

# ETUDE EXPERIMENTALE DE L'HUMIFICATION DANS UN SOL CALCAIRE SOUS CULTURE DE MAÏS

M.T. HERNANDEZ <sup>(1)</sup>, J. CEGARRA <sup>(1)</sup>, F. COSTA <sup>(1)</sup>, A. LAX <sup>(1)</sup>  
F. ANDREUX <sup>(2)</sup>, J.-M. PORTAL <sup>(2)</sup> et E. SCHOULLER <sup>(2)</sup>

## RESUME

*Un sol calcaire du Sud-Est de l'Espagne est choisi pour étudier les variations de la distribution des principales fractions organiques après culture de maïs, conduite en serre, en présence ou non d'un amendement de résidus végétaux peu décomposés et modérément azotés (C/N = 30). Par tamisage sous eau à 100 µm, les fractions les plus humifiées (« fines ») sont séparées des fractions les moins humifiées (« grossières»). Sur les fractions fines, sont extraits successivement les carbonates, en solution HCl diluée, et les composés humiques solubles dans le pyrophosphate de sodium 0,1 M, puis les humines inextractibles sont hydrolysées en milieu acide sous reflux.*

*La comparaison des différents traitements du sol s'appuie principalement sur la distribution du carbone et de l'azote organique entre les fractions séparées. Elle montre que l'amendement végétal influe sur la composition de toutes les fractions, notamment en accroissant les proportions d'acides humiques, ainsi que les formes résiduelles et microbiennes de l'humine des fractions fines. La culture se révèle sans effet sur le sol non amendé, alors qu'en présence d'amendement, elle tend à compenser la minéralisation du carbone organique de ce dernier, et à concentrer l'azote organique — hérité ou réorganisé — au sein des fractions fines.*

## INTRODUCTION

La genèse d'une partie des sols cultivés du Sud-Est espagnol est liée au régime aride ou subaride. Ces sols sont presque toujours carbonatés et présentent des tendances isohumiques plus ou moins accentuées. En conditions hydriques satisfaisantes ils peuvent être de productivité agricole assez élevée, bien que les conditions climatiques entretiennent une minéralisation active des réserves organiques au détriment de la structure et des propriétés d'échange ionique.

De nombreuses études ont été réalisées dans le but de connaître l'incidence de l'apport de matières organiques exogènes sur les propriétés physiques et chimiques de ces sols. Outre des apports organiques traditionnels comme le fumier et la tourbe, des résidus végétaux de nature et d'origine variées, en particulier des

**Mots-clés : Matière organique - Humification - Sols calcaires - Maïs.**

**Key words : Organic matter - Humification - Calcareous soils - Maize crop.**

(1) C.S.I.C., Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura, Avenida de la Fama, 1, Apartado 195, Murice (Espagne).

(2) C.N.R.S., Centre de Pédologie Biologique - B.P. 5 - 54501 Vandœuvre-les-Nancy Cédex (France).

pailles, ont été utilisés (REVERTE, 1978 ; HERNANDEZ *et al.*, 1983 ; CEGARRA *et al.*, 1983).

La présence d'une culture peut modifier les transformations de la matière organique dans le sol : d'une part, la plante est capable d'absorber certains composés organiques de l'humus ou de la solution du sol (HARMS *et al.*, 1969 ; LINEHAN et SHEPHERD, 1979) ; d'autre part, le système racinaire de cette plante peut exsuder ou libérer une grande variété de substances organiques de tous poids moléculaires (ROVIRA et Mc DOUGALL, 1967 ; BARLOW, 1975) représentant jusqu'à 30 % du poids sec de la racine chez le blé (MARTIN et KEMP, 1980) et 20 % dans le cas du maïs (HETIER *et al.*, 1980, 1986). Ainsi, après un cycle de culture, il est possible de mettre en évidence certains changements dans la distribution de la matière organique du sol, spécialement celle des composés humiques (FELLER *et al.*, 1981 ; HETIER *et al.*, 1986).

Une telle étude a été conduite dans le cas d'un sol de culture maraîchère de la région de Murcie (Espagne) auquel un amendement végétal a été incorporé. Une expérience en serre a permis de suivre le devenir de cet amendement en présence ou en absence d'une culture de maïs et en conditions contrôlées d'humidité.

## I. MATERIEL ET METHODES

### A) Le sol

Le sol utilisé (tableau I), prélevé dans la région du « Campo de Cartagena », province de Murcie (Espagne), appartient à l'unité des *Xérosols calcaïques* (classification FAO), au groupe des *Calciorthids* de la Taxonomie américaine (ALIAS, *et al.*, 1977), et s'apparente au groupe des *Sols bruns subarides* de la classification française. Il est très calcaire dès la surface de faible teneur en matière organique et de texture limono-argileuse (limons 42,1 % ; argiles 27,5 %). La fraction argileuse est surtout constituée d'illite et de montmorillonite en proportions équivalentes.

Le matériel nécessaire a été échantillonné après labour dans les 20 premiers centimètres du profil, en février et en conditions météorologiques sèches.

**Tableau I : Caractéristiques analytiques du sol étudié.**

*Analytical data of the studied soil.*

CaCO <sub>3</sub> %		pH 1:1		C org. %	N total %	N org. %	C/N	P assimil. (ppm)	K assimil. (m.e./100g)
Total	Actif	H <sub>2</sub> O	KCl						
50,4	13,2	8,0	7,0	0,81	0,060	0,057	14,2	28,6	0,56

### B) L'amendement végétal

Le matériel végétal destiné à être enfoui dans le sol est constitué de débris végétaux modérément décomposés provenant d'une garrigue de la Sierra de Altaona, proche de la station échantillonnée (tableau II). Les espèces végétales identifiées

**Tableau II : Caractéristiques analytiques de l'amendement végétal.**

*Analytical data of the plant material added to the soil.*

C org %	N org %	C/N	C hydrosol. %	N hydrosol. %	C AF %	C AH %	AH/AF
31,2	1,05	29,7	0,4	0,02	3,4	3,2	0,9
Cendres %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %	CaO%	MgO%	K <sub>2</sub> O%	Na <sub>2</sub> O%	Résidu insoluble aux acides %	
35,4	0,2	13,8	1,4	0,5	0,16	20,5	

sont celles propres à ce type d'écosystème (*Rosmarinus officinalis*, *Thymus vu'garis*, *Anthyllus cytisoides*, *Lygeum spartum*, *Crataegus monogyna*, *Brachypodium phonicoides*), ainsi que quelques individus épars de jeunes *Pinus halepensis*.

Ce matériel, broyé au broyeur à couteaux et tamisé à 0,5 mm, sans autre traitement, contient des quantités importantes d'impuretés calcaires et siliceuses et a une teneur en azote relativement basse. Environ 20 % de son carbone organique sont extractibles en milieu alcalin, les acides fulviques étant légèrement prédominants.

### C) La culture

La variété de maïs choisie est un hybride double de cycle court (90 jours), répertoriée G-350 cycle FAO 300, produit par FUNK et cultivé couramment dans la région de Murcie.

### D) Protocole expérimental

Quatre essais en serre, correspondant à des traitements différents du sol, ont été conduits d'avril à juillet à raison de trois répétitions par essai (Tableau III). Les essais I et III ont été effectués sans culture, respectivement sans et avec amendement végétal ; les essais II et IV ont été conduits en présence de culture, respectivement sans et avec amendement végétal. L'essai III a été doublé, de façon à comparer la composition du mélange sol + amendement végétal avant (III-i) et après (III-f) l'expérience.

**Tableau III : Nature des essais effectués.**

*Description of the different essays.*

Nom	Nombre de répétitions (temps zéro)	Matériel	Nombre de répétitions (trois mois)
I	3	Sol seul	
II		Sol + culture	3
IIIi	3	Sol + amendement	
III f		Sol + amendement	3
IV		Sol + amendement + culture	3

Pour les essais en présence de culture, des récipients cylindriques en PVC de 50 cm de hauteur et 25 cm de diamètre, contenant 30 kg de sol tamisé à 4 mm, ont été utilisés. Pour les essais sans plante, des cylindres de 25 cm de hauteur et 14 cm de diamètre contenant 7 kg de sol, ont suffi. Chaque essai a reçu une fertilisation minérale de base contenant 0,15 g de phosphore sous forme de  $\text{Ca}(\text{PO}_4\text{H}_2)_2$  et 0,15 g de potassium sous forme de  $\text{K}_2\text{SO}_4$  par kilogramme de sol. Aux sols des essais III et IV, on a homogénéisé manuellement environ 1,5 kg ou 0,35 kg d'amendement végétal, selon la taille respective des cylindres. Ces apports représentent 16 g de carbone organique, 12 g de  $\text{CaCO}_3$  (soit 1,4 g de carbone minéral) et 0,5 g d'azote par kilogramme de sol.

L'humidité du sol a été entretenue par arrosage à l'eau permutée à des valeurs comprises entre 50 et 100 % de la capacité de rétention hydrique à 1/3 d'atmosphère. Après 10 jours deux plantules de maïs ont été introduites dans chacun des cylindres des essais II et IV. Dans tous les cas, une fertilisation minimale de nitrate de calcium a été apportée avec les eaux d'arrosage : 0,063 g d'azote nitrique par

kilogramme de sol ont été ainsi ajoutés dans chaque essai. 24 heures après le premier arrosage les sols des essais I et III-i ont été récupérés, séchés à l'air en couche fine et conservés en récipients hermétiques aux fins d'analyse. En fin d'expérience, les cylindres des essais II, II-f et IV ont été sectionnés longitudinalement, les racines les plus grosses ont été séparées manuellement, puis le sol a été conditionné comme celui des autres essais. En outre, environ 300 g de chaque échantillon de sol ont été mis à part et congelés à  $-20^{\circ}\text{C}$  en vue de la détermination des formes de l'azote.

## E) Techniques analytiques

- **CARACTERISATION DU SOL.** Toutes les méthodes de routine sont celles décrites par JACKSON (1964) excepté pour la capacité d'échange cationique, qui a été déterminé selon la technique utilisant  $\text{BaCl}_2$  et la triéthanolamine (CARPENA *et al.*, 1972). La capacité de rétention hydrique des différents échantillons de sol a été mesurée à l'aide de la presse à membrane de RICHARDS.

- **FRACTIONNEMENT GRANULOMETRIQUE.** Les sols tamisés à 1 mm ont été dispersés dans l'eau distillée, puis fractionnés comme indiqué figure 1. Les fractions supérieures (S100) et inférieures (I100) à  $100\ \mu\text{m}$  ont été lyophilisées et pesées. La fraction I100 a été décarbonatée par addition progressive de HCl 3,0 N, en maintenant le pH du milieu  $\geq 2$ , puis le résidu décarbonaté a été tamisé à  $50\ \mu\text{m}$  sous eau distillée. Les fractions supérieures (S50) et inférieures (I50) à  $50\ \mu\text{m}$  ont été lyophilisées, pesées et homogénéisées par broyage modéré.

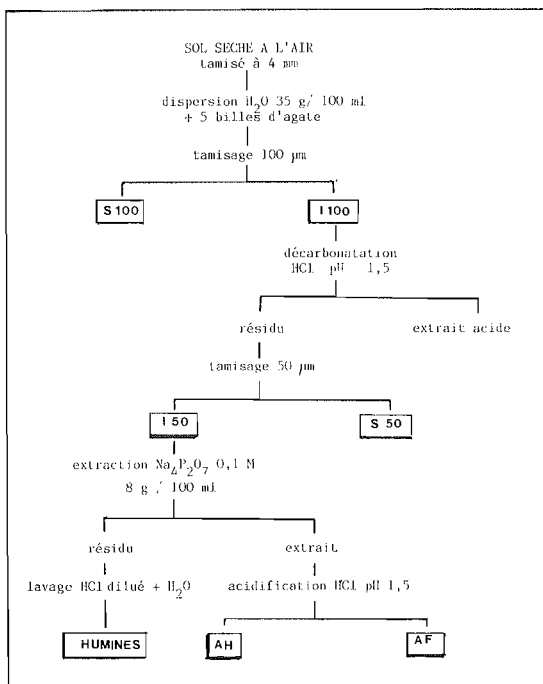


Figure 1 : Organigramme de fractionnement des sols.  
*Soil fractionation organigram.*

- **EXTRACTION DES COMPOSES HUMIQUES.** Les composés humiques ont été extraits à l'épuisement par le pyrophosphate de sodium 0,1 M à partir du sol total, d'une part et de la fraction 150, d'autre part. Les argiles présentes dans les extraits ont été floculées par addition de 4 % de KCl, repos durant 24 heures et centrifugation à  $20\ 000\ \text{g}$ . A partir des surnageants ainsi séparés, les acides

numiques (AH) ont été floculés à pH 1,5 par HCl dilué. Les résidus inextractibles ont été lavés avec HCl 0,05 M et à l'eau, puis séchés à 55° C, en vue du dosage de l'humine. L'ensemble de ces opérations est résumé dans la figure 1 (ANDREUX *et al.*, 1980).

Sur l'amendement végétal ont été extraits les composés hydrosolubles, après macération dans l'eau distillée (10 g : 100 ml) durant 24 heures et centrifugation, ainsi que les composés alcalino-solubles de type humique, selon une méthode proche de celle utilisée dans le cas du sol.

• **DOSAGES.** Le carbone organique (*Cor*) et les carbonates des échantillons solides (sol, fractions granulométriques, amendement végétal) ont été déterminés à l'analyseur (Carmhograph 12 Wösthoff). Les différentes formes de carbone soluble ont été dosées soit à l'aide de ce même appareil, soit par oxydation dichromique. Le carbone des résidus inextractibles a été mesuré par l'auto-analyseur « Carlo Erba 1106 », et leurs teneurs en carbone hydrolysable par HCl 3,0 N au reflux ont été dosées avec l'analyseur « Carlo Erba TCM 400 ». L'azote organique (*Nor*) du sol, de ses différentes fractions et de l'amendement végétal, a été déterminé par digestion sulfurique et distillation alcaline, selon la méthode de Kjeldahl. Les formes  $\text{NH}_3^+$  et  $\text{NO}_3^-$  extraites du sol total par KCl 2,0 N ou présentes dans les solutions de décarbonatation ont été déterminées par distillation de l'ammoniaque libre à pH 8,2 et réduction des nitrates par l'alliage de Dewarda, successivement.

Les hydrolysats chlorhydriques de l'humine ont été débarrassés de leur excès d'HCl par évaporation sous pression réduite, puis on a déterminé leur teneur en  $\text{NH}_4^+$  comme précédemment, et leur teneur en azote  $\alpha$  — aminé, par la méthode colorimétrique de MOORE et STEIN (1954). Les sucres réducteurs recueillis par hydrolyse des humines dans  $\text{H}_2\text{SO}_4$  1,0 N au reflux (CHESHIRE *et al.*, 1973) ont été dosés par colorimétrie à l'antrone selon la méthode de BRINK *et al.* (1960).

## RESULTATS ET DISCUSSION

### A) Variation des paramètres hydriques et chimiques globaux des sols

L'addition d'amendement végétal accroît la capacité de rétention d'eau du sol de 23 % à 27 % environ au moment du mélange (Tableau IV). Cette propriété ne subit plus ensuite de modification significative en fonction du temps d'incubation ou de culture. Par contre, la capacité d'échange cationique n'accuse qu'une augmentation faible au moment de l'ajout d'amendement.

On observe que les augmentations des teneurs en *Cor* obtenues aussitôt après addition de l'amendement végétal (essai III-f) se trouvent atténuées à la fin de

**Tableau IV : Variation de la capacité de rétention hydrique (C.R.H.), de la capacité d'échange cationique (C.E.C.) et des teneurs en azote et en carbone du sol en fonction des essais effectués.**

*Changes in water retention capacity (C.R.H.), cation exchange capacity (C.E.C.), and carbon and nitrogen contents of the soil in the different essays.*

Essais	C.R.H. (%)	C.E.C. (me/100g)	C/N	Formes de l'azote (%)			Formes du carbone (% du sol)				AH/AF
				N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	N org.	C org.	C extr.	C <sub>AH</sub>	C <sub>AF</sub>	
I	22,3	14,4	14,2	0,0017	0,0014	0,057	0,81	0,19	0,12	0,07	1,7
II	23,7	13,4	14,9	0,0012	tr	0,057	0,85	0,20	0,13	0,07	1,9
III-i	27,0	16,2	24,8	0,0012	tr	0,105	2,60	0,51	0,28	0,13	1,2
III-f	27,7	15,5	18,6	0,0012	0,0010	0,105	1,95	0,40	0,22	0,18	1,2
IV	28,1	15,8	21,0	0,0012	tr	0,107	2,24	0,38	0,19	0,19	1,0

tr = traces.

l'expérience (essai III-f) par suite de la dégradation de 36 % de cet amendement. Les sols des essais avec plante (II et IV) ont des teneurs en *Cor* respectivement identiques et supérieures après trois mois, à celles de leurs homologues non cultivés (I et III-f). Ceci traduit un certain effet « conservant » de la culture sur l'humus (JENKINSON, 1977 ; SPARLING *et al.*, 1982) et peut s'expliquer dans le cas IV par un enrichissement relatif dû aux rhizodépôts de maïs. Le carbone extractible au pyrophosphate suit des changements analogues à ceux de *Cor* ; il présente une augmentation importante en valeur absolue, immédiatement après l'apport d'amendement végétal (essai III-i) et tend à décroître après trois mois d'expérience (essais III-f et IV). Les rapports AH/AF, voisins de 2 dans les sols non amendés, diminuent dans les sols amendés et tendent vers une valeur voisine de celle de l'amendement organique, sans qu'on note d'influence significative de la culture.

L'apport d'amendement végétal fait doubler la teneur en *Nor* du sol (essai III-i). Cette teneur demeure stable après trois mois d'incubation, en présence comme en absence de plante. L'ammoniaque extractible ne représente que 1 à 2 % de l'azote du sol, et ne varie pas du fait de l'amendement. L'azote nitrique est pratiquement absent partout, indiquant que la réorganisation de l'azote de l'engrais est aussi active dans tous les essais. Le rapport C/N du sol, initialement voisin de 14, varie peu dans le sol cultivé non amendé, double avec l'apport d'amendement, puis diminue sensiblement durant l'expérience, en particulier en l'absence de culture.

## B) Fractionnement physique et chimique des matières organiques

### 1. Distribution granulométrique avant décarbonatation

Dans les sols non enrichis (essais) la fraction grossière S100 représente environ 17 % du poids total du sol (Tableau V). Sa teneur en carbone total est voisine de 5 %, mais les teneurs en *Cor* et *Nor* ne dépassent pas 0,4 et 0,02 %, respectivement. La fraction fine I100 a sensiblement la même teneur en carbone total que S100, mais ses teneurs en *Cor* et *Nor* sont plus élevées et avoisinent respectivement 1,0 et 0,07 %. Cette fraction I100 concentre la plus grande partie de la matière organique du sol.

**Tableau V : Distribution du carbone et de l'azote organiques dans les fractions granulométriques supérieures (S 100) et inférieures (I 100) à 100 µm, avant décarbonatation des sols.**

*Distribution of organic carbon and nitrogen in the coarse (S 100) and fine (I 100) fractions separated without decarbonatation of the soils.*

Essais	Fractions S100							C/N	Fractions I100							
	Poids (% du sol)	C total		C org.		N org.			Poids (% du sol)	C total		C org.		N org.		C/N
		(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)			(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	
I	16,8	5,3	14,4	0,38	7,9	0,02	5,5	19	82,0	6,4	84,6	0,95	96,2	0,072	96,8	13,2
II	17,8	5,2	14,8	0,35	7,3	0,02	5,9	17,5	80,4	6,5	83,4	1,00	93,5	0,071	96,7	14,1
III-i	20,4	10,5	26,5	6,05	47,6	0,17	33,9	35,8	73,8	7,0	64,4	1,52	43,2	0,093	67,3	16,3
III-f	20,7	9,5	26,8	5,16	54,9	0,18	32,1	28,0	72,6	7,0	69,3	1,34	50,9	0,086	58,5	15,6
IV	21,4	8,8	25,4	4,7	42,4	0,15	28,0	32,1	76,0	7,1	72,8	1,44	46,4	0,105	71,9	13,7

(1) % du poids de la fraction.

(2) % du C ou N du sol avant fractionnement (valeurs mesurées, non corrigées à 100 %).

La présence de l'amendement végétal (essais III-i) augmente notablement le poids de la fraction S100, dont la teneur en carbone total et le rapport C/N ont pratiquement doublé par comparaison avec le sol non amendé. La fraction fine I100 n'incorpore qu'une faible proportion de l'amendement végétal, qui entraîne cependant une légère hausse du rapport C/N de cette fraction.

En absence d'amendement végétal (essai II), la distribution du carbone et de l'azote est peu modifiée par la présence de culture. En présence d'amendement et sans culture (essai III-f), le *Cor* de la fraction S100 diminue pendant le temps de l'expérience, alors que son *Nor* varie peu, conduisant à une baisse de son rapport C/N, de 36 à 28. Dans la fraction I100, *Cor* et *Nor* diminuent faiblement, et le rapport C/N passe de 16,3 à 15,6. En présence d'amendement et après culture (essais IV), les teneurs en *Cor* et *Nor* de la fraction S100 ont encore diminué par rapport à l'essai sans plante (III-f). Par contre, dans la fraction I100, *Cor* diminue légèrement, tandis que *Nor* augmente jusqu'à une valeur supérieure à celle notée en début d'expérience, et le rapport C/N est alors proche de celui de la fraction I100 du sol non amendé.

Afin de préciser dans quelle mesure les variations observées sont significatives, on a comparé au tableau VI les valeurs de *Cor* et *Nor* mesurées sur les sols non fractionnés et calculées en sommant celles des fractions S100 et I100. Les sommes calculées sont tantôt inférieures, tantôt supérieures aux valeurs mesurées, les écarts variant de 2 à 10 %. La comparaison de ces sommes entre les essais I et III-i conduit à une valeur du rapport C/N de l'amendement voisin de 37, au lieu de 29,7 en théorie, ce qui signifierait que les analyses de carbone ou d'azote peuvent être entachées d'une erreur relative pouvant atteindre 20 %. Les imprécisions sur les valeurs *Cor* peuvent être imputées aux difficultés du dosage de carbone organique dans un milieu fortement carbonaté. Celles sur l'azote tiennent plutôt à des minéralisations incomplètes lors du dosage et seraient donc le plus souvent par défaut. Or, si *Cor* est susceptible de diminuer dans les essais à mesure que progresse la minéralisation de l'amendement, *Nor* devrait peu varier puisque l'on a vu que la part de l'azote minéral, engrais nitrique compris, était inférieure à 10 % de l'azote total du sol.

**Tableau VI : Bilan du carbone et de l'azote organiques après fractionnement granulométrique des sols à 100 µm.**

*Balance-sheet of organic carbon and nitrogen after grain-size fractionation of soils by sieving at 100 µm.*

Essais	Fractions S100		Fractions I100		Somme calculée (1)		Somme mesurée (2)		Ecart relatif (1)-(2)/(2) %	
	C% (*)	N %	C %	N %	C %	N %	C %	N %	C	N
I	0,0638	0,0033	0,7790	0,0590	0,8428	0,0623	0,81	0,0570	4,0	9,3
II	0,0623	0,0035	0,8040	0,0571	0,8663	0,0606	0,85	0,0570	1,9	5,9
III-i	1,2340	0,0347	1,1217	0,0686	2,3557	0,1033	2,60	0,1050	-9,4	-1,6
III-f	1,0681	0,0372	0,9728	0,0624	2,0409	0,0996	1,95	0,1050	4,7	-5,1
IV	1,0058	0,0329	1,0944	0,0798	2,1002	0,1127	2,24	0,1070	-6,2	5,3

(\*) % du poids sol.

Dans ces conditions, seuls les essais IV montrent des teneurs en *Nor* compatibles avec le rapport C/N de l'amendement. Cette situation résulte d'un accroissement de *Nor* de près de 15 % [de 0,00686 à 0,00798 %] dans les fractions I100 entre le début (essai III-i) et la fin (essai IV) de la culture, parallèlement à une perte sensible d'azote *Nor* dans les fractions S100 correspondantes. *L'engrais nitrique ne pouvant constituer qu'une source secondaire, c'est donc principalement de l'amendement que proviendrait l'enrichissement.* On ne peut toutefois, à ce stade, établir s'il s'agit de composés organiques hérités, de produits de réorganisation microbienne ou de rhizodépôts.

## 2. Distribution granulométrique après décarbonatation

La décarbonatation de la fraction I100 des sols non amendés (essais I et II) met en solution avant comme après culture, environ 600 ppm de *Cor* et 20 ppm de *Nor*,

soit respectivement 7 et 3 % du carbone et de l'azote de ces sols (Tableau VII). Les quantités d'azote minéral dissous sont du même ordre de grandeur que celles de *Nor*, et réparties également entre nitrate et ammonium. A partir des sols amendés, les quantités de *Cor* solubilisé sont légèrement augmentées, sans effet apparent de la mise en culture. La solubilisation d'azote est, en revanche, presque doublée : il s'agit essentiellement de *Nor* en absence de culture, mais les propositions d'azote minéral et organique sont voisines après culture.

**Tableau VII : Distribution du carbone organique et de l'azote après décarbonatation acide et tamisage à 50 µm de la fraction I100.**

*Distribution of organic carbon and of nitrogen after acid decarbonatation and sieving at 50 µm of the fraction I100.*

Essais	Fraction acido-soluble % du sol				Fraction insoluble tamisée à 50 µm (I50)					
	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	N org.	C org.	Poids (% de I100)	Carbone organique		Azote organique		C/N
						(% de I50)	(% du sol)	(% de I50)	(% du sol)	
I	0,0012	0,0010	0,0019	0,057	44,0	1,75	0,63	0,139	0,050	12,6
II	0,0010	0,0008	0,0016	0,056	46,2	1,76	0,65	0,131	0,049	13,0
III-i	0,0005	nd.	0,0031	0,066	50,7	2,96	1,11	0,170	0,064	17,4
III-f	0,0010	0,0001	0,0035	0,058	49,3	2,28	0,82	0,183	0,065	12,5
IV	0,0016	0,0006	0,0024	0,068	49,7	2,38	0,90	0,179	0,068	13,3

ND = non détecté.

Les pertes de poids observées sont essentiellement imputables à la dissolution des carbonates ; les quantités restant sur le tamis (S50) représentent moins de 1 % du poids total de la fraction I100, et les taux de récupération du carbone et de l'azote sont proches de 100 %. Les teneurs en *Cor* et *Nor* de la fraction I50 varient peu sous l'influence de la culture dans le sol non amendé, alors qu'elles sont sensiblement plus élevées dans le sol amendé, où le rapport C/N passe de 13 à 17,4 au moment de l'addition d'amendement (essai III-i). En fin d'expérience (essais III-f et IV), la teneur en *Cor* de I50 a sensiblement diminué et sa teneur en *Nor* a légèrement augmenté. La valeur du rapport C/N rejoint alors celles des essais non amendés. Rapportées au poids de sol initial, ces valeurs confirment que l'amendement végétal accroît d'environ 50 % la teneur en *Cor* de la fraction fine en fin d'expérience, qu'il y ait ou non eu culture. Un accroissement de la teneur en *Nor* est observé après culture en présence d'amendement, mais il est beaucoup plus atténué que dans la fraction I100, de sorte que l'on ne peut vérifier s'il est ou non significatif.

### 3. Composés humiques extractibles des fractions fines (tableau VIII)

L'extratibilité du carbone par le pyrophosphate de sodium est généralement assez basse et inférieure au tiers du *Cor* total de la fraction. Rapporté au *Cor* de la fraction I50 ou du sol, le pourcentage de carbone alcalino-soluble (*Cpy*) de l'essai

**Tableau VIII : Distribution des composés humiques dans les fractions inférieures à 50 µm**  
*Distribution of humic compounds in the I50 fractions.*

Essais	C extractible				N extractible				C AH/AF	N AH/AF
	% poids	% de I50	% du Sol	% poids Sol	% poids	% de I50	% du Sol	% poids Sol		
I	0,55	31,7	24,68	0,20	0,027	19,4	17,01	0,0097	1,5	0,7
II	0,54	31,0	23,70	0,20	0,025	18,7	15,96	0,0091	1,9	0,8
III-i	0,68	23,1	9,86	0,26	0,031	18,2	11,09	0,0116	2,0	1,1
III-f	0,74	32,7	13,75	0,27	0,035	18,9	11,79	0,0124	2,0	0,9
IV	0,71	29,8	11,97	0,27	0,039	21,8	13,73	0,0147	1,7	0,9



III-i est nettement le plus bas, en raison de la quantité importante d'amendement végétal non décomposé. *Cpy* augmente à nouveau dans les essais III-f et IV par suite de la décomposition partielle de l'amendement, légèrement plus semble-t-il en absence de culture. Rapportées au poids de sol, les variations de *Cpy* paraissent sensiblement identiques dans les trois essais amendés.

Le pourcentage d'azote organique extractible (*Npy*) est voisin de 20 % de l'azote de 150 dans presque tous les cas. Rapporté au *Nor* du sol, il marque une baisse sensible au moment de l'apport d'amendement (essai III-i), puis tend à nouveau à augmenter, en particulier sous culture (essai IV). Cette dernière augmentation de *Npy* est également notée en valeur absolue.

Les rapports  $C_{AH}/C_{AF}$  sont compris entre 1,5 et 2,0 dans tous les cas. Les sols non enrichis présentent les mêmes valeurs qu'avant décarbonatation (Tableau IV), tandis que, dans les sols enrichis, ces valeurs ont pratiquement doublé après décarbonatation. L'amendement végétal, dont le rapport AH/AF est de 0,9, apporte donc au sol une quantité importante de composés acido-solubles. Ces derniers seraient surtout associés aux fractions grossières, puisque la teneur en AH de la fraction fine tend à augmenter, y compris après incubation du sol amendé en absence de culture. Après mise en culture, on note que la proportion des AH tend à nouveau à baisser au profit des AF.

Les rapports  $N_{AH}/N_{AF}$  augmente jusqu'à des valeurs proches de l'unité en présence d'amendement végétal, ce qui indique que le *Nor* apporté par ce dernier se trouve essentiellement sous forme d'AH : on a calculé que cet amendement serait à l'origine de 69 % et 57 % du *Nor* des AH extraits respectivement avant et après culture.

### C) Analyse de l'humine

Dans les sols non amendés, la teneur en *Cor* de l'humine est voisine de 1 % ; elle représente environ la moitié du *Cor* total du sol et son rapport C/N ne dépasse pas 10, avec ou sans culture (Tableau IX). Après apport d'amendement, la teneur en *Cor* de l'humine est doublée, bien qu'elle ne représente plus qu'un tiers du *Cor* total du sol amendé, et son rapport C/N atteint une valeur de 15. En fin d'expérience, la proportion d'humine décroît encore ; la teneur en *Cor* de l'humine des sols amendés n'est plus que de 1,5 % et son rapport C/N est à nouveau voisin de 10, tant en présence qu'en absence de culture.

**Tableau IX : Distribution des principales formes de carbone et d'azote dans l'humine des fractions inférieures à 50  $\mu$ m.**

*Distribution of the main forms of carbon and nitrogen in the humin of the 150 fractions.*

Essais	C %	N %	C/N	(% C de l'humine)		(% N de l'humine)				
				C hydrol.	C sucres	N hydrol.	N $\alpha$ -aminé	N- $\text{NH}_4^+$	N non identifié	N non hydrol.
I	1,08	0,11	9,8	46,6	6,4	97,2	34,9	48,6	13,5	2,8
II	1,04	0,11	9,5	48,2	6,4	100	37,3	41,8	20,0	nd
III-i	2,08	0,14	14,9	34,8	5,1	87,1	38,6	35,7	12,1	12,1
III-z	1,55	0,16	9,7	46,9	5,5	86,9	42,5	35,0	9,4	12,5
IV	1,55	0,15	10,3	52,5	6,3	84,5	41,3	35,5	7,7	15,5

Le carbone et l'azote hydrolysables représentent respectivement 50 % et 100 % du *Cor* et du *Nor* de l'humine dans les deux sols non amendés. Dans les sols amendés, le carbone hydrolysable reste voisin de 50 %, excepté dans l'essai III-i, où il ne dépasse pas 35 %, en raison probablement de la présence de matière organique fine non décomposée. Une même quantité d'azote de l'humine (environ 15 %) résiste pour la même raison à l'hydrolyse dans tous les sols amendés.

La forme hydrolysable qui prédomine est la forme ammoniacale dans les sols non amendés et la forme  $\alpha$  aminée dans les sols amendés. Dans les sols non amendés, la culture tend à accroître la part des formes hydrolysables non identifiées, au détriment de la forme ammoniacale. Dans les sols amendés, l'incubation et la culture tendent au contraire à baisser la part de ces formes non identifiées, au profit des formes  $\alpha$  —aminées.

La teneur en sucres réducteurs ne dépasse pas 5 à 6 % du Cor de l'humine dans aucun cas, ce qui constitue une valeur relativement basse par rapport à la plupart des sols biologiquement actifs (GUCKERT, 1985). La concentration en sucres dosés dans l'humine passe de 70 mg C/100 g d'humine dans le sol non amendé à 160 mg C/100 g après amendement (essai III-i), soit 36 mg C/100 g apportés par l'amendement. La biodégradation de ce dernier fait légèrement augmenter la part du carbone des sucres, mais abaisse à 85 mg C/100 g leur concentration dans l'humine. En présence de culture, la proportion de carbone des sucres atteint à nouveau une valeur proche de celle trouvée dans l'humine des sols non amendés, et leur concentration augmente jusqu'à 97 mg C/100 g d'humine, peut-être en relation avec la production de polysaccharides racinaires.

*Ces résultats tendent à montrer que la composition de l'humine des fractions fines est, comme celle des autres compartiments, très sensible à la nature et à l'abondance des apports organiques.* D'une part, dès l'adjonction d'amendement végétal, elle s'enrichit de 100 % en Cor et de 30 % en Nor sous forme de débris hérités. D'autre part, la décomposition partielle de l'amendement, y compris celle des débris incorporés dans l'humine, semble avoir favorisé la biosynthèse de composés protéiques, mais ce phénomène semble relativement peu accentué. De même, aucune influence profonde de la culture n'est observée, et la participation de cette dernière à la production de composés glucidiques reste hypothétique.

## CONCLUSIONS

Cette étude a consisté à rechercher des moyens de maintenir ou d'augmenter la réserve humique d'un sol calcaire méditerranéen cultivé en maïs, en y ajoutant, outre une fertilisation minérale minimale, un amendement végétal peu décomposé et peu azoté [C/N = 30], récolté sur place. Ce matériel a été apporté de façon à tripler la teneur en carbone organique du sol et à doubler sa teneur en azote organique. Il apporte en outre un supplément d'éléments nutritifs minéraux et organiques, et augmente d'environ 20 % la capacité de rétention hydrique de l'horizon de surface. Par contre, il influe sur la capacité d'échange cationique, dont la valeur reste proche de 15 me/100 g.

L'amendement végétal s'incorpore principalement dans les fractions grossières, supérieures à 100  $\mu\text{m}$ , du sol et entraîne provisoirement une baisse du pourcentage des matières humiques extractibles et du rapport AH/AF. L'humine correspondante est environ deux fois plus riche en carbone organique que celle des sols non amendés, mais son rapport C/N et sa résistance à l'hydrolyse acide sont plus élevés que dans ces derniers, en raison de la présence de fins résidus végétaux.

En trois mois, environ 40 % de l'amendement végétal sont minéralisés dans le sol. Cette biodégradation se produit essentiellement aux dépens des fractions grossières, mais aussi des fines, dans lesquelles les teneurs en azote organique tendent au contraire à se stabiliser, voire à augmenter. La mise en culture du sol non amendé modifie peu la distribution de la matière organique : un seul cycle de culture ne saurait en effet entraîner de pertes importantes de carbone et d'azote dans les conditions de l'expérience. *Par contre, dans le sol amendé cultivé, on a pu noter, par rapport au sol amendé non cultivé, un enrichissement des fractions fines en carbone, et surtout en azote organique, aux dépens des fractions grossières.* Ce résultat doit être considéré avec prudence, eu égard à la difficulté analytique que représente la réalisation de tels bilans. Un certain enrichissement en azote est encore discerné dans les fractions fines décarbonatées et dans les composés humi-

ques extractibles, mais n'est en revanche plus décelable dans les résidus d'extraction alcaline.

Dans cette expérience, la teneur en fertilisant nitraté avait été maintenue à une valeur assez basse pour éviter un nivellement des résultats concernant la réorganisation azotée. On sait que celle-ci est active lors d'apports végétaux de rapport C/N élevé (GUIRAUD *et al.*, 1981), ce qui explique la quasi absence d'azote minéral, y compris dans la journée qui suit l'apport d'amendement. Toutefois, les méthodes utilisées ici ne permettent pas de préciser la part respective de l'azote de l'engrais et de l'amendement à l'enrichissement des fractions fines, et encore moins de distinguer entre composés hérités, produits de synthèse microbienne et rhizodépôts (PIERRE *et al.*, 1981 ; CHOTTE *et al.*, 1986). On a d'ailleurs pu noter que, d'une manière générale, la contribution de la plante à la répartition des différentes fractions organiques étudiées était difficile à établir avec certitude. Ce travail a surtout permis de montrer qu'un amendement végétal améliore sensiblement le statut organique du sol, en favorisant en quelques mois l'élaboration de composés, tant humiques que protéiques, associés aux fractions fines du sol.

Reçu pour publication : mars 1986

Accepté pour publication : décembre 1986

**REMERCIEMENTS** : Les auteurs expriment leur reconnaissance aux Services Culturels de l'Ambassade de France à Madrid, pour avoir permis le financement des échanges de personnels scientifiques nécessaires à ces études.

#### EXPERIMENTAL STUDY OF HUMIFICATION IN A CALCAREOUS SOIL CULTIVATED WITH MAIZE

A cultivated calcareous soil from South-East Spain (Table I) was chosen to study the changes in the amount and composition of organic material as a result of maize cultivation and enrichment with plant residues of medium C/N ratio (Table II). Greenhouse experiments were carried out, in which the soil was either incubated, or cultivated with maize, in the presence and absence of plant litter amendment (Table III). Soil samples collected at the beginning of the experiment, and after three months of incubation or cultivation were fractionated into coarse (S100) and fine (I100) fractions by wet sieving at 100  $\mu$ m. The fine I100 fractions were then treated with hydrochloric acid to eliminate carbonates, and 0.1 M sodium pyrophosphate, to separate extractable humic compounds and humin (Figure 1).

Addition of plant residues first increased the amounts of organic carbon, of fulvic acids, and the C/N ratio of the soils, even after about 40 % of the amendment have been mineralized, at the end of the experiment (Table IV). Most of the input from the amendment concentrated in the S100 fractions, but the organic carbon of the I100 fractions also increased by 50 %, resulting in a slight increase in the C/N ratio of this fraction. During further biodegradation of the amendment in soil, carbon content decreased in the S100 and I100 fractions, without significant change in nitrogen content. The maize crop did not modify the composition of soil fractions in the absence of organic amendment, but caused a slight increase in the nitrogen content of the I100 fractions in the presence of organic amendment (Tables V and VI). Such enrichment was still observed after decarbonation of the I100 fractions (Table VII), and in soluble humic material (Table VIII).

The carbon content of the humin fraction was duplicated when the plant amendment was added, and was still 50 % higher than in the non amended soil after three months (Table IX). The proportion of inherited plant microfragments was probably important, and was responsible for increasing resistance to acid hydrolysis of the humin material. Partial biodegradation of the amendment favoured the biosynthesis of small amounts of proteinic compounds, and the net decrease of hydrolysable reducing

sugars in the humin. Humins from the soils cultivated and not cultivated after addition of plant amendment had very similar compositions, with the exception of reducing sugars, which increased slightly as a result of the maize crop.

These results simply show that after only one cycle of cultivation, the partial decomposition in soil of a plant amendment contributed to increase the amounts of biomolecules and stable humic compounds in the main soil organic fractions.

- ALIAS L.J. et ORTIZ SILLA R. (1977). — *Anal. Edafol. Agrobiol.*, XXXVI, 207-231.
- ANDREUX F., BRUCKERT S., CORREA A. et SOUCHIER B. (1980). — *C.R. Acad. Sc., Paris*, 291 D, 381-384.
- BARLOW P.W. (1975). — The root cap. In : *The development and function of root*. J.G. Torrey and D.T. Clarkson eds, Acad. Press, London, p. 21.
- BRINK R.H. Jr., DUBACH P. et LYNCH D.L. (1960). — *Soil Science*, 89 (1), 157-166.
- CARPENA O., LAX A. et VAHTRAS R. (1972). — *Soil Science*, 113, 194-199.
- CEGARRA J., HERNANDEZ M.T., LAX A. et COSTA F. (1983). — *Annal. Edafol. Agrobiol.*, XLII (1-2), 236-244.
- CHERSHIRE M.V., MUNDIE C.M. et SHEPERD H. (1973). — *J. of Soil Science*, 24 (1), 54-68.
- CHOTTE J.L., HETIER J.M., GUIRAUD G. et ANDREUX F. (1986). — *C.R. Acad. Sc. Paris*, 303 (III), 7, 269-272.
- FELLER C., CHEVAL M. et GANRY F. (1981). — *L'Agronomie Tropicale*, 36 (1), 9-17.
- HARMS H., SOCHTIG H. et HAIDER K. (1969). — *Plant and Soil*, 31 (2), 257-272.
- GUIRAUD G., FARDEAU J.C. et ROMERO J.J. (1981). — *Rapport Coll. Intern. « Humus et Azote »*, Reims, 411-416.
- GUCKERT A (1985). — *Sols*, 15, 115-138.
- HERNANDEZ M.T., CEGARRA J., LAX A. et COSTA F. (1983). — *Anal. Edafol. Agrobiol.*, XLI (11-12), 2253-2265.
- HETIER J.M., ANDREUX F., SCHOULLER E. et MAROL C. (1986). — *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 50, 76-80.
- HETIER J.M., GUIRAUD G. et MOUTONNET P. (1980). — *Science du Sol*, 2, 127-140.
- JACKSON M.L. (1964). — *Análisis químico de suelos*. J. Beltran Martinez trad., Ed. Omega, Barcelona, 662 p.
- JENKINSON D.S. et RAYNER J.H. (1977). — *Soil Science*, 123, 298-305.
- LINEHAN D.J. et SHEPERD H. (1979). — *Plant and Soil*, 52, 281-289.
- MARTIN J.K. et KEMP J.R. (1980). — *Soil Biol. Biochem.*, 12, 551-554.
- MOORE S. et STEIN W.H. (1954). — *J. Biol. Chem.*, 211, 907-913.
- PIERRE D., JOCTEUR-MONROZIER L., ANDREUX F. et GUIRAUD G. (1981). — *Rapport Col. Intern. « Humus et Azote »*, Reims, 117-125.
- REVERTE P. (1978). — Estudio sobre la mineralización y caracterización de los fertilizantes orgánicos sircle y turba. *Tesis Doctoral*, Universidad de Murcia.
- ROVIRA A.D. et McDOUGALL B.M. (1967). — Microbial and biochemical aspects of the rhizosphere. In : *Soil Biochemistry*. A.D. McLaren and G.H. Peterson eds. Marcel Dekker Inc., New York, 417-463.
- SPARLING G.P., CHERSHIRE M.V. et MUNDIE C.M. (1982). — *J. Soil Science*, 33, 89-100.