répartition ^{14}C -paille et ^{15}N dans le sol de surface après culture
 Résultats exprimés en % de la teneur du sol de surface après culture

TRAITEMENT Treatment	FRACTION GRANULOMETRIQUE DU SOL				
	Soil particle size fraction				
	F 2000	F 200	F 50	FOM	W
T - Um	1,9	7,1	7,7	22,7	60,6
P - Um	3,1	6,5	8,0	21,5	60,9
Pm - U	3,9	33,3	23,3	29,8	9,7
CP - Um	3,5	28,9	20,3	37,7	9,3

Répartition de ^{15}N -urée et ^{15}N -paille dans le sol de surface après culture
 Résultats exprimés en % de la teneur du sol de surface après culture

Tab. VII (Feller et al., 1982)

Le fractionnement du sol (suite Tab. VIII)

A la récolte les parties aériennes sont exportées mais les racines vivantes ne sont pas isolées du sol. Celui-ci est ensuite fractionné par le tamisage¹⁰. Nous rappelons brièvement la méthode utilisée.

La totalité du sol de chaque répétition (environ 7 kg) est tamisée à sec à 2000 μm puis une aliquote de 600 g de la fraction inférieure à 2000 μm est tamisée sous eau à 200 et 50 μm . On sépare ainsi les fractions granulométriques suivantes :

- F 2000 : (taille supérieure à 2000 μm) : débris végétaux très grossiers peu ou pas humifiés,
- F 200 : (taille 200-200 μm) : sables + débris végétaux grossiers peu humifiés,
- F 50 : (taille 50-200 μm) : sables + débris végétaux fins humifiés,
- F O M : (taille 0-50 μm) : fraction organominérale (humus s.s.),
- W : (eaux de fractionnement) : fraction hydrosoluble.

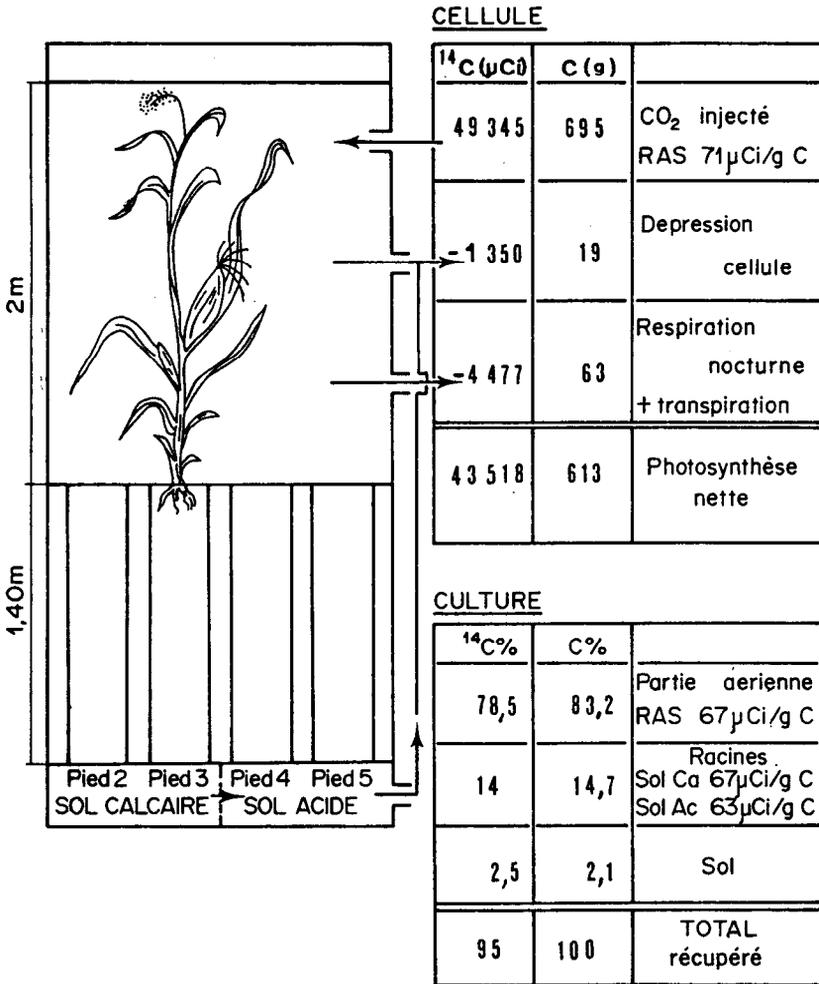
F O M est séparée de W par floculation à HC 1 (pH 2,0) et centrifugation.

Cette méthode permet l'obtention de trois formes de matières organiques :

- les matières organiques figurées, constituées surtout de débris végétaux à divers degrés d'humidification retrouvés dans les fractions supérieures à 50 μm (F 2000, F 200, F 50) nommées fractions végétales,
- les matières organiques non reconnaissables liées à la matière minérale, complexe organominéral (humus s.s.), retrouvées dans la fraction 0-50 μm (F O M),
- les matières organiques (ou minérales) hydrosolubles W retrouvées dans les eaux de fractionnement.

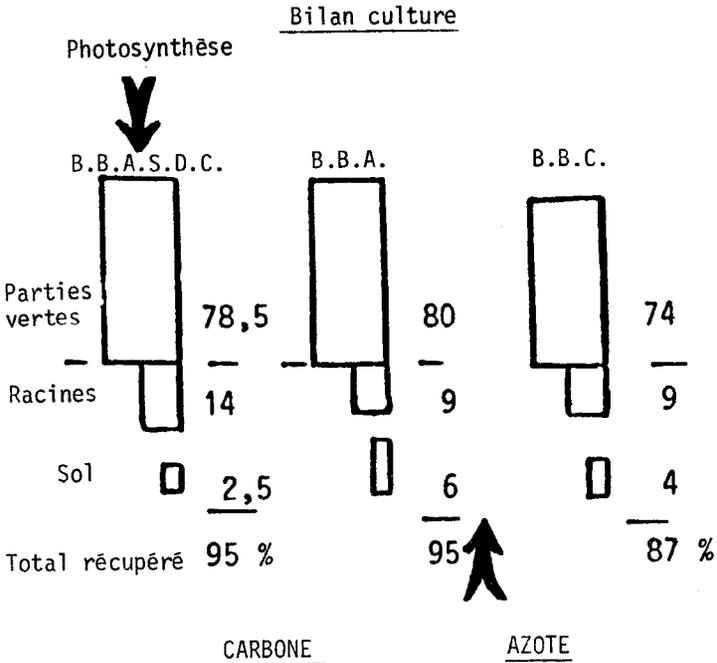
Le degré d'humidification est croissant de F 2000 à F O M.

BILANS

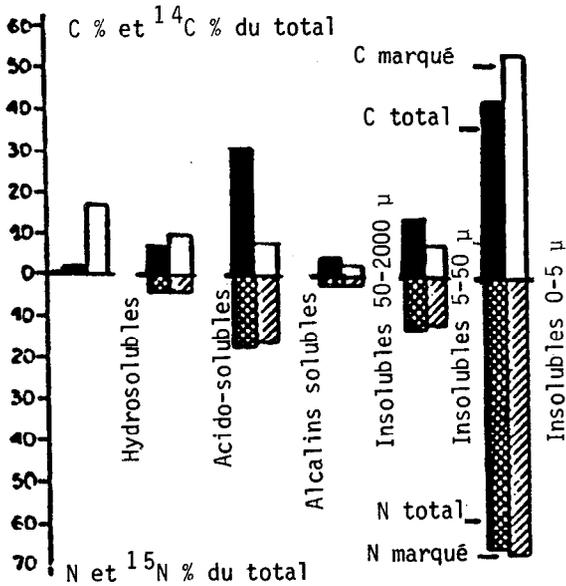


Bilan général en carbone

Tab. X (Hétier et al., 1980 et 1984)

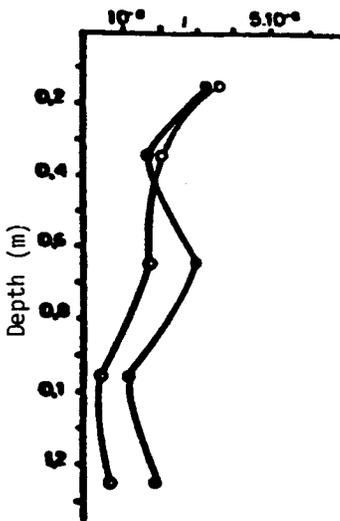
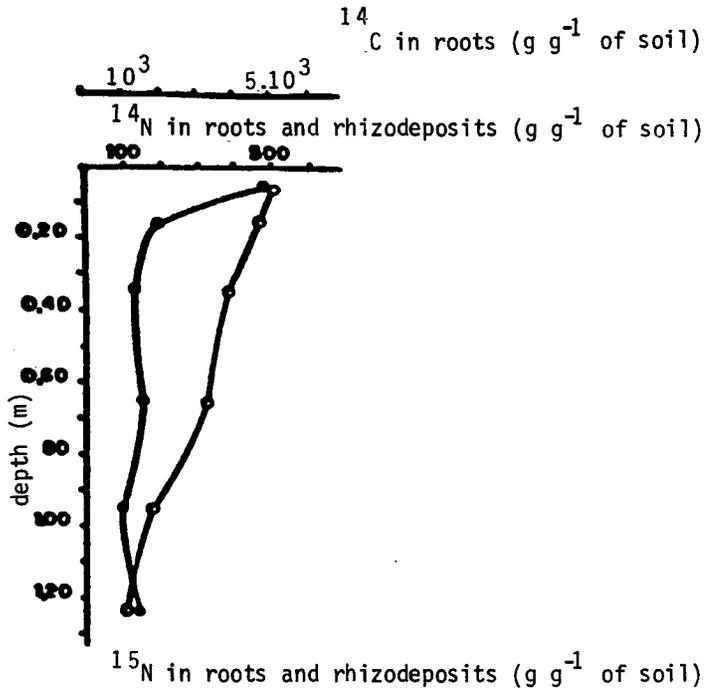


Bilan général de la culture



Répartition C et N dans la deuxième couche de sol

Tab. IX (suite)



Répartition des traceurs
Tab. X (suite)