

Capacité d'échange cationique provenant de l'enfouissement de paille de luzerne dans le sol

Paul de BOISSEZON (1), Gérard BELLIER (2), Jean-Claude BRION (2),
Evelyne GAVINELLI (1), Joël FARDOUX (1).

(1) Orstom, BP 5045, 34032 Montpellier Cedex 1, France.

(2) Orstom, 72 route d'Aulnay, 93143 Bondy Cedex 1, France

RÉSUMÉ

L'effet sur la capacité d'échange cationique (CEC) à pH : 7, de l'enfouissement à différentes doses de paille de luzerne dans un brunisol sur limon a été étudié sur des modèles de laboratoire à 28 °C pendant six mois.

Le suivi de l'évolution des matières organiques pour différentes doses de paille enfouies dans l'horizon A des modèles a permis d'évaluer l'effet d'incitation et les vitesses de décomposition des matières organiques provenant du sol et de la paille ajoutée.

Dès le premier jour d'incubation, la CEC de l'horizon A enrichi en paille est inférieure à la somme des CEC du sol et de la CEC de la paille ; mais pour chaque durée d'incubation, la CEC de l'horizon A est significativement corrélée aux teneurs en carbone restant qui proviennent de la paille de luzerne enfouie. On a pu en déduire que la CEC des matières organiques provenant de la paille s'accroît en six mois de 100 à 230 cmol (+) kg⁻¹ de carbone. Toutefois en raison de la minéralisation rapide de ces matières organiques, l'accroissement de CEC qui provient de la paille décroît de moitié en 300 jours.

La capacité d'échange du sol est sensiblement égale à la somme des CEC des fractions granulométriques stables à l'eau ; mais dans chacune de ces fractions et particulièrement la fraction macroagrégée, des empêchements stériques paraissent masquer la relation existant entre la teneur en carbone organique et la CEC de ces fractions.

MOTS CLÉS : Capacité d'échange cationique – Amendement végétal – Brunisol – Fractionnement granulométrique.

ABSTRACT

CATION EXCHANGE CAPACITY DERIVED FROM ALFALFA STRAW INCORPORATED INTO SOIL

The influence of alfalfa straw - incorporated in different amounts into the A horizon of a Brunisol - on the cation exchange capacity (CEC) at pH : 7 was studied in laboratory models incubated at 28 °C for 6 months. A study on the evolution of organic materials after incorporation of various amounts of alfalfa straw helped to determine the priming effect of straw on decomposition of soil carbon. Two decomposition rates of the organic materials of the soil and incorporated straw were then estimated.

On the 1st day of incubation, the CEC of the A horizon amended with straw was lower than the sum of the CEC from soil and from straw. But after various incubation times, it was always significantly correlated with the remaining C contents derived from the alfalfa straw incorporated. It could be concluded that the CEC of organic materials deriving from straw, increased from 100 to 230 cmol(+) kg⁻¹ of C in 6 months. However, this increase in the CEC deriving from straw reduced by 50% in 300 days, because of the rapid mineralization rate of these organic materials.

The CEC of the A horizon was slightly equal to the sum of the CEC determined on each particle-size fraction separated by wet sieving. Nevertheless, steric hindrances in particle-size fractions - and in macroaggregates especially - appear to mask the relationship between the C contents and CEC of these fractions.

KEY WORDS : Cation Exchange Capacity – Organic Amendment – Brunisol – Particle-size fractions.

INTRODUCTION

La suppression des cultures fourragères dans l'assolement de la zone céréalière, la diminution des restitutions végétales, le brûlage des chaumes, l'intensification et l'approfondissement du travail du sol ont conduit dans les pays tempérés de l'Europe de l'Ouest à une dilution des matières organiques dans le profil cultural et surtout depuis une vingtaine d'années à une baisse du stock d'humus dans les terres cultivées (FARDEAU *et al.*, 1988).

Dans les pays intertropicaux, le raccourcissement, voire la suppression, de la jachère dans les zones densément peuplées a provoqué une diminution encore plus rapide des stocks organiques dans les terres, qui s'accompagne d'une dégradation de la structure et d'une perte de la fertilité. Cette baisse de la production des terres entraîne une baisse des restitutions végétales.

Dans les deux cas, l'enfouissement de fumier, compost, boues d'épuration, engrais vert et plus simplement de pailles ou autres résidus végétaux est préconisé pour remonter le stock organique du sol et par voie de conséquence, améliorer la structure et la capacité de stockage des éléments fertilisants et notamment de l'azote dans les terres.

L'incorporation de résidus végétaux ou d'amendements organiques dans l'horizon Ap du sol modifie rapidement le compartiment des matières organiques labiles et les propriétés qui sont dépendantes, qualitativement et quantitativement, de ces composés organiques dont l'espérance de vie est limitée. Une partie de ces effets est donc éphémère, spécialement dans les sols bien drainés des pays chauds et humides (JENKINSON *et al.*, 1977) ; de plus, l'apport de composés organiques a souvent une action stimulante sur la décomposition des matières organiques préexistantes dans le sol (JENKINSON, 1971).

L'étude comparée au champ de l'évolution des matières organiques enfouies dans le sol et des propriétés physico-chimiques qui en dépendent, se

heurte à différentes difficultés liées à l'hétérogénéité du sol, à l'inégale répartition des doses apportées, au remaniement des couches du sol par le labour, aux interactions avec le développement des cultures (BOISSEZON *et al.*, 1986). Le suivi des transformations rapides de ces amendements organiques dans les champs cultivés est particulièrement difficile à réaliser et les effets à court terme sur les propriétés physiques, chimiques ou biologiques du sol sont rarement significatifs.

Les relations qui existent entre la capacité d'échange cationique (CEC) des sols et leurs teneurs en matières organiques ont souvent été mises en évidence par l'analyse des régressions simples ou multiples, et par des mesures de la CEC des matières organiques par différence – avant et après extraction ou destruction des matières organiques – (BOISSEZON, 1970 et 1977). Toutefois les méthodes statistiques appliquées à des populations d'échantillons hétérogènes sont critiquables (DRAKE *et al.*, 1982), et les mesures indirectes par différence ne sont pas exhaustives (PRATT, 1957).

Les méthodes expérimentales étudient les variations dans le temps de la CEC et du stock de matières organiques dans un sol cultivé. Elles permettent d'évaluer, à moyen ou long terme, les modifications de la capacité d'échange, qui sont liées à un changement des restitutions végétales et aux pratiques culturales. Par exemple, l'étude de l'influence du défrichement et du travail des sols cultivés sur leurs caractéristiques montre les relations étroites qui existent entre la diminution du stock organique et la baisse de la CEC, particulièrement dans les sols tropicaux (FAUCK *et al.*, 1969).

Inversement, l'incorporation d'amendements organiques ne provoque pas toujours une augmentation significative et immédiate de la capacité d'échange des sols des parcelles enrichies, par exemple avec du fumier pailleux (BOISSEZON *et al.*, 1986), ou avec des copeaux de bois et du lisier de porc (NDAYE GAMIYE et DUBE, 1986), bien que dans les deux cas les teneurs en matières orga-

niques des sols aient été significativement accrues. Toutefois, lorsque l'apport de résidus végétaux ou de fumier est suffisamment massif ou répété, on observe une augmentation significative de la CEC (N'DAYEGAMIYE, 1990 ; LAX, 1991) ; mais l'accroissement de la capacité d'échange des sols enrichis ne dépend pas toujours du type d'amendement organique apporté (DELAS, 1971 ; GODEFROY, 1974).

On sait que les résidus végétaux, composts et fumiers possèdent une certaine capacité d'échange. Toutefois cette CEC croît avec le temps d'incubation, et sa mesure est même parfois utilisée pour apprécier le degré de maturation des composts (HARADA et INOKO, 1980).

Lorsque les pailles, composts ou fumiers sont enfouis dans le sol, les débris végétaux se fragmentent sous l'influence de la faune du sol et de la microflore. Une partie importante se minéralise plus ou moins rapidement en fonction de l'équilibre des facteurs trophiques et des conditions pédo-climatiques. Le reste s'humifie et donne naissance à des composés organiques d'origine résiduelle ou d'origine microbienne, qui peuvent se polymériser, former des granules ou se fixer sur les matières minérales du sol dans des complexes organo-minéraux relativement stables.

La minéralisation des amendements organiques enfouis dans le sol devrait donc entraîner une dimi-

nution relativement rapide de la capacité d'échange totale du mélange sol-amendement au cours des premiers mois. Cependant on connaît mal la rapidité d'évolution de la CEC du sol amendé et la part due aux transformations des matières organiques résiduelles ou celles récemment humifiées.

Pour étudier la cinétique à court terme de ces processus, dans des conditions de température et hydriques contrôlées, des modèles de laboratoire ont été réalisés avec apport de différentes doses de paille de luzerne. L'arrêt de l'évolution des modèles après différents temps d'incubation a permis de suivre le devenir des matières organiques et parallèlement l'évolution du complexe absorbant dans l'horizon A de ces modèles.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Sol utilisé et constitution des modèles

Le sol utilisé est un *sol brun* forestier, faiblement lessivé, ou *brunisol mésosaturé luvisque* (AFES, 1992), développé sur limon des plateaux du Bassin parisien et prélevé à Grignon. L'horizon A₁ (0-10 cm) possède un humus de type *mull acide*. L'horizon B (70-90 cm) neutre s'est développé dans un *löss décalcarifié*. Les caractéristiques de ces horizons sont résumées dans le tableau I.

TABLEAU I
Caractéristiques chimiques du brunisol sur limon et de la paille de luzerne ajoutée dans l'horizon A des modèles
Chemical properties of the silty brown soil and alfalfa straw incorporated into horizon A

Caractéristiques	Sol brun forestier		Paille de luzerne (0,2-2 mm)
	A1	B2	
horizon du sol	A1	B2	
horizon du modèle	A	B	
Mat.org. C mg g ⁻¹	25,6	3,94	402
N -id-	2,67	0,48	28,29
Rapports C/N %	9,6	8,3	14,21
Argille <0,002 mm	21,2	26,9	séchée
Limon f. 0,002-0,02	20,2	19,7	hachée et
Limon gr. 0,02-0,05	41,1	42,2	calibrée :
Sables f. 0,05-0,2	10,7	8,3	
Sables gr.0,2- 2 mm	1,1	0,3	(0,2-2 mm)
CEC _{pH:7} cmol (+) kg ⁻¹ .	19,84	17,30	57,05 cmol (+) kg ⁻¹ .
Cations Ca -id-	9,60	11,76	
échang. Mg -id-	2,17	2,05	
K -id-	0,39	0,40	
Na -id-	0,14	0,16	
pH _{H2O}	5,5	7,1	
pH _{KCl}	4,8	5,9	

N.B. C mg g⁻¹ ou teneur en carbone pour mille. Les cations échangeables et les capacités d'échange cationique sont exprimées en cmol (+) kg⁻¹.

L'analyse par diffractométrie X montre que la fraction inférieure à 2 μm est composée à parts à peu près égales par trois constituants argileux : smectite, illite ouverte et kaolinite. Cette fraction fine du sol contient également du quartz très fin et des traces de minéraux interstratifiés (de nature chloritique), des feldspaths potassiques (orthose), et de la goéthite (P. QUANTIN et G. MILLOT, *comm. pers.*). Nous verrons que la capacité d'échange des matières minérales de ce sol limoneux est de l'ordre de 20 $\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$.

Les surfaces spécifiques totales des horizons A₁ et B₂ mesurée par la méthode à l'EGME sont respectivement de 33 et 52 $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$.

Le dispositif expérimental a été réalisé en garnissant des allonges de verre avec la terre séchée à l'air, tamisée (2 mm) et homogénéisée de l'horizon A₁ (250 g) et de l'horizon B₂ (150 g) de ce brunisol. Les horizons A et B du modèle ont été séparés par un disque de gaze de tergal.

Les quatre doses (F₁ à F₄ : 0 - 2,5 - 5 et 7,5%) de paille de luzerne séchée, hachée et calibrée (0,2 à 2 mm) ont été soigneusement mélangées avec le sol de l'horizon A avant remplissage à sec des modèles.

CONDITIONS D'INCUBATION

L'humectation a été réalisée *per ascensum* afin de chasser les bulles d'air et pour être certain que tous les modèles ont été également humectés. Le lendemain matin, les allonges ont été mises à ressuyer dans des étuves à 28 °C, à l'abri de la lumière.

Tous les huit jours, les allonges ont été réhumectées en versant de l'eau déminéralisée à la partie supérieure du modèle, jusqu'à un poids correspondant à l'humidité au point de ressuyage, plus 10 ml.

DURÉES D'INCUBATION

L'incubation de deux modèles par traitement a été interrompue au bout de 1, 15, 30, 90 et 180 jours. Les carottes de sol, expulsées des allonges, ont été séchées rapidement dans une étuve ventilée à 60 °C. Les terres des horizons A et B du modèle ont été séparées, passées au travers d'un tamis de 2 mm, et analysées séparément.

Méthodes analytiques

C et N : la détermination des teneurs en carbone et azote total des horizons du modèle a été réalisée sur un sous-échantillon broyé finement (inf. à 150 μm). Le carbone total, après combustion dans un four

tubulaire à 1250 °C, parcouru par un courant d'oxygène et transformation en oxyde de carbone, a été dosé par coulométrie à impulsions. L'azote total après minéralisation Kjeldhal et distillation de l'ammoniac a été dosé par titration volumétrique.

Fractionnement granulométrique : la méthode utilisée est intermédiaire entre la technique FELLER 1979 et BRUCKERT *et al.*, 1980. Les fractions granulométriques ont été obtenues par agitation du sol dans l'eau avec des billes de verre, pendant une heure, sans traitement par les ultrasons, et tamisages successifs à 200 μm (refus appelé fraction SG) et à 50 μm (fraction SF) en s'aidant d'un jet tangentiel de pissette.

La fraction inférieure à 50 μm (AL) est séparée des eaux de lavage (W) par centrifugation et ultrafiltration du surnageant sur microfiltre (0,2 μm). Après séchage, les fractions SG, SF et AL sont pesées ; les teneurs en carbone organique sont déterminées à l'analyseur élémentaire CHN 600 Leco Corp. sur une partie aliquote finement broyée (inf. à 150 μm). La fraction (W) est concentrée par évaporation à l'étuve ventilée à 60 °C. La teneur en carbone est mesurée à l'analyseur CHN sur une aliquote absorbée sur terre d'infusoire et séchée à masse constante à l'étuve à 60 °C.

La teneur en polysaccharides hydrosolubles est déterminée sur une aliquote de cette fraction (W), après hydrolyse par H₂SO₄, 12N à 100 °C, pendant 3 heures. L'hydrolysate est neutralisé par de l'hydroxyde de sodium et il a été procédé à la titration des sucres réducteurs à l'autoanalyseur par dialyse et réduction du ferricyanure de potassium en milieu alcalin (Technicon autoanalyser methodology, 1964).

La mesure de la capacité d'échange cationique à pH : 7 a été réalisée par une méthode originale conçue pour mesurer à la fois la CEC des matières végétales et du sol, ainsi que des mélanges de ces deux constituants et des complexes organo-minéraux formés au cours de l'incubation. Nous avons donc évité d'utiliser l'acétate d'ammonium neutre qui forme avec certaines matières organiques des complexes ammoniaqués solubles dans l'alcool qui sert au lavage. Nous avons aussi évité les micro-méthodes en tubes de centrifugeuse, qui nécessitent un broyage préalable pour obtenir des micro-échantillons représentatifs, ce qui modifie les surfaces actives des agrégats, des débris végétaux et des complexes organo-minéraux. Nous avons enfin utilisé l'ion calcium pour saturer le complexe d'échange afin d'éviter autant que possible les

pertes de matières organiques hydrosolubles, et la dispersion des argiles au cours du rinçage.

La saturation de 10 grammes de l'échantillon (inférieurs à 2 mm) est réalisée par contacts répétés dans un bécher avec une solution de CaCl_2 , *M/2* tamponné à pH : 7 par la triéthanolamine. Le sol est agité périodiquement à l'aide d'une baguette. Après décantation, le surnageant est filtré. L'opération est renouvelée autant de fois que nécessaire pour que le volume total de solution de saturation soit égal à 500 ml.

Le rinçage de l'échantillon de sol est réalisé de la même manière avec 500 ml de CaCl_2 , *M/100*. Le sol est transvasé sur le filtre à la faveur des deux derniers rinçages.

Le sol et le filtre, égouttés pendant une nuit, sont à nouveau placés dans le bécher. Après avoir dilacéré le papier filtre, le sol est agité avec une baguette dans une solution KNO_3 *M*. Après décantation, le surnageant est filtré. L'opération est répétée comme précédemment jusqu'à récupération de 1 000 ml de solution de nitrate.

Le dosage des ions Ca^{++} est réalisé à l'autoanalyseur (Technicon II) par la crésolphtaléine com-

plexon à pH : 10,5 ou au spectromètre d'absorption atomique après dilution avec de l'eau. Les ions chlorure Cl^- restants sont également dosés à l'autoanalyseur (Technicon II) par le thiocyanate mercurique en présence d'alun de fer (PELLOUX *et al.*, 1971⁽¹⁾). La capacité d'échange est égale à la quantité d'ions Ca^{++} recueillis dans la solution de nitrate de potassium, après avoir retranché la faible quantité d'ions Ce^- correspondant aux ions de potassium Ca^{++} sous forme de CaCl_2 , *M/100* restant dans la phase interstitielle après rinçage et ressuyage du sol. Les résultats sont exprimés en cmol (+) kg^{-1} de sol.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Évolution de la teneur en carbone dans l'horizon A des modèles

Le dosage du carbone organique dans l'horizon A des modèles après différentes périodes d'incubation nous permet de faire un bilan global de l'évolution des matières organiques provenant du sol et de la paille de luzerne ajoutée à différentes doses dans cet horizon (fig.1).

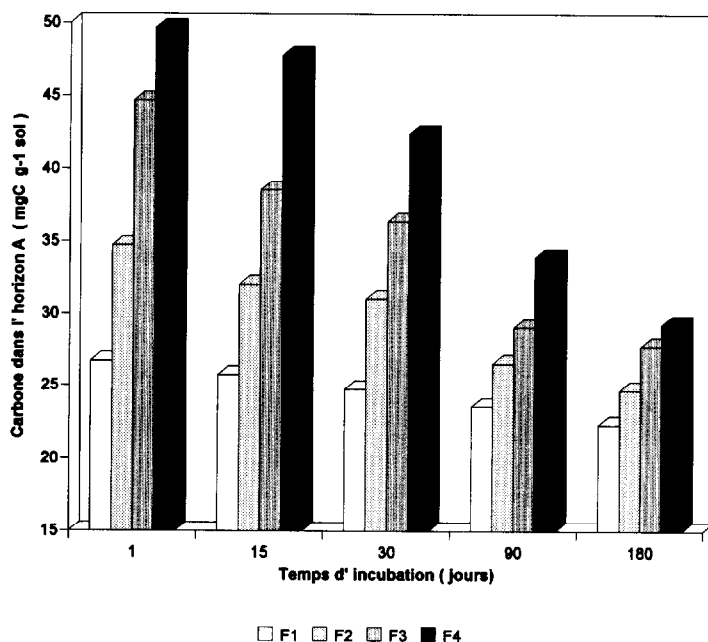


FIG. 1 – Teneurs en carbone de l'horizon A des modèles au cours de l'expérience.
Carbon contents of the A horizon of the laboratory models for different incubation times.

(1) Les manifolds Ca^{++} et Cl^- pour la mesure de la CEC dans les sols ont été adaptés pour l'autoanalyseur Technicon II par J.-C. BRION en 1972.

TABLEAU II
Régressions linéaires, pour chaque durée d'incubation de la teneur en carbone restant en fonction du carbone de la paille de luzerne ajoutée initialement dans l'horizon A
Linear regressions between the remaining carbon contents (mgC/g of soil) after various incubation periods, and the C contents of alfalfa straw incorporated into the A horizon

C (restant) = a + b x C _{pl} (ajouté)					
Durées d'incubation (jours)	C moyen restant sans apport de la paille (C _{F1})	a	b	Coefficient de détermination (R ²)	Indice d'incitation (PR _C)
Modèle A+B					
0	C ₀ (26,90)		(1)	(théorique)	
1	26,70	26,893	0,8480	0,989	
15	25,77	24,986	0,7765	0,981	1,69
30	24,73	24,744	0,6253	0,981	0,99
90	23,58	23,190	0,3571	0,958	1,11
180	22,34	22,366	0,2561	0,955	1,04
Modèle A sans B					
180	22,28	22,39	0,2678	0,982	0,98

N.B. - Le paramètre a varie en fonction du temps t d'incubation
 $a = 25,12 \times \text{Exp}(-0,000688 \times t)$ $R^2 = 0,947$
 La pente b des droites de régression varie en fonction du temps t d'incubation :
 $b = 0,801 \times \text{Exp}(-0,00687 \times t)$ $R^2 = 0,948$
 PR_C : Indice d'incitation (priming ratio) = $(C_0 - a) / (C_0 - C_{F1})$

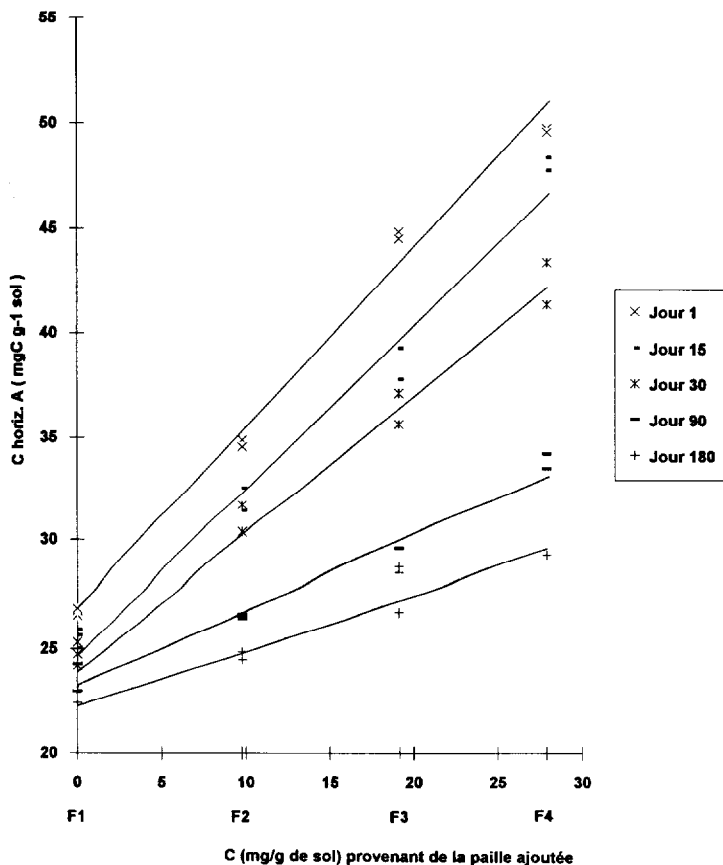


FIG. 2 – Relations linéaires pour chaque durée d'incubation entre la teneur en carbone de l'horizon A et les doses de carbone de la paille de luzerne ajoutée.
Linear relationships between the C contents of the A horizon after various incubation periods, and the C contents of the incorporated alfalfa straw.

INFLUENCE DES DOSES DE PAILLE AJOUTÉES

Pour chaque durée d'incubation, les teneurs en carbone restant dans l'horizon A, sont proportionnelles aux doses de carbone provenant de la paille de luzerne ajoutée (tabl. II et fig. 2) :

$$(1) (C \text{ restant}) = a + b \times (C_{PL} \text{ ajouté})$$

Ce résultat confirme la proportionnalité observée par JENKINSON (1971 et 1977) entre le carbone minéralisé et le carbone végétal enfoui.

Les valeurs du coefficient "a" des équations (1) correspondent à la teneur en carbone restant dans l'horizon A du modèle au temps t, pour un apport de paille nul. Elles sont très proches des teneurs moyennes en carbone restant aux temps t dans les modèles témoins F₁ sans apport de paille. L'interaction, ou effet de la paille sur la décomposition du carbone du sol, peut être estimée par la différence entre la teneur en carbone mesurée dans les modèles F₁ (sans apport de paille) et la valeur calculée "a" pour C_{PL} ajouté = 0 au même instant : I_C = C_{F1} - a. On constate que I_C décroît au cours du premier mois, et devient nul ou très faible ensuite.

En suivant le raisonnement de (PAL et BROADBENT, 1975), on peut, pour chaque durée d'incubation, évaluer l'indice d'incitation "PR_C" ou *priming ratio*. Cet indice est égal au quotient du carbone provenant du sol, perdu lorsque l'on ajoute de la paille, par le carbone provenant du sol perdu sans apport de paille (modèle F₁). Si C₀ est la teneur en carbone du sol qui a été placé dans l'horizon A du modèle, PR_C = (C₀ - a) / (C₀ - C_{F1}).

On constate que ce rapport est de l'ordre de 1,7 au quinzième jour, puis il devient ensuite égal ou à peine supérieur à 1. L'apport de paille de luzerne entraînerait donc dans les premiers jours une accélération de la décomposition du carbone organique provenant du sol de l'horizon A des modèles. À partir du trentième jour, les matières organiques du sol se décomposeraient à peu près à la même vitesse avec ou sans apport de paille de luzerne, et quelles que soient les doses ajoutées.

Le paramètre "a" peut être ajusté à une fonction exponentielle décroissante du temps t d'incubation exprimé en jours, sauf pour t = 1 :

$$a = A \times e^{-K_{cs} \times t} = 25,12 \times e^{-0,0006876 \times t}$$

R² = 0,947. K_{cs} = 0,0006876 j⁻¹ est la constante de décomposition ou disparition journalière (minéralisation, volatilisation et/ou lessivage) du carbone provenant du sol de l'horizon A du modèle. L'ordonnée A = 25,12 de "a" pour t = 0 est nettement inférieure à C₀, teneur initiale en carbone du

sol placé dans l'horizon A du modèle. Si nous appelons I_{C0} la différence entre ces deux termes : I_{C0} = C₀ - A = 26,90 - 25,12 = 1,78, "a" peut être évalué par l'expression suivante :

$$a = (C_0 - I_{C0}) \times e^{-K_{cs} \times t}$$

Le paramètre "I_{C0}", ou interaction initiale relative à la décomposition du carbone du sol, correspond d'une part au stock de matières organiques hydrosolubles lixiviées au cours du ressuyage, mais aussi au "flush" de minéralisation du carbone du sol qui intervient rapidement après humectation des modèles. Ce "flush" paraît être amplifié par l'enfouissement de paille de luzerne dans cet horizon, mais il est indépendant des doses de paille ajoutées, tout au moins pour la gamme de doses qui ont été comparées expérimentalement.

Par la suite, tout se passe donc comme si, après cette décroissance initiale, la diminution de la teneur en carbone de l'horizon A des modèles est égale à la somme de la diminution de la teneur en carbone provenant du sol (C₀ - I_C) et de celle provenant de la paille de luzerne ajoutée.

En effet, les pentes "b" des droites de régression (1) décroissent aussi avec le temps (tabl. II). Elles s'ajustent assez bien à une fonction exponentielle de la durée d'incubation (t en jours) :

$$b = \alpha \times e^{-K_{cp} \times t} = 0,801 \times e^{-0,00687 \times t} \quad R^2 = 0,948$$

Dans cette régression non linéaire, le terme "α" = 0,801 ou valeur de "b" pour t = 0 correspond à la fraction du carbone provenant de la paille de luzerne ajoutée qui reste dans l'horizon A des modèles à l'instant t. Par conséquent 80 % du carbone de la paille se décompose suivant une cinétique du premier ordre. K_{cp} = 0,00687 j⁻¹ est la constante de décomposition ou disparition journalière du carbone de l'horizon A qui provient de la paille de luzerne ajoutée.

Au total, l'évaluation des coefficients "a" et "b" de l'équation (1) en fonction de "I_{C0}", "α" et du temps t, permet d'obtenir une formule globale de la forme suivante :

$$(2) C_t = (C_0 - I_{C0}) \times e^{-K_{cs} \times t} + \alpha \times C_{PL} \times e^{-K_{cp} \times t}$$

Dans cette expression, le carbone restant dans l'horizon A des modèles à l'instant t (C_t) est égal à la somme du carbone restant qui provient du sol (déduction faite de I_{C0}) et du carbone restant qui provient de la paille de luzerne ajoutée.

En résumé, l'effet de la paille enfouie sur la décomposition du carbone du sol correspondrait à une accélération du processus de décomposition du carbone du sol par disparition d'un facteur limitant

qui entrave la décomposition des matières organiques du sol. Le stock I_{C_0} correspond au carbone organique perdu au cours du ressuyage, ou qui se décompose rapidement suite de l'humectation des modèles ("flush"), et à l'effet d'incitation dû à l'apport de paille de luzerne. On constate qu'à chaque instant t , la teneur en carbone de l'horizon A des modèles peut être décrite comme la somme de deux fonctions exponentielles décroissantes en fonction du temps d'incubation, qui correspondent aux teneurs en carbone restant provenant du sol (C_{RS}) et à celles provenant de la paille de luzerne ajoutée (C_{RP}).

Le temps de demi-vie ou demi-temps moyen de résidence ($T_{1/2} = L_N / 2Kc$) du carbone du sol placé dans l'horizon A des modèles ($T_{1/2} = 1\ 008$ j) est dix fois plus élevé que celui de la paille de luzerne enfouie dans cet horizon ($T_{1/2} = 101$ j).

Évolution du carbone dans les fractions granulométriques

L'évaluation du carbone dans les différentes fractions granulométriques séparées par tamisage humide a pour but d'identifier les compartiments de l'horizon A des modèles, qui sont influencés par l'incorporation de différentes doses de pailles de luzerne calibrée (0,2 à 2 mm) et par la durée d'incubation.

INFLUENCE DES DOSES DE PAILLE AJOUTÉES SUR LE CARBONE CONTENU DANS LES FRACTIONS GRANULOMÉTRIQUES

Si l'on compare les quantités de carbone (mg C/g de sol) contenues dans les fractions granulométriques pour chacune des durées d'incubation (fig. 3), on constate que l'influence des doses de paille ajoutées est surtout marquée (tabl. III) pour la fraction SG composée de particules de taille des sables grossiers, c'est-à-dire comprise entre 0,2 mm et 2 mm. Au cours des premiers jours, les quantités de carbone contenues dans cette fraction C_{SG} sont approximativement proportionnelles aux doses de carbone ajoutées dans l'horizon A du modèle.

$$(3) \quad (C_{SG} \text{ restant}) = C_{SG_0} + \alpha \times (C_{PL} \text{ ajouté})$$

La pente " α " de la droite de régression au premier jour est nettement plus faible pour C_{SG} que pour le carbone total restant dans l'horizon A des modèles. Ceci indique que la fragmentation des débris de paille précède leur décomposition et la volatilisation ou le lessivage des produits de décomposition.

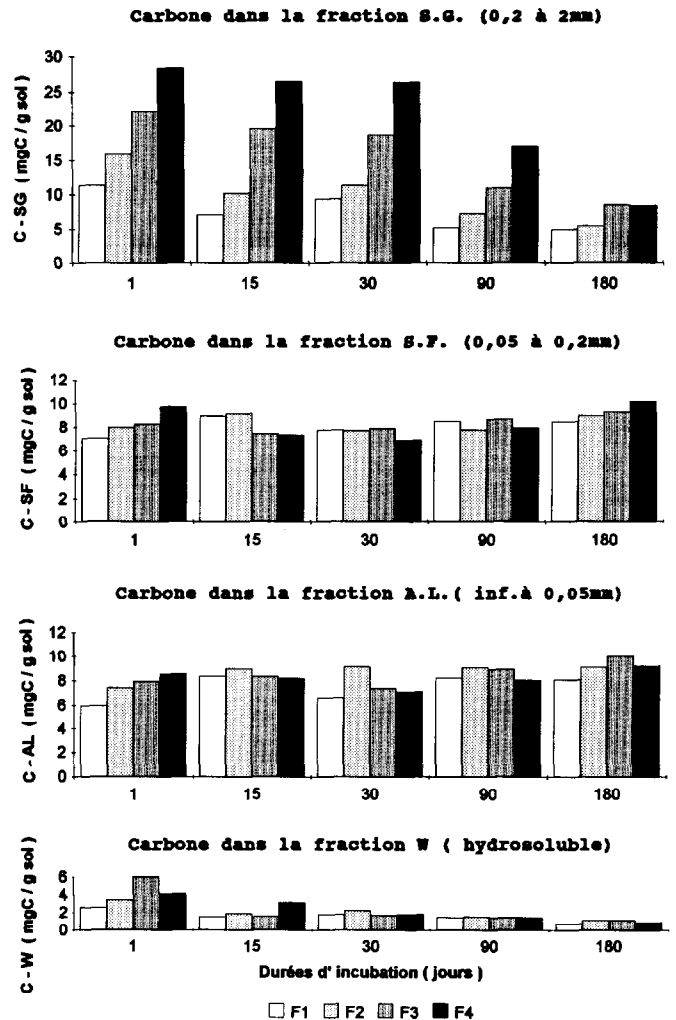


FIG. 3 – Carbone dans les fractions granulométriques de l'horizon A des modèles (mg C/g de sol). Amounts of C found in particle-size fractions separated from the A horizon of the laboratory models (mg C/g of soil).

Les teneurs C_{SG} restant à l'instant t augmentent plus faiblement le témoin F_1 et la dose la plus faible de F_2 , qu'entre F_2 et F_3 , ou F_3 et F_4 (fig. 4).

Les valeurs calculées " C_{SG_0} " qui correspondent à l'estimation de la teneur en carbone restant dans la fraction SG à l'instant t pour un apport de paille nul sont donc nettement inférieures aux teneurs C_{SG} mesurées pour les modèles F_1 , sans apport de paille (tabl. III). Ceci paraît indiquer que la fraction C_{SG} provenant du sol se décompose un peu plus vite dans les modèles enrichis en paille de luzerne. Il existe donc une interaction $I_{C_{SG}} = C_{SGf1} - C_{SG_0}$, qui

ne paraît pas proportionnelle aux doses de paille ajoutées et qui est plus importante que celle observée pour le carbone total de l'ensemble du sol. L'apport de paille de luzerne accélère particulièrement la décomposition des débris végétaux grossiers provenant du sol, qui constituent l'essentiel du

compartiment C_{SG} de l'horizon A_1 du mull forestier. Cette interaction est aussi relativement importante par rapport au volume de ce compartiment C_{SG} du sol. Elle décroît au cours de l'incubation, spécialement pendant le premier mois, mais reste significative pendant les trois premiers mois.

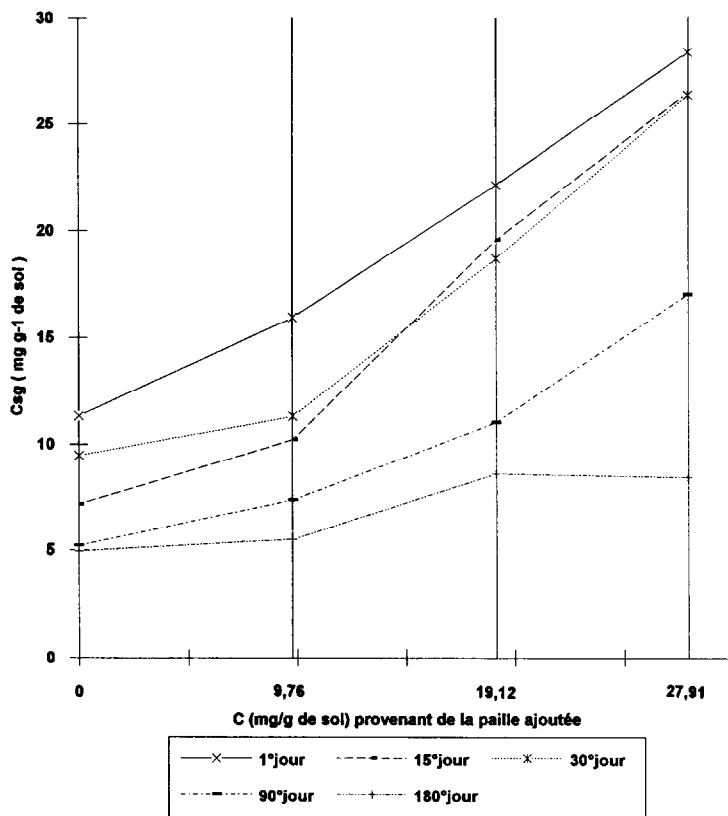


FIG. 4 – Effets de l'apport de paille de luzerne sur la quantité de carbone (mg C/g sol) restant dans la fraction granulométrique SG (0,2 à 2 mm) de l'horizon A, pour chaque durée d'incubation.
Effects of alfalfa straw carbon incorporated in the A horizon on remaining C amounts (mg C/g of soil) in SG particle-size fractions (0.2 - 2 mm) after various incubation periods.

TABLEAU III

Régressions linéaires pour chaque durée d'incubation des quantités de carbone (mg C/g de sol) contenues dans la fraction SG (0,2 à 2 mm) en fonction du carbone de la paille de luzerne ajoutée initialement dans l'horizon A
Linear regressions between the remaining Carbon amounts (mg C/g of soil) in the SG particle-size fractions (0.2 - 2 mm) after various incubation periods, and the Carbon contents of alfalfa straw incorporated into the A horizon

(horizon A)	$C_{sg} \text{ restant} = C_{sg0} + \alpha \times C_{pi} \text{ ajouté}$			
Temps (jours) d'incubation	C_{sg} pour F_1 mesures sans apport de paille	C_{sg0} estimations pour $C_{pi}=0$	alpha paramètre de transformation de C_{pi} ajouté	R ² coefficient de détermination
(0)	(7,77)		(1)	(théorique)
1	11,34	10,71	0,617	0,991
15	7,17	5,63	0,722	0,962
30	9,47	7,64	0,622	0,934
90	5,21	4,22	0,419	0,943
180	4,95	4,80	0,146	0,841

Les variations, en fonction des doses de paille ajoutées, des teneurs en carbone restant dans la fraction SF (50 à 200 μm) de l'horizon A des modèles sont par contre très faibles, sauf au début et en fin d'expérience.

L'accroissement des teneurs en carbone de la fraction fine A+L (inférieure à 50 μm) en fonction des doses de paille apportées est net au premier jour. Par la suite, l'augmentation de C_{AL} est sensiblement du même ordre de grandeur pour F_1 et F_2 , mais on observe une certaine dispersion de C_{AL} pour F_3 et F_4 .

Comme on pouvait le prévoir, les teneurs en carbone de la fraction W (hydrosoluble) n'augmentent en fonction des doses de paille ajoutées que pendant les premiers jours. À partir du trentième jour, les composés hydrosolubles provenant de la décomposition de la paille sont lixiviés, et les valeurs de C_W restant deviennent très analogues quelles que soient les doses de paille ajoutées. Elles décroissent sensiblement en fonction du temps d'incubation.

Le dosage des sucres réducteurs, après hydrolyse acide de la fraction W, indique qu'environ un cinquième du carbone contenu dans cette fraction hydrosoluble est constitué par des polysaccharides (BOISSEZON *et al.*, 1992). Ces chiffres sont du même ordre de grandeur que ceux obtenus par JENKINSON (1968) sur d'autres types de sols. Toutefois l'influence des doses de paille ajoutées sur la teneur en polysaccharides de la fraction W est très marquée le premier jour, mais disparaît ensuite.

ÉVOLUTION DU RAPPORT C/N DES MATIÈRES ORGANIQUES CONTENUES DANS LES FRACTIONS GRANULOMÉTRIQUES (BOISSEZON *ET AL.*, 1992)

L'évolution très analogue du carbone et de l'azote contenu dans les différentes fractions granulométriques paraît en relation avec la faible différence du rapport C/N de la paille de luzerne calibrée ajoutée (C/N = 14,2), et des matières organiques du sol placé dans l'horizon A des modèles (C/N = 9,6).

Le rapport C/N de la fraction macroagrégée SG est compris entre 15 et 18. Il n'apparaît pas une évolution nette de ce rapport en fonction de la durée d'incubation. Par contre, le rapport C/N de cette fraction devient un peu plus faible pour les doses de paille apportées les plus fortes F_3 et F_4 .

Le rapport C/N de la fraction SF reste compris entre 10 et 12. Celui de la fraction A+L entre 8 et 10. Enfin le rapport C/N de la fraction W hydrosoluble est généralement compris entre 5 et 7.

En résumé, les quantités de carbone et d'azote organique contenues dans les fractions SF et A+L du sol placé dans l'horizon A des modèles sont faiblement influencées par les doses de paille calibrée qui ont été ajoutées, et par la durée d'incubation. Ceci confirme les résultats obtenus par TIESSEN et STEWART (1983).

L'enrichissement en carbone et azote organique de la fraction hydrosoluble W n'est importante qu'en début d'expérience. À partir du quinzième jour, les teneurs en matières organiques de W ne diffèrent pratiquement plus en fonction des doses de paille apportées.

Les quantités de carbone contenues dans la fraction SG de l'horizon A des modèles sont évidemment directement fonction des doses de paille calibrée qui ont été ajoutées. Les fractions " α " du carbone apporté par la paille que nous avons retrouvé dans la fraction SG sont supérieurs à 0,6 pendant le premier mois. Elles décroissent ensuite, et ne sont plus que de 0,15 au bout de six mois d'incubation. Les vitesses de décomposition du carbone contenu dans cette fraction macroagrégée sont donc nettement plus élevées que pour l'ensemble des matières organiques de l'horizon A des modèles. On en déduit que la fragmentation des débris végétaux précède leur décomposition.

Capacité d'échange cationique de l'horizon A des modèles

Comme on pouvait le supposer, la CEC mesurée à pH : 7 de l'horizon A des modèles augmente en fonction des doses de paille de luzerne ajoutées (fig. 5). Toutefois, dès les premiers jours la CEC de l'horizon A des modèles est inférieure à la somme des capacités d'échange d'une part de la paille (57 $\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$, soit 142 $\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$ de carbone), et d'autre part du sol placé dans l'horizon A des modèles (19,84 $\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$).

Par ailleurs, la CEC de l'horizon A diminue avec le temps d'incubation, même pour les modèles témoins F_1 non enrichis en paille. Le dispositif expérimental permet d'analyser l'influence de ces deux facteurs – doses de paille ajoutées et temps d'incubation – sur l'évolution simultanée de la CEC et des teneurs en carbone résiduel dans cet horizon des modèles.

Capacité d'échange cationique provenant de l'enfouissement de paille de luzerne dans le sol

TABLEAU IV

Régressions linéaires, pour chaque durée d'incubation, ou pour chacune des doses de paille ajoutée (F₁, F₂, F₃, et F₄), de la capacité d'échange cationique (cmol (+) kg⁻¹ sol) en fonction de la teneur en carbone de l'horizon A des modèles
Linear regressions between the cation exchange capacity (cmol (+) kg⁻¹ of soil) after various incubation periods or amounts of straw incorporated (F₁, F₂, F₃ and F₄), and the remaining Carbon content (mgC g⁻¹ of soil) of the A horizons

CEC = c + d x C					
Régression linéaire pour l'ensemble des données					
	c	d x1000	Coefficient de détermination		
	16,52	124,5	R ²	Signification	
			0,848	***	
Régressions linéaires pour chaque dose de paille ajoutée					
Doses de paille ajoutées (en % de mat. sèches)	c	d x1000	Coefficient de détermination		
			R ²	Signification	
F ₁ (0%)	11,13	345,6	0,566	*	
F ₂ (2,5%)	15,19	165,9	0,723	**	
F ₃ (5%)	16,97	109,5	0,885	***	
F ₄ (7,5%)	17,14	111,3	0,937	***	
Régressions linéaires au cours de l'incubation					
Durées d'incubation	c	d x1000	Coefficient de détermination		
			R ²	Signification	
1 jours	17,99	89,3	0,928	***	
15 jours	17,15	110,8	0,892	***	
30 jours	16,61	122,2	0,850	***	
90 jours	15,26	162,8	0,755	**	
180 jours	13,92	221,1	0,594	*	

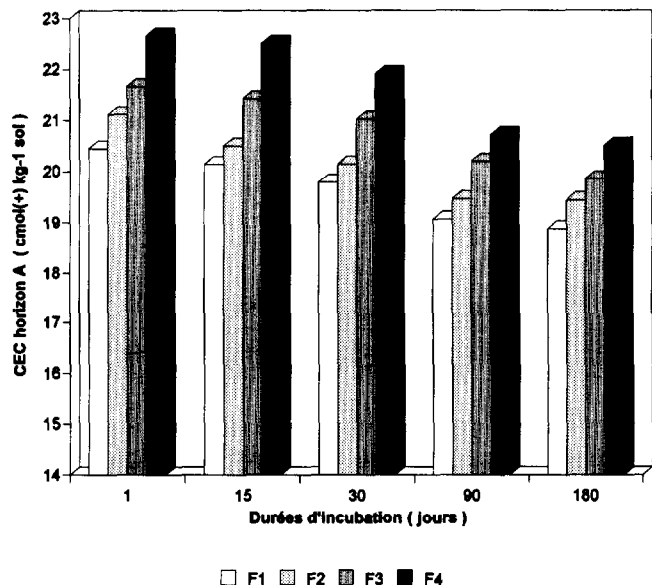
* : significatif (p<0,05), ** : hautement significatif (p<0,01),
 *** : très hautement significatif (p<0,001)

CEC : Capacité d'échange cationique de l'horizon A des modèles, exprimée en cmol(+) kg⁻¹.

C : teneur en carbone de l'horizon A, exprimée en pour mille ou g de carbone par kg de sol (g kg⁻¹).

d : CEC des matières organiques restantes, exprimé en cmol(+) g⁻¹ de carbone ;
 donc d x1000 est exprimé en cmol(+) kg⁻¹ de carbone.

FIG. 5 – Capacité d'échange cationique de l'horizon A des modèles (cmol (+) kg⁻¹ sol).
Cation exchange capacity in the A horizon of the laboratory models, after various incubation periods (cmol (+) kg⁻¹ of soil).



RELATION ENTRE LA CEC ET LA TENEUR EN CARBONE TOTAL

On constate que pour l'ensemble des données, ces deux paramètres sont significativement corrélés (tabl. IV). L'équation de régression linéaire :

$$(4) \quad CEC = c + d \times C$$

indique que la CEC liée aux matières organiques est égale en moyenne à : " $d \times 10^3$ " = 125 cmol(+) kg⁻¹ de carbone, et celle des matières minérales : " c " = 16,5 cmol(+) kg⁻¹ de sol. Cependant le coefficient de détermination, quoique très hautement significatif, indique que seulement 85 % des variations de la CEC sont liées linéairement aux variations des teneurs en carbone (BOISSEZON 1988).

Pour chaque durée d'incubation, il existe une corrélation significative entre les capacités

d'échange et les teneurs en carbone restant dans l'horizon A des différents modèles. La capacité d'échange "d" des matières organiques restantes s'accroît considérablement avec le temps d'incubation, mais le coefficient de détermination devient médiocre à partir du troisième mois.

Les régressions linéaires, pour chaque dose de paille ajoutée (fig. 6), sont très hautement significatives pour les doses les plus fortes (F₃ et F₄), à peine significatives dans les témoins (F₁) et pour l'apport de paille le plus faible (F₂). La capacité d'échange moyenne "d", qui est liée aux teneurs en carbone total restant dans l'horizon A, décroît fortement lorsque les doses de paille ajoutées s'accroissent.

Au total, la capacité d'échange des matières organiques provenant de la paille serait plus faible que

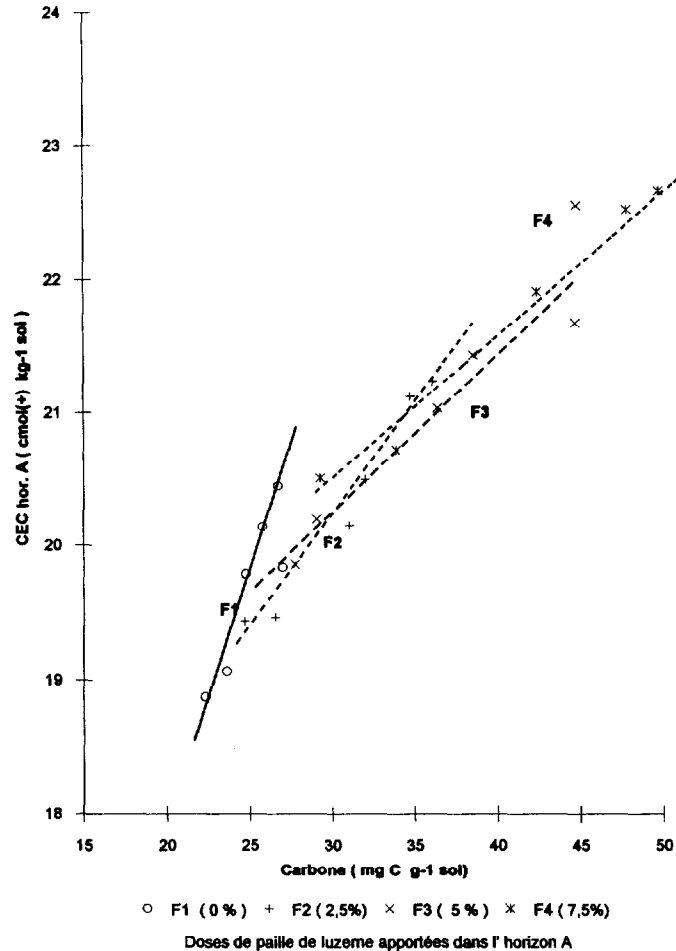


Fig. 6 – Relation entre la capacité d'échange cationique et la teneur en carbone de l'horizon A pour chacune des doses de paille ajoutée (F₁, F₂, F₃ et F₄).
Relation between the cation exchange capacity and C content in the A horizon of models treated with different amounts of straw ((F₁, F₂, F₃ and F₄).

celle des matières organiques provenant du sol placé dans l'horizon A des modèles F₁. Néanmoins, la CEC des matières organiques qui proviennent de la paille paraît augmenter avec le temps d'incubation. Il reste à confirmer ces résultats.

EFFET APPARENT DE L'APPORT DE PAILLE SUR LA CEC DE L'HORIZON A

Pour chaque durée d'incubation, nous pouvons calculer l'effet apparent de l'apport de différentes doses de paille sur la capacité d'échange T de l'horizon A, en retranchant la capacité d'échange T₁ des modèles témoins F₁, sans apport de paille, pour la même durée d'incubation. On constate qu'après une baisse très rapide par rapport à la capacité d'échange initiale de la paille, les valeurs de la CEC dues à l'enfouissement de paille restent à peu près constantes.

En rapportant, pour chaque durée d'incubation, cette CEC due à l'apport de paille, par l'accroissement des teneurs en carbone par rapport à celles des témoins, on constate que la capacité d'échange

apparente de la paille ajoutée (T_X-T₁) / (C_X-C₁) s'accroît nettement au cours de la période d'incubation, en moyenne de 84 à 219 cmol(+) kg⁻¹ de carbone.

Ces estimations de la capacité d'échange des matières organiques provenant de la paille de luzerne ajoutée ont été réalisées en supposant l'additivité des CEC des matières organiques et minérales du sol, et celle des matières organiques qui proviennent de la décomposition de la paille. Elles supposent également l'absence d'effet des apports de paille sur la cinétique de décomposition des matières organiques préexistantes dans le sol placé dans l'horizon A des modèles. Nous avons vu que cette deuxième hypothèse n'est pas toujours vérifiée. En particulier, il existe un effet d'incitation qui est relativement important au cours du premier mois d'incubation.

Pour pallier cette difficulté, nous avons donc recherché s'il existe, pour chaque durée d'incubation, une relation directe entre la CEC de l'horizon A et le carbone qui provient de la paille enfouie.

TABLEAU V

Régressions linéaires, pour chaque durée d'incubation de la capacité d'échange cationique (cmol(+) kg⁻¹ sol) en fonction du carbone restant dans l'horizon A qui provient de la paille de luzerne ajoutée (C_{rp})
 Linear regressions between the cation exchange capacity (cmol(+) kg⁻¹ of soil) after various incubation periods, and the remaining carbon contents derived from alfalfa straw incorporated into the A horizon

CEC = f + g x C _{rp}					
Durée :	CEC F ₁	f	ln.	g x1000	R ²
1 ^{er} jour	20,45	20,22	0,23	100	0,968
15 ^e "	20,14	19,38	0,76	143	0,996
30 ^e "	19,79	19,20	0,59	155	0,999
90 ^e "	19,07	18,82	0,25	193	0,994
180 ^e "	18,88	18,82	0,06	229	0,980

f est la CEC calculée sans apport de paille ; CEC F₁ est la valeur mesurée pour un apport de paille nul : ces valeurs sont exprimées en cmol(+) kg⁻¹ de sol.
 ln. : Interaction = CEC F₁ - f exprimé en cmol(+) kg⁻¹ de sol.
 g : CEC des matières organiques restantes qui proviennent de la paille en cmol(+) g⁻¹ de carbone, donc f x1000 est exprimé en cmol(+) kg⁻¹ de carbone.
 C_{rp} : Carbone restant provenant de la paille, calculé pour chaque durée d'incubation à partir de la régression linéaire en fonction des doses de carbone de la paille ajoutée, exprimées en g de carbone kg⁻¹ de sol.

Modèle A + B					
Cinétique d'évolution de la CEC _{pp} dans l'horizon A des matières organiques provenant de la paille (cmol(+) kg ⁻¹ de sol)					
CEC _{pp} = CEC ₀ x exp(-k x t) (15 < t < 180 jours)					
FUMURES	CEC _p de la paille	CEC ₀ (t=0)	k	T 1/2	Coef. R ² de détermination
F ₂	1,40	0,82	0,00240	289	0,85
F ₃	2,71	1,56	0,00223	311	0,88
F ₄	3,98	2,33	0,00238	292	0,85

CEC_{pp} : Capacité d'échange des matières organiques provenant de la paille ajoutée
 CEC₀ : Valeur de CEC_{pp} pour t=0
 CEC_p : Capacité d'échange de la paille ajoutée
 T 1/2 : Temps de demi-vie ou demi-temps moyen de résidence

RELATION ENTRE LA CEC ET LE CARBONE RESTANT QUI PROVIENT DE LA PAILLE

Nous avons vu dans la première partie de cet exposé que, pour chaque durée d'incubation, la teneur en carbone restant dans l'horizon A des modèles était strictement proportionnelle aux quantités de carbone apportées par la paille. Les équations de régression linéaire (1 et 2) nous ont permis d'estimer le carbone restant qui provient du sol (C_{rs}) et de la paille de luzerne ajoutée (C_{rp}).

Pour chaque durée d'incubation, on constate (tabl. V) que la CEC de l'horizon A des modèles est étroitement corrélée à C_{rp} teneur en carbone restant, qui provient de la paille :

$$(5) \quad CEC = f + g \times C_{rp}$$

Ces régressions linéaires de la CEC en fonction de C_{rp} confirment que les matières organiques qui proviennent de la décomposition de la paille ont une capacité d'échange moyenne " $gx10^3$ " qui s'accroît de 100 à 230 $cmol(+)$ kg^{-1} de carbone, au cours des six mois d'incubation.

Les valeurs de " f " calculées sont légèrement inférieures aux valeurs moyennes de la CEC mesurées dans les modèles F_1 , en particulier pour le quinzième et le trentième jour. Ensuite les interactions (I_n) ou différences entre ces valeurs mesurées et calculées de la CEC de l'horizon A sans apport de paille diminuent et sont pratiquement nulles en fin d'expérience. Les capacités d'échange du sol et des matières organiques provenant de la décomposition de la paille sont donc additives, sauf au cours des premiers mois.

ÉVOLUTION DE LA CEC DES MATIÈRES ORGANIQUES PROVENANT DE LA PAILLE

Pour chaque dose de paille ajoutée, nous avons étudié la cinétique d'évolution, de la CEC provenant de la paille, soit $CEC_{pp} = gx C_{rp}$, en fonction du temps t d'incubation (fig. 7). La décroissance est forte et rapide entre la CEC de la paille ajoutée ($t = 0$) et celle des matières organiques provenant de la paille, mesurée le premier jour. Mais à partir du quinzième jour, la CEC_{pp} décroît progressivement pendant le reste de l'expérience. Si l'on ne tient pas compte des estimations pour $t = 0$ et des mesures relativement faibles faites au premier jour, on constate que pour chaque dose de paille ajoutée, les CEC des matières organiques provenant de la paille s'ajustent approximativement à des cinétiques du premier ordre (tabl. V), avec des constantes de décroissance journalière " k " analogues et des temps de demi-vie ($T_{1/2} = Ln2/K$) voisins de 300 jours :

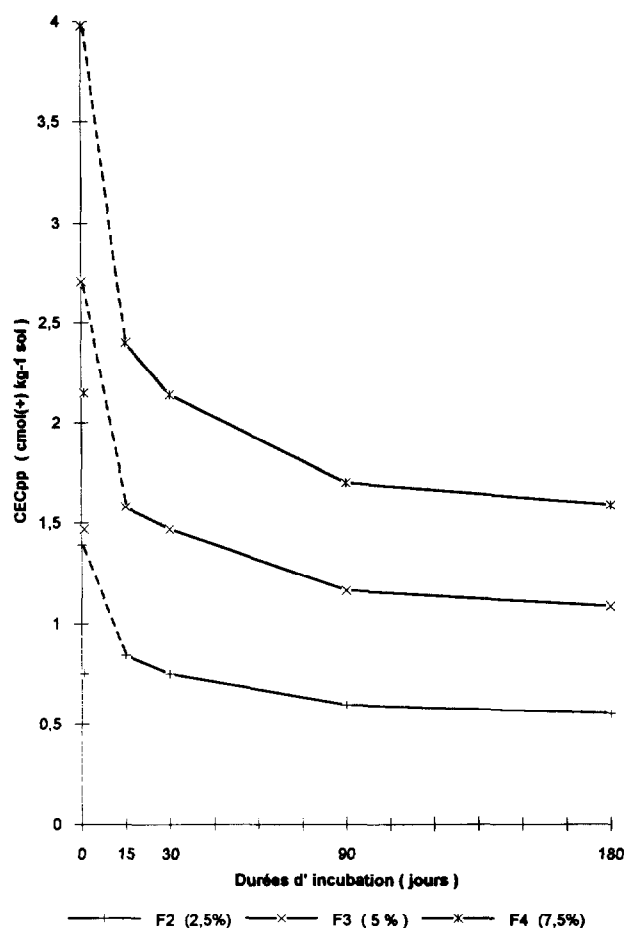


FIG. 7 - Évolution de la capacité d'échange cationique provenant de la paille de luzerne ajoutée dans l'horizon A des modèles (F_2 , F_3 et F_4). Evolution of the cation exchange capacity derived from the alfalfa straw incorporated into the A horizon of the models (F_2 , F_3 and F_4).

$$(6) \quad CEC_{pp} = CEC_0 \times e^{-kt}$$

Néanmoins, les valeurs de CEC_0 et CEC_1 estimées par ces régressions non linéaires diffèrent nettement de celles de la paille ajoutée ($t = 0$), et des valeurs mesurées le premier jour. Les cinétiques exprimées par l'équation (6) rendent seulement compte de l'évolution de la CEC_{pp} des matières organiques provenant de la paille, après un temps de latence de quelques jours.

Capacité d'échange des fractions granulométriques

Dans la première partie de cet exposé, nous avons analysé l'évolution des matières organiques

TABLEAU VI
Capacité d'échange cationique des fractions granulométriques obtenues par tamisage humide et à sec
Cation exchange capacity of particle-size fractions separated by wet or dry sieving

Echantillons	Fractions	Poids des fractions granulo. %	CEC des fractions cmol(+) kg-1	Répartition de la CEC dans les fractions en cmol(+) kg-1 et en % de sol		Teneur en C des fractions mg g-1 fract.	Répartition du carbone dans les fractions en mg g-1 et en % de sol	
FRACTIONNEMENT GRANULOMETRIQUE PAR AGITATION DANS L'EAU ET TAMISAGE HUMIDE								
Sol initial	SG (0,2-2,0mm)	4,34	48,21	2,09	11,4	108,73	4,72	21,5
de l'horizon A	SF (0,05-0,2mm)	30,72	23,40	7,19	39,4	29,42	9,03	41,1
sans paille	A+L (<0,05mm)	64,95	13,78	8,95	49,1	12,70	8,25	37,5
	Som. des fract.	97,4 %		18,33 = 92 % CEC sol			22,00 = 86 % C sol	
Horizon A	SG (0,2-2,0mm)	6,16	42,94	2,65	14,3	146,25	9,01	33,3
180ème jour	SF (0,05-0,2mm)	29,33	22,85	6,70	36,1	32,44	9,51	35,1
avec paille 7,5 %	A+L (<0,05mm)	64,51	14,29	9,22	49,6	13,25	8,55	31,6
	Som. des fract.	97,9 %		18,57 = 99 % CEC h.A			27,07 = 85 % C h.A	
FRACTIONNEMENT GRANULOMETRIQUE PAR TAMISAGE A SEC								
Sol initial	SG (0,2-2,0mm)	64,32	19,86	12,77	68,6	28,9	18,95	71,7
de l'horizon A	SF (0,05-0,2mm)	15,14	21,23	3,21	17,2	30,7	4,70	17,8
sans paille	A+L (<0,05mm)	20,54	12,85	2,64	14,2	14,5	2,77	10,5
	Som. des fract.			18,62 = 94 % CEC sol			26,42 = 104 % C sol	
	Sol total			19,73			25,55	
Horizon A	SG (0,2-2,0mm)	51,29	20,88	10,71	55,4	35,2	19,31	61,0
180ème jour	SF (0,05-0,2mm)	18,52	23,00	4,26	22,1	42,2	7,50	23,7
avec paille 7,5 %	A+L (<0,05mm)	30,19	14,41	4,35	22,5	17,8	4,87	15,4
	Som. des fract.			19,32 = 103 % CEC h.A			31,68 = 100 % C h.A	
	Hor. A total			18,73			31,70	

N.B. : Les poids, C.E.C. et teneurs en carbone des fractions hydrosolubles (W) n'ont pas été mesurés. Les mesures représentent les moyennes des répétitions.

contenues dans les fractions granulométriques obtenues par tamisage humide après agitation du sol dans l'eau avec des billes de verre, sans traitement aux ultra sons. Les fractions granulométriques ainsi obtenues ont été séchées à l'étuve ventilée à 60 °C, puis passées au tamis de 2 mm. Les mesures de la CEC à pH : 7 de ces fractions granulométriques ont été réalisées avec la même méthode que pour les sols.

La comparaison des résultats obtenues (tabl. VI) montre que la CEC des fractions fines A+L (inférieure à 50 µm) est pratiquement identique, quelles que soient les méthodes de fractionnement utilisées (tamisage humide ou à sec). Cette fraction, qui est la moins riche en matière organique, est aussi celle dont la CEC est la plus faible. Ces résultats diffèrent donc de ceux obtenus, avec un prétraitement très énergique par les ultrasons, par BREMNER *et al.* (1990) sur des mollisols de l'Iowa. Par ailleurs, comme l'indique OADES (1990), la répartition des matières organiques dans les fractions granulométriques des alfisols diffèrent souvent nettement de celle des mollisols.

L'apport de paille de luzerne dans l'horizon A des modèles, suivi de six mois d'incubation, modifie faiblement l'importance, la quantité de carbone

et la CEC de cette fraction A+L, obtenue par voie humide. Au total, dans ce sol limoneux, cette fraction A+L, qui représente les 2/3 du sol n'est responsable que de la moitié de la CEC du sol.

La fraction microagrégée SF (50-200 µm) qui constitue 30 % du sol est responsable de 39 % de la CEC. Ceci s'explique par le fait que 41 % des matières organiques du sol sont contenues dans cette fraction. Dans le sol enrichi en paille, la CEC et la masse de cette fraction microagrégée SF ont légèrement diminué par rapport à celles du sol initial ; il en résulte une baisse de la contribution de cette fraction SF à la CEC de l'horizon A, malgré des teneurs en carbone un peu plus élevées.

La fraction SG (0,2-2 mm) est quantitativement peu importante. Bien que sa teneur en carbone et sa CEC soient beaucoup plus élevées que dans les autres fractions, sa contribution à la CEC du sol est donc relativement modeste. Au bout de six mois d'incubation du sol enrichi en paille de luzerne calibrée, la teneur en carbone de cette fraction (mg C/g fraction) est nettement plus forte, alors que la CEC de cette fraction est plus faible. Deux explications, non exclusives entre elles, peuvent expliquer cette évolution contraire de la CEC et de la teneur en carbone de cette fraction macroagrégée :

– une grande partie des débris de paille contenus dans cette fraction SG se sont minéralisés. Les débris organisés restants, difficilement biodégradables ou stabilisés chimiquement (TIESSEN et STEWART, 1983), auraient une faible CEC, ou sont séquestrés à l'intérieur de ces macroagrégats relativement stables et leurs radicaux libres ne participeraient pas aux réactions d'échange ;
 – l'accroissement de cette fraction SG est accompagnée d'une légère diminution de la fraction microagrégée SF. Une partie des microagrégats se retrouveraient donc agglomérés dans des structures plus grossières (SG) (ELLIOTT, 1986) ; mais la capacité d'échange des microagrégats étant deux fois plus faible que celle des macroagrégats, il en résulte une baisse de la CEC de la fraction SG.

Au total, la contribution de cette fraction SG à la CEC de l'horizon A des modèles enrichis en paille augmente néanmoins, en raison de l'augmentation pondérale de cette fraction macroagrégée.

En résumé, la CEC du sol est à peu près égale à la somme des CEC des fractions granulométriques obtenues par tamisage humide. Par conséquent, cette méthode de fractionnement relativement douce n'augmente pas significativement l'accessibilité des charges réparties sur la surface externe des différents agrégats stables à l'eau, qui constituent ce sol.

Toutefois, suite à l'apport de paille calibrée, l'enrichissement en matières organiques des macroagrégats (SG) ne provoque pas une augmentation proportionnelle de la CEC de cette fraction du sol. Les modifications de l'organisation de cette fraction grossière et/ou la nature des matières organiques résiduelles seraient responsables de la non-additivité des CEC de ses constituants.

Les CEC des fractions A+L obtenues par tamisage humide ou par tamisage à sec sont analogues (environ $14 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$), bien que les fractions A+L obtenues par tamisage humide soient au moins deux fois plus riches en carbone organique que celles obtenues par tamisage à sec. On notera également que la CEC de cette fraction A+L est inférieure à l'estimation de la CEC des matières minérales de ce sol limoneux ($16,5 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ de sol), évaluée par l'ordonnée à l'origine des régressions linéaires de la CEC en fonction des teneurs en carbone.

Par conséquent, la CEC de l'horizon A des modèles peut être considérée comme étant égale à la somme des CEC des différentes fractions agrégées,

stables à l'eau. Par contre, dans chacune des fractions granulométriques, l'additivité des CEC des constituants organiques et des constituants minéraux de ces fractions peut être mise en doute. Une interaction négative, probablement due à des empêchements stériques, paraît réduire l'accroissement de la CEC des fractions granulométriques enrichies en constituants organiques.

CONCLUSIONS

La baisse de la capacité d'échange cationique du mélange sol-paille qui intervient dès le premier jour peut s'expliquer par les pertes d'acides orga-

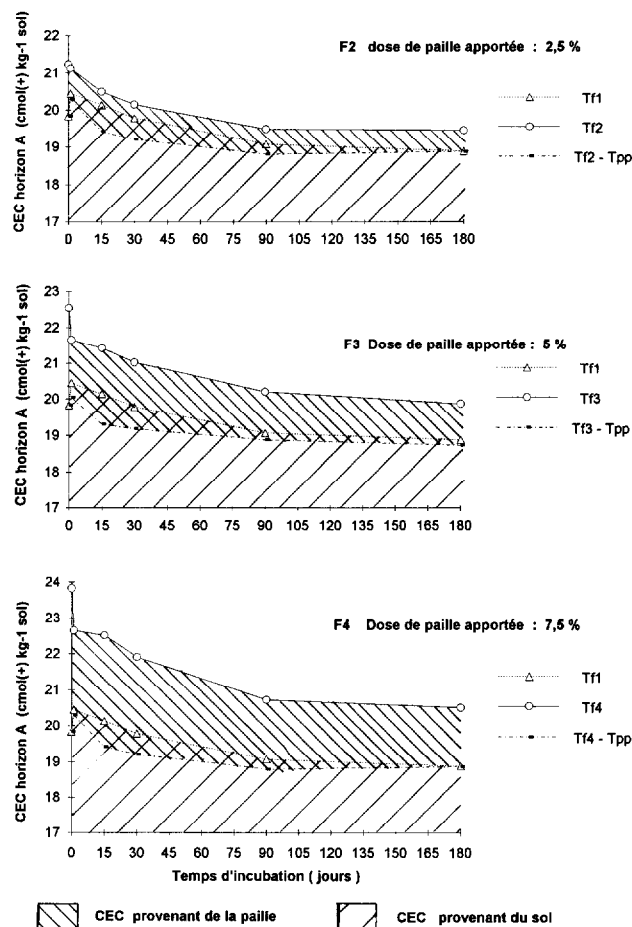


FIG. 8 – Évolution de la capacité d'échange cationique de l'horizon A des modèles, qui provient du sol (T_{f1}) et de la paille de luzerne ajoutée (T_{pp}).
 Evolution of the cation exchange capacity derived from the soil (T_{f1}) and from the alfalfa straw incorporated (T_{pp}), in the A horizon of the laboratory models.

niques provenant de la paille de luzerne, qui sont lixiviées au cours du ressuyage des modèles (BOISSEZON *et al.*, 1992).

Par la suite, le suivi de l'évolution des matières organiques et de la CEC de l'horizon A des différents modèles nous a permis d'estimer la CEC des matières organiques résiduelles ou humifiées qui proviennent de la paille. Elle passe de 100 à 230 cmol(+) kg⁻¹ de carbone, au cours des six mois d'expérience.

L'additivité des CEC provenant de la paille et provenant du sol n'est observée qu'en fin d'expérience (fig. 8) ; par contre au cours des trois premiers mois, il existe une interaction qui est du même ordre de grandeur pour les trois doses de paille apportées.

Il est logique de penser que l'effet d'incitation que nous avons observé, en accélérant la minérali-

sation des matières organiques du sol dans les modèles enrichis en paille, provoque une décroissance de la CEC provenant du sol, plus rapide dans les modèles (F₂), (F₃) et (F₄), que dans les modèles témoins (F₁) sans paille.

La mesure de la CEC des fractions granulométriques montre que l'augmentation de la CEC de l'horizon A des modèles enrichis en paille est principalement due au fort accroissement de la fraction macroagrégée (0,2-2 mm) ; mais l'augmentation de la contribution de cette fraction à la CEC du sol n'est pas proportionnelle à son enrichissement en carbone. Il y a donc additivité des CEC des fractions granulométriques stables à l'eau ; mais on est conduit à mettre en doute l'additivité des CEC des constituants organiques et minéraux de ces fractions granulométriques.

Manuscrit accepté par le Comité de rédaction le 21 janvier 1993.

BIBLIOGRAPHIE

- AFES, 1992. – *Référentiel pédologique. Principaux sols d'Europe*. Inra, Paris, 222 p.
- BOISSEZON (P. de), 1970. – Étude du complexe absorbant des sols ferrallitiques forestiers de Côte d'Ivoire. *Cah. Orstom, sér. Pédol.* vol. VIII, n° 4 : 391-418.
- BOISSEZON (P. de), 1977. – Essai de détermination du rôle des matières organiques dans la capacité d'échange des sols ferrallitiques. *Science du sol-Bulletin de l'AFES*, n°2 : 61-68.
- BOISSEZON (P. de) et BONZON (B.), 1986. – Effets de l'apport de fumier sur les caractéristiques chimiques d'un sol ferrallitique ivoirien. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, XXII, 3 : 329-355.
- BOISSEZON (P. de), 1988. – Effets de l'enfouissement de paille de luzerne sur la capacité d'échange d'un sol brun sur limon des plateaux. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, XXIV, 4 : 337-339
- BOISSEZON (P. de), GAVINELLI (E.), BELLIER (G.), BRION (J.-C.), FARDOUX (J.), 1992. – *Effets de l'enfouissement de paille de luzerne dans le sol. (étude expérimentale en modèle de laboratoire)*. Doc. Orstom, Montpellier, multigr 1992 n°10, 187 p.
- BREMNER (J.M.), GENRICH (D.A.), 1990. – Characterization of sand, silt, and clay fractions of some Mollisols. In : *Soil colloids and their associations in aggregates*. Boodt M.F. de Hayes M.H.B., Herbillon A. eds, New York, Plenum Press : 423-438.
- BRUCKERT (S.) et KILBERTUS (G.), 1980. – Fractionnement et analyse des complexes organo-minéraux des sols bruns et chernozem. *Plant and Soil*, 57 : 271-295.
- DELAS (J.), 1971. – Évolution des propriétés d'un sol sableux sous l'influence d'apports massifs et répétés de matières organiques de différentes origines. *Ann. Agrom.* 22 ou (5) : 585-610.
- DRAKE (E.H.), MOTTO (H.L.), 1982. – An analysis of the effect of clay and organic matter content on the cation exchange capacity of New Jersey Soils. *Soil Sci.* 133(5) : 281-288.
- ELLIOTT (E.T.), 1986. – Aggregate Structure and Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in native and cultivated Soils. *Sci. Soc. Am. J.* 50 : 627-633.
- FARDEAU (J.C.), GUIRAUD (G.), THIERRY (J.), MOREL (C.), BOUCHER (B.), 1988. – Taux net annuel de minéralisation de la matière organique des sols de grande culture de Beauce. Conséquence pour l'Azote. *C.R. Acad. Agri. Fr.* 74 (8) : 61-70.
- FAUCK (R.), MOUREAUX (C.), THOMANN (Ch.), 1969. – Bilan de l'évolution des sols de Séfa (Casamance, Sénégal) après quinze années de culture continue. *Agrom. Trop.* 1969 (3) : 263-301.
- FELLER (C.), 1979. – Une méthode de fractionnement granulométrique de la matière organique des sols. *Cah. Orstom, sér. Pédol.* vol. XVII, n°4 : 339-346.

- GODEFROY (J.), 1974. – *Evolution de la matière organique du sol sous culture de bananier et de l'ananas. Relations avec la structure et la capacité d'échange cationique.* Université de Nancy I. Thèse d'ing. docteur, 79-82 et 126-130.
- HARADA (Y.), INOKO (A.), 1980. – The measurement of cation exchange capacity of composts for estimation of the degree of maturity. *Soil Sci. Plant Nutri.* 26 : 127-134.
- JENKINSON (D.S.), 1968. – Chemical tests of potentially available Nitrogen in soil. *J. Soil Food Agr.* 19 : 160-168.
- JENKINSON (D.S.), 1971. – Studies on the decomposition of C¹⁴ labelled organic matter in soil. *Soil Sc.* 111 : 64-70.
- JENKINSON (D.S.), 1977. – Studies on the decomposition of plant material in soil. IV. The effect of rate of addition. *J. Soil Sci.* 28 : 417-423.
- JENKINSON (D.S.), AYANABA (A.), 1977. – Decomposition of carbon-14 labelled plant material under tropical conditions. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 14 : 912-915.
- LAX (A.), 1991. – Cation exchange capacity, induced in calcareous soils by fertilization with manure. *Soil Sci.* 151 (2) : 174-178.
- N'DAYEGAMIYE (A.), DUBE (A.), 1986. – Effet de l'incorporation de matières ligneuses sur l'évolution des propriétés chimiques du sol et sur la croissance des plantes. *Can. J. Soil Sci.* 66(4) : 623-631.
- N'DAYEGAMIYE (A.), 1990. – Effets à long terme d'apports de fumier solide de bovins sur l'évolution des caractéristiques chimiques du sol et de la production de maïs-ensilage. *Can. J. Plant Sci.* 70 : 767 - 775.
- OADES (J.M.), 1990. – Associations of colloids in soil aggregates. In : *Soil colloids and their associations in aggregates.* Plenum Press New York Nato Asi, serie B : 463 - 483.
- PAL (D.), BROADBENT (F.E.), 1975. – Kinetics of rice straw decomposition in soils. *J. Environ. Qual.* 4(2) : 256-260.
- PELLOUX (P.), DABIN (B.), FILLMANN (G.), GOMEZ (P.), 1971. – Méthodes de détermination des cations échangeables et de la capacité d'échange dans les sols. Orstom, *Init. Doc. Tech.* n°17, 112 p.
- PRATT (P.F.), 1957. – Effect of fertilizers and organic materials on the cation exchange capacity of an irrigated soil. *Soil Sci.* 83, (2) : 85-89.
- Technicom autoanalyser methodology, 1964. – Microglucose procedure. Ref. : P4-3R 610-1-4.
- TIESSEN (H.), STEWART (J.W.B.), 1983. – Particles-size Fractions and their use in studies of Soil Organic Matter. II. Cultivation Effects on Organic Matter Composition in Size Fraction. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47 : 509-514.