

~~TH-FC8~~
TH-FC8

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE
— I. N. R. A. —
STATION de SCIENCE du SOL
Domaine Saint-Paul
94140 MONTFAVET

Université PARIS - SUD
PARIS XI
D.E.A. de Statistiques et Modèles
"MODELISATION DE L'EVOLUTION DES
MATIERES ORGANIQUES DU SOL ;
ESTIMATION DES PARAMETRES ET
SIMULATION".

J. CHADŒUF

Septembre 1981

A V A N T - P R O P O S

Ce mémoire a été réalisé à la Station de Science du Sol du Centre de Recherches Agronomiques d'AVIGNON. Je remercie son Directeur, Monsieur MONNIER, pour l'accueil qu'il m'a réservé.

Je remercie également J. GUERIF, et plus généralement les Services d'Agronomie et de Science du Sol pour leur patience et leurs conseils ainsi que le Service de Biométrie pour son aide et sa compréhension.

PLAN

	Pages
INTRODUCTION	1
1 - LE MODELE	2
2 - INTEGRATION DU MODELE	3
a) Résidus de récolte constants	3
b) Résidus de récolte variables	4
3 - DONNEES	6
3.1. L'essai	6
3.2. Les données	7
4 - TRAVAUX PRELIMINAIRES	9
4.1. Le carbone	9
4.2. Les résidus de récolte	12
4.3. Les parties racinaires	13
5 - ESTIMATION DES PARAMETRES	14
5.1. Remarques et Méthodes	14
5.2. Résultats	15
5.3. Estimation pas à pas	19
5.4. Conclusions	20
6 - PREVISIONS	20
6.1. Résidus de récolte constants	21
6.2. Cas d'une rotation	22
6.3. Application à Boigneville	23
6.4. Erreurs dues aux fluctuations annuelles .	28
7 - ADAPTATION DU MODELE A LA SIMULATION	28
7.1. Limites du modèle fondé sur un bilan global	28
7.2. Bilan par horizon homogène	29
7.3. Equations pour les traitements L_0 , L_1 , L_2	29
7.4. A l'équilibre	31
7.5. Restrictions et conclusions	32
8 - CONCLUSIONS	33
8.1. Paramètres du modèle	33
8.2. Conséquences probables de l'exportation des pailles	35

INTRODUCTION.

Les propriétés physiques des sols dépendent étroitement de leurs constituants. Parmi ceux-ci, seules les variations de la Matière Organique (M.O), dues aussi bien à leur évolution dans le sol qu'aux apports extérieurs (résidus de récolte ou amendements organiques), restent sensibles sur une échelle de 1 à 50 ans. De surcroît, de petites variations de cette teneur peuvent apporter de grandes variations de comportement. Compte-tenu de la lenteur de l'évolution du stock de carbone, il est préférable de le maintenir à un niveau suffisant que d'avoir à le reconstituer. La connaissance d'une loi d'évolution de ce stock reste la seule façon de pouvoir prévoir les conséquences qu'entraînent des modifications de la gestion des résidus de récolte ainsi que d'envisager par des apports raisonnés de M.O de maîtriser certains comportements des matériaux.

On rencontre, dans la littérature, de nombreux modèles d'évolution des M.O aussi bien à court terme qu'à long terme. Il existe cependant deux écueils majeurs à la modélisation de l'évolution des M.O :

- Plus on désire décrire analytiquement la réalité du phénomène et plus nombreuses sont les variables devant intervenir. Le problème du choix de ces variables se pose alors -quels constituants de la M.O prendre en compte ?- et celui de la formulation du mécanisme -jusqu'à quel point décrit-on explicitement la dynamique du phénomène ?- (intervention de la biomasse dans le cycle du carbone, échelle de temps, ...).

- Les variations du stock de M.O sont lentes et nécessitent des essais de longue durée avant que n'apparaissent des variations sensibles par rapport aux variations annuelles.

Pour répondre relativement rapidement aux questions posées, nous avons été amenés à choisir deux modèles dont les variables permettent à la fois d'atteindre les objectifs fixés et de tirer parti d'essais de longue durée déjà existants.

On cherchera sur ces jeux de données à déterminer les paramètres du modèle, à en évaluer la validité et la sensibilité relativement à la précision des mesures de terrain. Le but ultime d'un tel travail sera d'obtenir un moyen simple de prévision à long et moyen terme des conséquences sur l'évolution des M.O du sol, des changements de systèmes de culture et des exportations éventuelles des résidus de récolte à des fins énergétiques.

1 - LE MODELE.

Pour des durées très inférieures à l'année, PAL et BROADBENT trouvèrent que les pertes en carbone ne pouvaient pas être décrites proprement par des cinétiques du premier ordre et utilisèrent des modèles du type $C = kt^m$ (où k et m sont constants, t = temps et C = perte cumulative de carbone). Cependant, il est généralement admis que la décomposition in vitro de la M.O peut être décrite par des cinétiques du premier ordre :

$$\frac{dC}{dt} = k C$$

(JENKINSON et RAYNER, 1977 ; RUSSEL, 1964 ; STANFORD et SMITH, 1974 ; HUNT, 1977 ; GILMOUR, BROADBENT et BECK, 1977 ; SINHA, SINHA et SINHA, 1977 in : Symposia Papers, 1978, 61-102).

Des cinétiques du premier ordre sont également utilisées pour des modèles d'évolution à long terme de la M.O in situ (HENIN, DUPUIS, 1945 ; HENIN, MONNIER et TURC, KORTLEVEN, 1963 (in MONNIER 1965), JENKINSON et RAYNER, 1977, PAUL et VAN VEEN, 1978). Elles reposent sur une hypothèse de proportionnalité de la masse dégradée à la masse présente dans le sol.

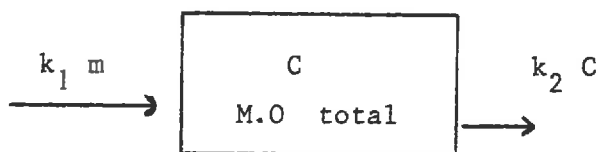
Nous avons choisi deux modèles, HENIN-DUPUIS et HENIN-MONNIER-TURC, ne nécessitant pas un trop grand nombre de variables et permettant d'utiliser les analyses de sol effectuées sur des essais existants : M.O totale, M.O libre et M.O liée.

Les M.O. libres sont des débris végétaux, non ou peu décomposés, sans liaison intime avec les composants minéraux. Leur rapport C/N est élevé et variable. Elles sont susceptibles d'évolution rapide.

Les M.O liées sont principalement associées à l'argile. Leur rapport C/N est plus faible et relativement constant. Elles sont beaucoup moins biodégradables.

- Modèle d'HENIN-DUPUIS (1945).

C'est un modèle à un compartiment (carbone total) qui fait le bilan des entrées-sorties de ce compartiment sur un pas de temps donné. Il présente l'intérêt de n'utiliser que le carbone total qui est souvent la seule mesure effectuée sur de nombreux essais.



m = apport annuel de résidus de récoltes

k_1 = coefficient de transformation en M.O des résidus

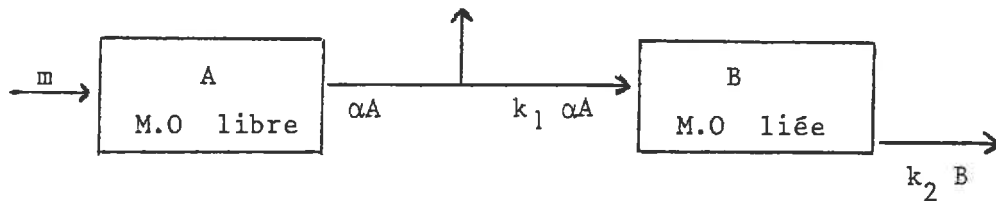
k_2 = coefficient de minéralisation

$$\text{alors } \Delta C = k_1 m - k_2 C$$

- Modèle d'HENIN-MONNIER-TURC (1959)

C'est un modèle à deux compartiments, M.O libre et M.O liée où les bilans sont faits par compartiment. Son avantage est que les mesures de M.O libre et liée peuvent être désormais effectuées en routine.

De plus, ce niveau de fractionnement est compatible avec l'état actuel de nos connaissances vis-à-vis de l'interprétation que l'on peut donner du rôle des M.O sur le comportement physique et surtout mécanique des sols.



- α = coefficient de dégradation de la M.O libre
 k_1 = coefficient isohumique
 k_2 = coefficient de minéralisation de la M.O liée
 m = apport annuel de résidus de récolte

alors

$$\Delta A = m - \alpha A$$

$$\Delta B = k_1 \alpha A - k_2 B$$

On n'étudiera dans le cadre de ce mémoire que le premier modèle. Les méthodes mises au point dans ce cadre seront ultérieurement utilisées, après adaptation si nécessaire, au premier compartiment du deuxième modèle, puis au second compartiment.

2 - INTEGRATION DU MODELE (HENIN-DUPUIS).

- a) Si les résidus de récolte sont constants sur l'intervalle d'intégration.

Si l'intervalle d'intégration est grand devant le pas de temps de mesure, on passe à la limite en

$$\frac{dC}{dt} = k_1 m - k_2 C$$

$$\text{d'où } C = \left(C_0 - \frac{k_1 m}{k_2} \right) e^{-k_2 t} + \frac{k_1 m}{k_2}$$

Plus l'intervalle d'intégration est grand, plus la variabilité intraannuelle peut être négligée, donnant ainsi à k_1 et k_2 un sens de coefficients moyens annuels.

Mais m dépend de la culture et de son rendement et peut prendre des valeurs très différentes. Pour améliorer la précision sur l'estimation de k_1 et k_2 , on a été amené à prendre en compte ces variations de m .

b) Si les résidus de récoltes sont variables.

Une tentative d'intégrer les variations de m dans le modèle a été effectuée par DELPHIN et CONESSA (Annales Agronomiques 1979). Ils utilisent la formule intégrée d'HENIN-DUPUIS sur un an :

$$C_{n+1} = C_n e^{-k_2} + \frac{k_1 m_n}{k_2} (1 - e^{-k_2})$$

$$\text{d'où } C_n = C_0 e^{-nk_2} + \frac{k_1}{k_2} (1 - e^{-k_2}) \sum_{i=0}^{n-1} e^{-ik_2} m_{n-i-1}$$

Mais cette utilisation par pas d'un an est contraire à l'hypothèse d'établissement du modèle : le pas de mesure est très petit devant l'intervalle d'intégration.

On a donc préféré revenir à la formule initiale :

$$\Delta C = C_{n+1} - C_n = k_1 m_n - k_2 C_n$$

Si on suppose k_1 constant pour les différents résidus de la rotation et k_2 constant sur l'intervalle d'intégration,

$$C_n = C_0 (1 - k_2)^n + k_1 \sum_{i=0}^{n-1} (1 - k_2)^i m_{n-i-1}$$

Cette formulation discrète du phénomène donne à k_1 et k_2 une signification stricte de coefficients moyens annuels et permet en toute rigueur :

- de prendre en compte la variabilité annuelle des résidus de récolte,
- de travailler sur une période relativement courte par rapport au pas de temps de mesure.

Si $m_0 = \dots = m_n = m$, alors

$$C_n = \left(C_0 - \frac{k_1 m}{k_2} \right) (1 - k_2)^n + \frac{k_1 m}{k_2}$$

On retrouve la formule d'HENIN-DUPUIS avec une exponentielle $(1 - k_2)^n$ au lieu de e^{-nk_2} .

Enfin, on pourra remarquer dans cette formulation l'importance de la connaissance et de la constance des dates d'enfouissement de m et de mesure des taux de carbone : si les mesures sont effectuées trois mois ou onze mois après l'enfouissement, k_1 ne sera pas le même. L'idéal est que la mesure soit effectuée juste avant ou juste après l'enfouissement des résidus de récolte.

Par ailleurs, la variabilité des teneurs en carbone sur aliquote de sol sera plus faible avant enfouissement, du fait d'une meilleure répartition et division de la M.O après une année d'incorporation.

3 - DONNEES : ESSAI SUR LES TECHNIQUES SIMPLIFIEES DE TRAVAIL DU SOL EN ROTATION CEREALIERE DE L'I.T.C.F. (Station de Boigneville).

3.1. L'ESSAI.

On étudie à BOIGNEVILLE l'effet à long terme de trois techniques de travail du sol :

- L_0 = labour profond
- L_1 = travail superficiel
- L_2 = semis direct

sur une rotation maïs-blé.

Le dispositif est celui d'un split-plot à 4 blocs et 2 facteurs (culture et travail du sol), soit 24 parcelles de 16m x 50m.

L'un des problèmes est de savoir si la répartition différente dans le profil des taux de carbone suivant les techniques de travail du sol correspond à une même masse de carbone, en fait si on assiste seulement à différentes dilutions du carbone dans les horizons travaillés ou s'il y a modification du stock et donc une différenciation des rythmes d'évolution. Nous avons donc choisi de comparer l'effet des différentes techniques sur les masses de carbone contenues dans une même masse de sol (celle qui correspond au travail du sol le plus profond).

FIG 1 NIVEAUX DE PRELEVEMENT

Boigneville

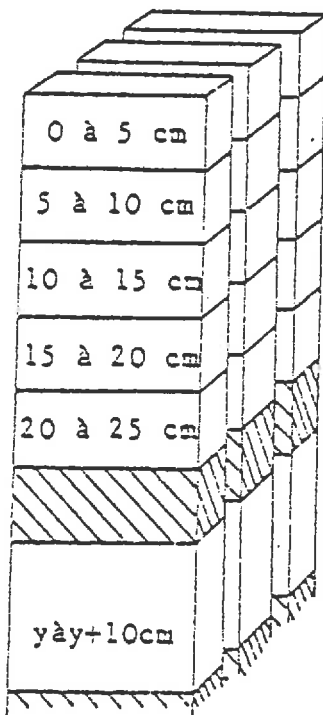
prélèvements 1970

prélèvements 1974-76-78

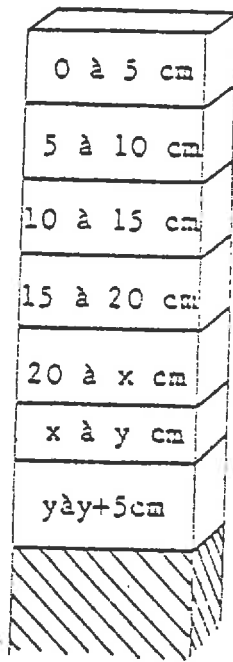
3 TECHNIQUES

LABOUR

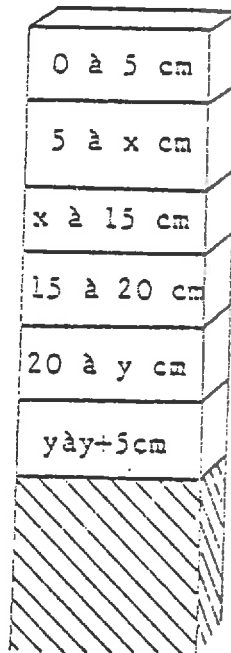
TRAVAIL SUPERFICIEL
SEMIS DIRECT



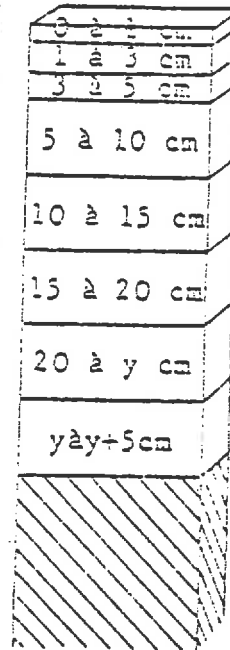
$y = 30 \text{ cm}$



$x = 25 \text{ cm}$
 $y = 28 \text{ cm}$



$x = 11 \text{ cm}$
 $y = 25 \text{ cm}$



$y = 25 \text{ cm}$

x = profondeur de travail en 1973
 y = fond de la couche arable



couches non prélevées

en 1980: prélèvements

- labour 0-X, X-X+5

- travail superficiel 0-X, X-15, 15-Y, Y-Y+5

- semis direct 0-3, 3-5, 5-Y, Y-Y+5

3.2. LES DONNEES.

3.2.1. Matières Organiques (M.O) (années 70-74-76-78-80).

On creuse en chaque coin de la parcelle étudiée un trou de 30 cm de côté et de 40 cm de profondeur (cf. fig 1). Sur deux côtés opposés des trous sont prélevés deux monolithes de terre de 6 à 7 cm d'épaisseur, découpés en couches d'épaisseur donnée (cf. fig. 1). Les huit prélèvements sont alors mélangés en un seul échantillon dans lequel on prélèvera les aliquotes nécessaires aux mesures :

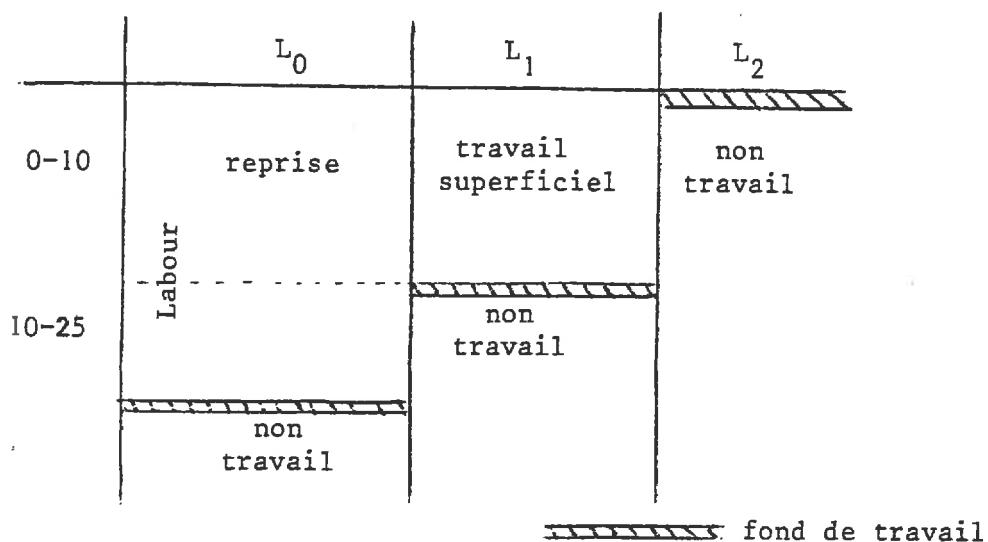
- taux de carbone total
- taux de carbone libre
- le taux de carbone lié est évalué par différence.

REMARQUE :

Les analyses de sol nécessitant de petits échantillons, on les effectue sur des aliquotes prélevées dans des échantillons de volume plus important et brassés pour homogénéisation. La variance des estimations sur ces aliquotes est donc inférieure à celle d'estimateurs calculés sur un volume équivalent prélevé directement in situ.

3.2.2. Densités.

On distingue en L_0 et L_1 deux horizons considérés comme homogènes, pour lesquels ont été mesurées des densités moyennes. Cette notion d'horizon différencié disparaît en L_2 où on observe un gradient de matière organique.



En non travail, dans la couche 0-5 cm, elle varie avec le taux de carbone libre. On établit empiriquement :

$$- C_{\text{libre}} < 6 \text{ ‰} \quad \frac{1}{(\rho_d)_z} = \frac{1}{(\rho_d)_{7-15}} + 0.0189 C_{\text{libre}} - 0.0251$$

$$- C_{\text{libre}} > 6 \text{ ‰} \quad \frac{1}{(\rho_d)_z} = \frac{1}{(\rho_d)_{7-15}} + 0.081$$

où C_{libre} = taux de carbone libre (en ‰)

et ρ_d = masse volumique sèche du sol en place (g/cm^3)

$$r = 0.93$$

$$n = 17$$

3.2.3. Profondeur de travail.

On dispose de la profondeur moyenne de travail :

- 25 cm en L_0

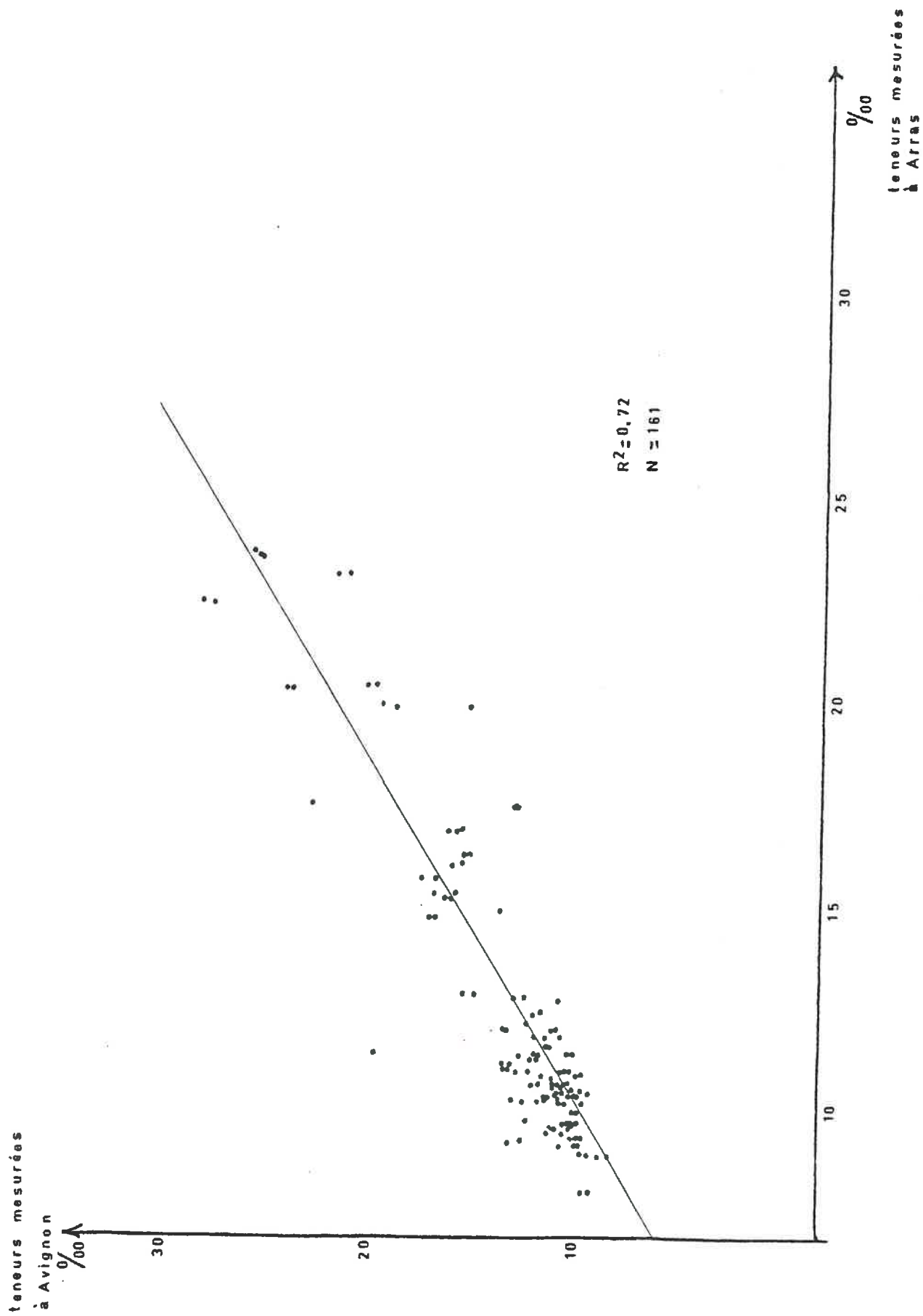
- 10 cm en L_1

3.2.4. Résidus de récolte.

On estime la masse de résidus aériens à partir de la matière sèche totale d'un échantillon prélevé par parcelle depuis 1971.

De 1971 à 1976, on estime aussi la matière sèche épis et de 1977 à 1980 la matière sèche grains. On sait que matière sèche grains \approx 0.85 matière sèche épis.

FIG 2 CARBONE TOTAL: BIAIS DU AU LABORATOIRE



4 - TRAVAUX PRELIMINAIRES SUR LES DONNES.

4.1. LE CARBONE.

4.1.1. Taux de carbone.

Chacun des deux horizons 0-10 et 10-25 de L_0 et L_1 étant supposé homogène (3.4.2.), on prend comme estimateur du taux de carbone d'un horizon la moyenne des taux mesurés dans chaque couche constituant l'horizon. Le sol n'étant jamais remanié en L_2 , la notion de couche homogène disparaît. On utilise alors la répartition la plus fine dont on dispose.

Les mesures sont effectuées au Laboratoire d'Analyses des Sols d'ARRAS (I.N.R.A.). Des mesures sur les mêmes échantillons ont été menées conjointement au Centre d'AVIGNON (I.N.R.A.) pour l'année 1976. Afin d'utiliser le maximum de mesures, et ce d'autant plus que 1976 est une année exceptionnelle, on a corrigé la différence systématique entre les deux séries de mesures au moyen des régressions linéaires suivantes :

$$C_T^{\text{Avignon}} = 1,22 C_T^{\text{Arras}} - 2,8 \quad r^2 = 0.72$$

$$N = 161$$

(cf. fig. 2)

$$C_{\text{libre}}^{\text{Avignon}} = 1,6 C_{\text{libre}}^{\text{Arras}} - 0,086 \quad r^2 = 0.73$$

$$N = 151$$

Les r^2 assez faibles sont dûs à la grande variance des estimateurs.

FIG 3 EVOLUTION DU STOCK DE CARBONE TOTAL

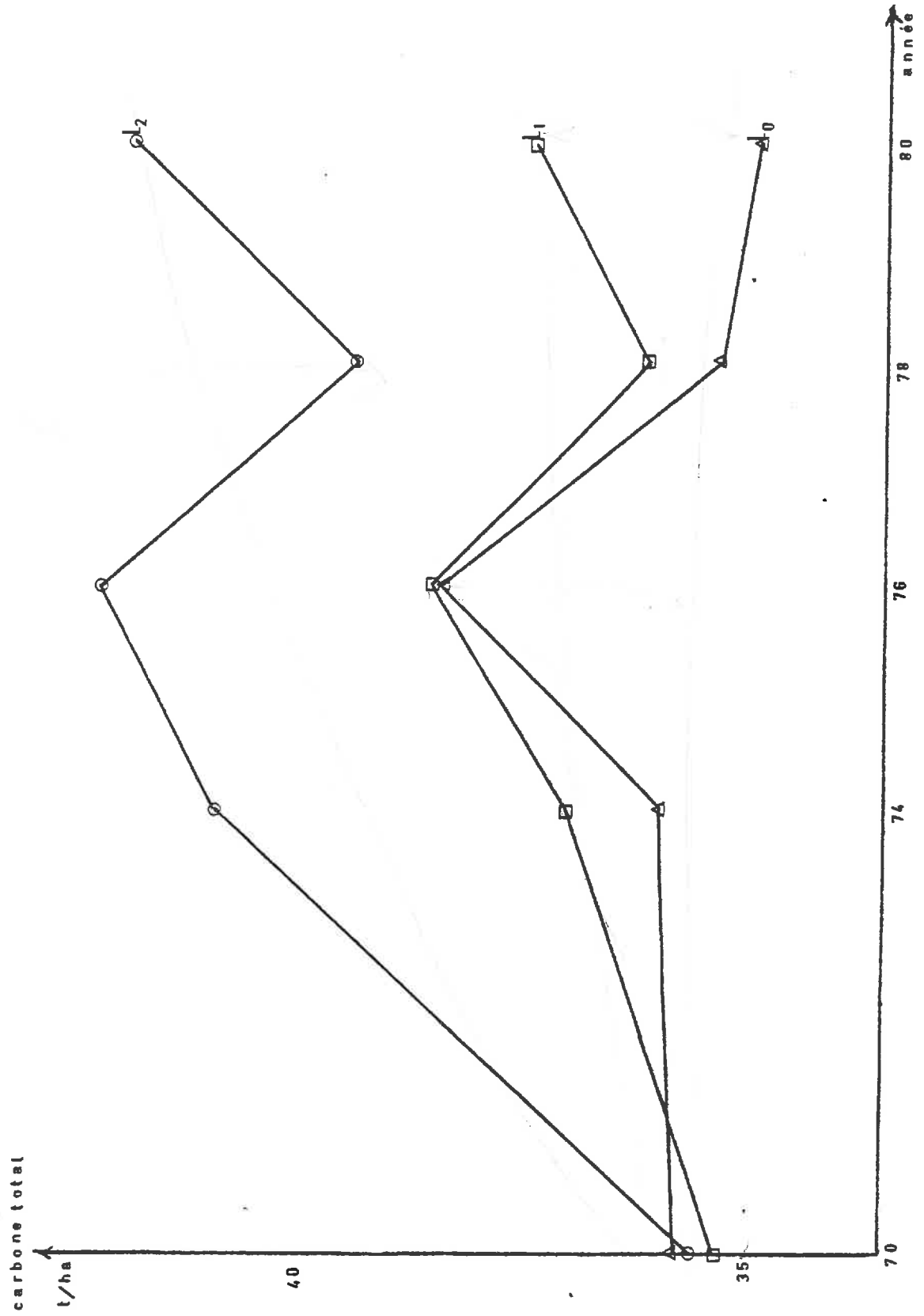
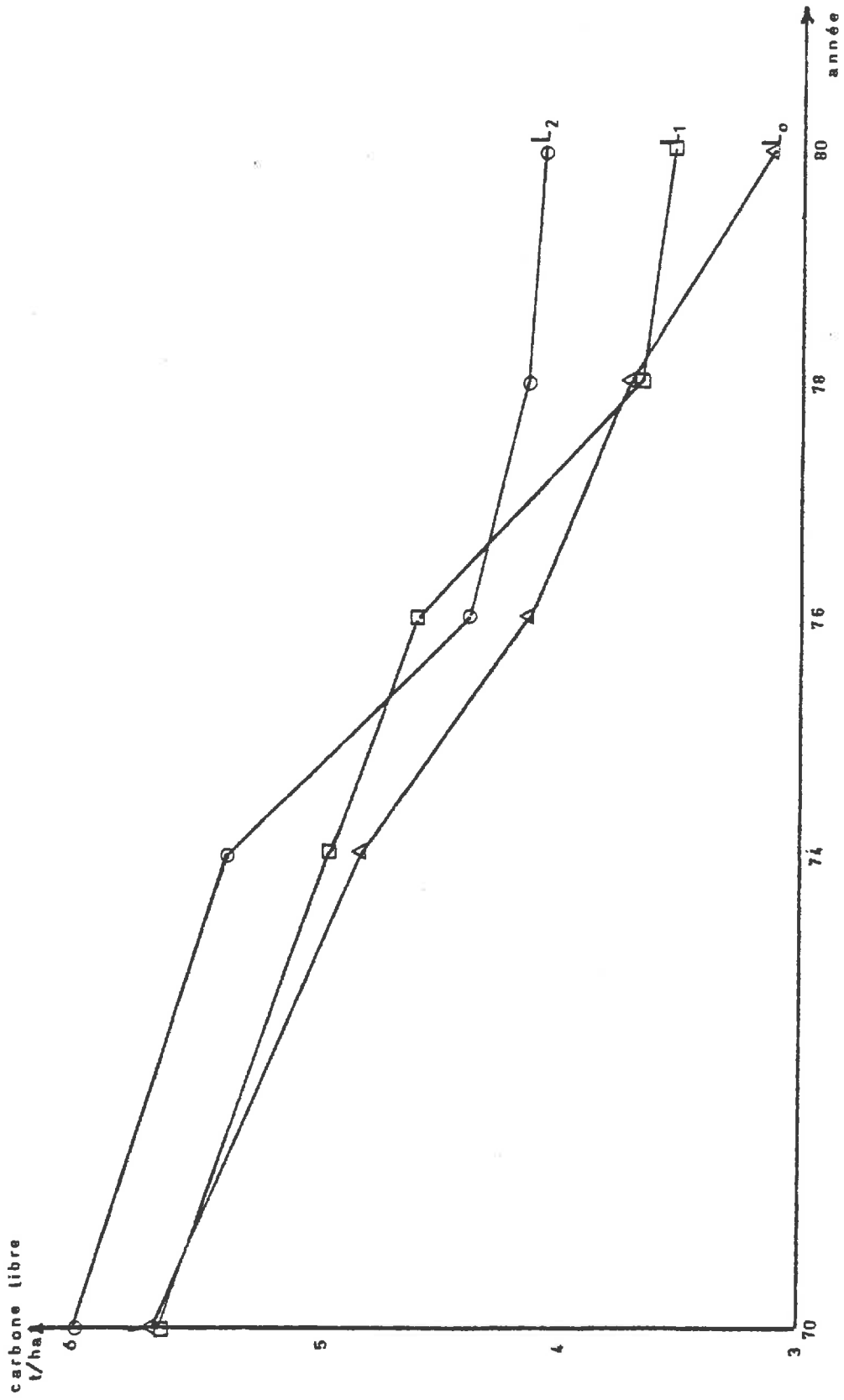


FIG 4 EVOLUTION DES STOCKS DE CARBONE LIBRE



4.1.2. Calcul des masses de carbone.

Pour une couche donnée, supposée homogène,

$$C = \lambda S \rho_d h C' \quad \text{où}$$

- C' = taux de carbone de la couche (%)
 h = hauteur de la couche (cm)
 ρ_d = masse volumique sèche de la couche (g/cm^3)
 S = unité de surface (ha)
 λ = 10
 C = masse de carbone en t/ha

d'où, pour un horizon formé de n couches :

$$C = \lambda S \sum_{i=1}^n \rho_i h_i C'_i$$

On rappelle que, pour comparer les différents traitements (cf. § 3.1.), on désire travailler à masse de sol constante. La masse choisie est celle de l'horizon travaillé en L_0 , soit 3525 Tonnes pour un hectare.

4.1.3. Calcul numérique des ordres de grandeur des écarts sur les masses de carbone dus aux erreurs de mesure.

1) en L_0 et L_1 .

x	Δx	$\Delta C (L_0)$	x	Δx	$\Delta C (L_1)$
$C'_1 \approx 10$	1	1	$C'_1 = 11.5$	1	1.3
$C'_2 \approx 10$	1	2	$C'_2 = 9$	1	2
$h_1 \approx 10$	1	0.1	$h_1 = 10$	1	0.7 et
$h_2 \approx 15$	1	$\frac{\Delta m}{m} = 4 \%$	$h_2 = 15$	arbitraire	{ augmentation diminution de la dilution de 10 %
$\rho_1 \approx 1.32$	10^{-2}	10^{-2}	$\rho_1 = 1.35$	10^{-2}	10^{-2}
$\rho_2 \approx 1.47$	10^{-2}	$1.5 \cdot 10^{-2}$	$\rho_2 = 1.52$	10^{-2}	$1.3 \cdot 10^{-2}$

2) en L₂.

- en 1970 : on est dans le même cas qu'en L₀

- en 1974-76-78 : il y a sept couches définies a priori
d'épaisseur : $(h_i) = 1-2-2-5-5-5-2$

une erreur de 1 % de C_{Total} dans

première couche	$\Delta C \approx 0.14$ t/ha
2ème ou 3ème couche	$\Delta C \approx 0.2$ t/ha
4ème, 5ème ou 6ème couche	$\Delta C \approx 0.8$ t/ha
7ème couche	$\Delta C \approx 0.4$ t/ha

une erreur de 0.5 % de C_{libre} dans 1ère, 2ème ou
3ème couche

$$\Delta C \approx 0.05 \text{ t/ha}$$

une erreur de 10^{-2} g/cm³
de ρ

$$\Delta C \approx 0.05 \text{ t/ha}$$

- en 1980 : on définit trois couches d'épaisseur :
 $(h_i) = 3-2-18$

une erreur de 1 % de C_{Total} dans

1ère et 2ème couche	$\Delta C \approx 0.4$ t/ha
3ème couche	$\Delta C \approx 2.8$ t/ha

une erreur de 0.5 % de C_{libre} dans

1ère ou 2ème couche	$\Delta C \approx 0.1$ t/ha
---------------------	-----------------------------

une erreur de 10^{-2} g/cm³
de ρ

$$\Delta C \approx 0.07 \text{ t/ha}$$

4.1.4. Conclusion.

Les erreurs importantes viennent donc des taux de carbone, mais qui sont mesurés tous les deux ans (sauf 1972) et pour chaque essai, et sont donc justifiables d'une étude statistique (faite au niveau des masses de carbone).

Les erreurs sur les mesures de ρ et des épaisseurs des couches (effectuées une seule fois) pouvaient être beaucoup plus gênantes. L'absence de répétition dans le temps ne permettait pas de déceler l'erreur éventuelle. On constate cependant que les erreurs ainsi apportées sur les masses de carbone sont négligeables devant la variation de ces masses dans le temps.

4.2. RESIDUS DE RECOLTE.

4.2.1. Blé.

MS_{tot} = matière sèche aérienne totale

MS_{gr} = matière sèche grains

$MS_{\text{épis}}$ = matière sèche épis

1) estimations sur le terrain et calculs

de 1971 à 1976, ces estimations sont effectuées sur un prélèvement de 1 m^2 .

de 1977 à 1980, sur trois répétitions de 0.4 m^2 (on ne dispose que de la moyenne)

sachant que $MS_{gr} = 0.80 MS_{\text{épis}}$, on a :

de 1971 à 1976 : $m_{a\text{ér}} = MS_{tot} - MS_{\text{épis}} \cdot 0.80$

de 1977 à 1980 : $m_{a\text{ér}} = MS_{tot} - MS_{gr}$

2) données manquantes

en 1974 : on ne dispose que de $MS_{\text{épis}}$. On a donc calculé par système de culture une régression MS_{tot} $MS_{\text{épis}}$

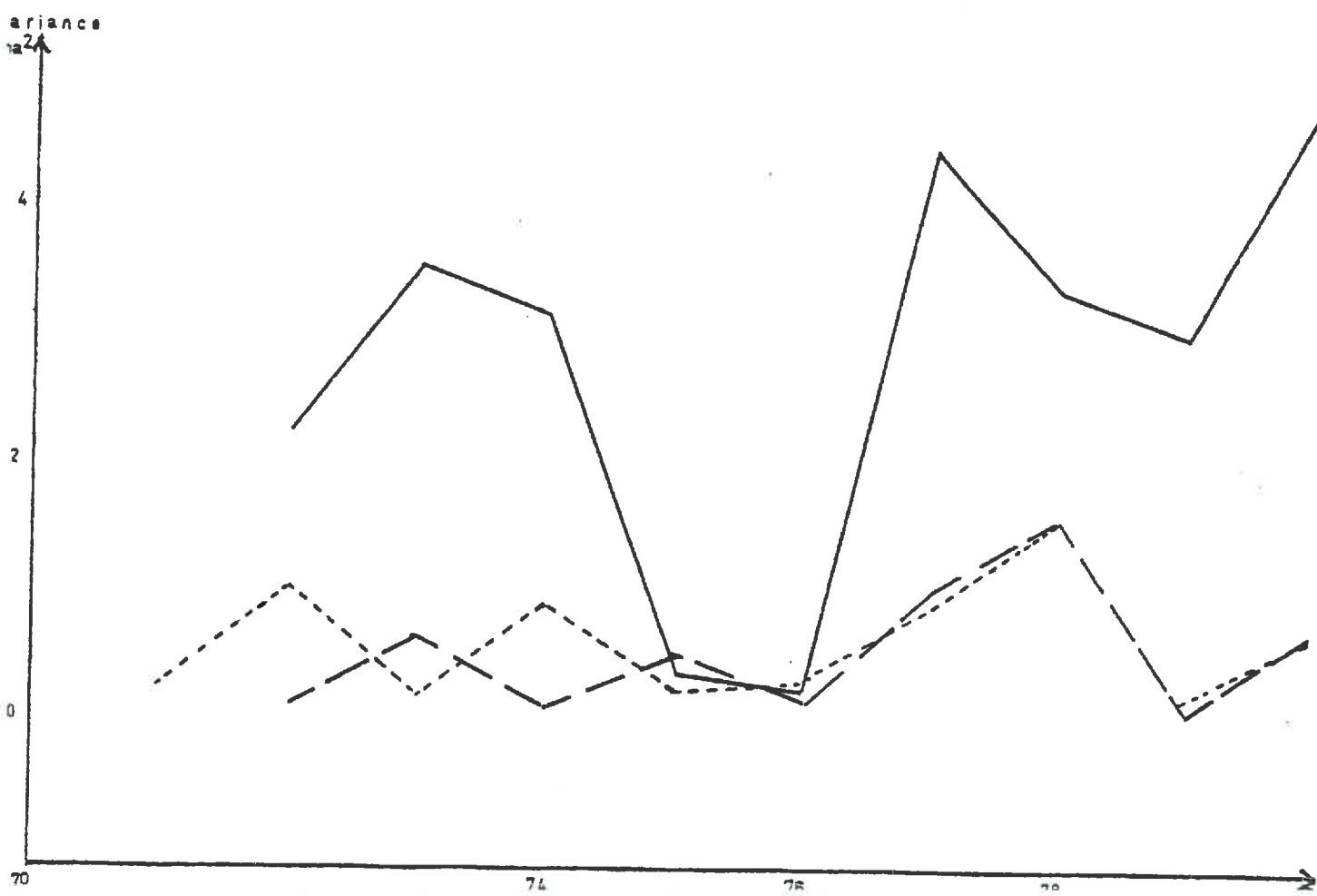
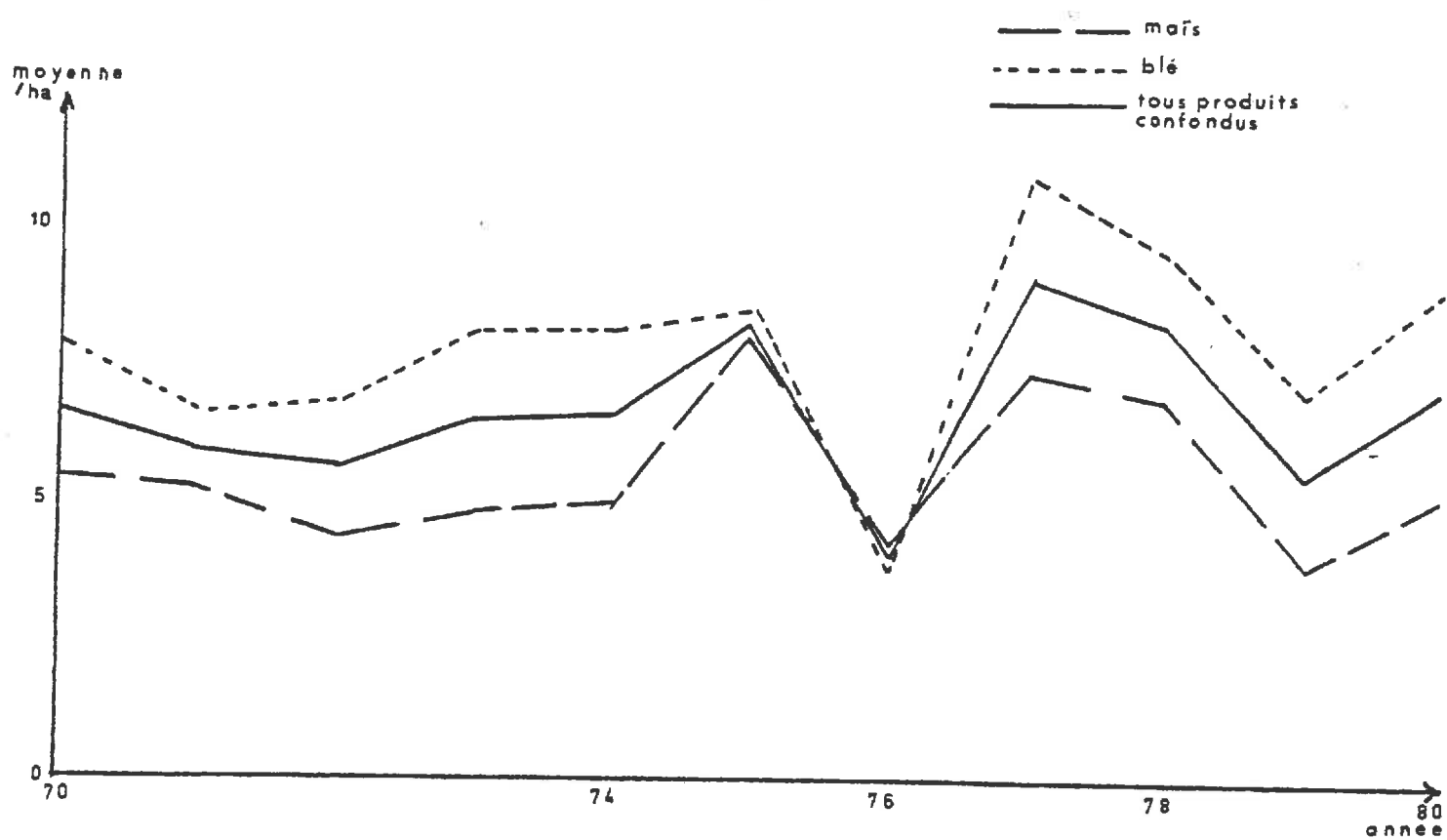
L_0 : $n = 20$ $r^2 = 0.60$ $MS_{tot} = 175.83 + 1.76 MS_{\text{épis}}$

L_1 : $n = 20$ $r^2 = 0.73$ $MS_{tot} = 156.37 + 1.75 MS_{\text{épis}}$

L_2 : $n = 20$ $r^2 = 0.81$ $MS_{tot} = -90.77 + 2.16 MS_{\text{épis}}$

en 1970 : on estime $MS_{\text{épis}}$ et MS_{tot} par leur moyenne générale.

FIG 5 RESIDUS AERIENS EN L₂



4.2.2. Maïs.

1) estimations sur le terrain et calculs

avec les mêmes notations, on sait que $MS_{gr} = 0.85 MS_{\text{épis}}$
de 1972 à 1980, les estimations sont faites sur $4 m^2$ donc

$$m_{\text{aér}} = \frac{MS_{\text{tot}} - MS_{\text{épis}} \cdot 0.85}{4}$$

2) données manquantes

en 1971 : on ne dispose que d'un rendement moyen des grains,
d'où : $MS_{\text{épis}} = MS_{gr}/0.85$ et on estime MS_{tot} à l'aide d'une régression $MS_{\text{tot}} = MS_{\text{épis}} \cdot$

L_0 : n = 20	$r^2 = 0.81$	$MS_{\text{tot}} = 1577.01 + 1.17 MS_{\text{épis}}$
L_1 : n = 20	$r^2 = 0.70$	$MS_{\text{tot}} = 1919.51 + 1.00 MS_{\text{épis}}$
L_2 : n = 20	$r^2 = 0.44$	$MS_{\text{tot}} = 1976.37 + 0.90 MS_{\text{épis}}$

4.2.3. Conclusion.

Les apports sur une parcelle varient fortement d'une année à l'autre, ces variations provenant :

- de la rotation elle-même (différence des apports blé et maïs)
- de l'année (ex: année 76)

(cf. fig. 5, résidus L_2)

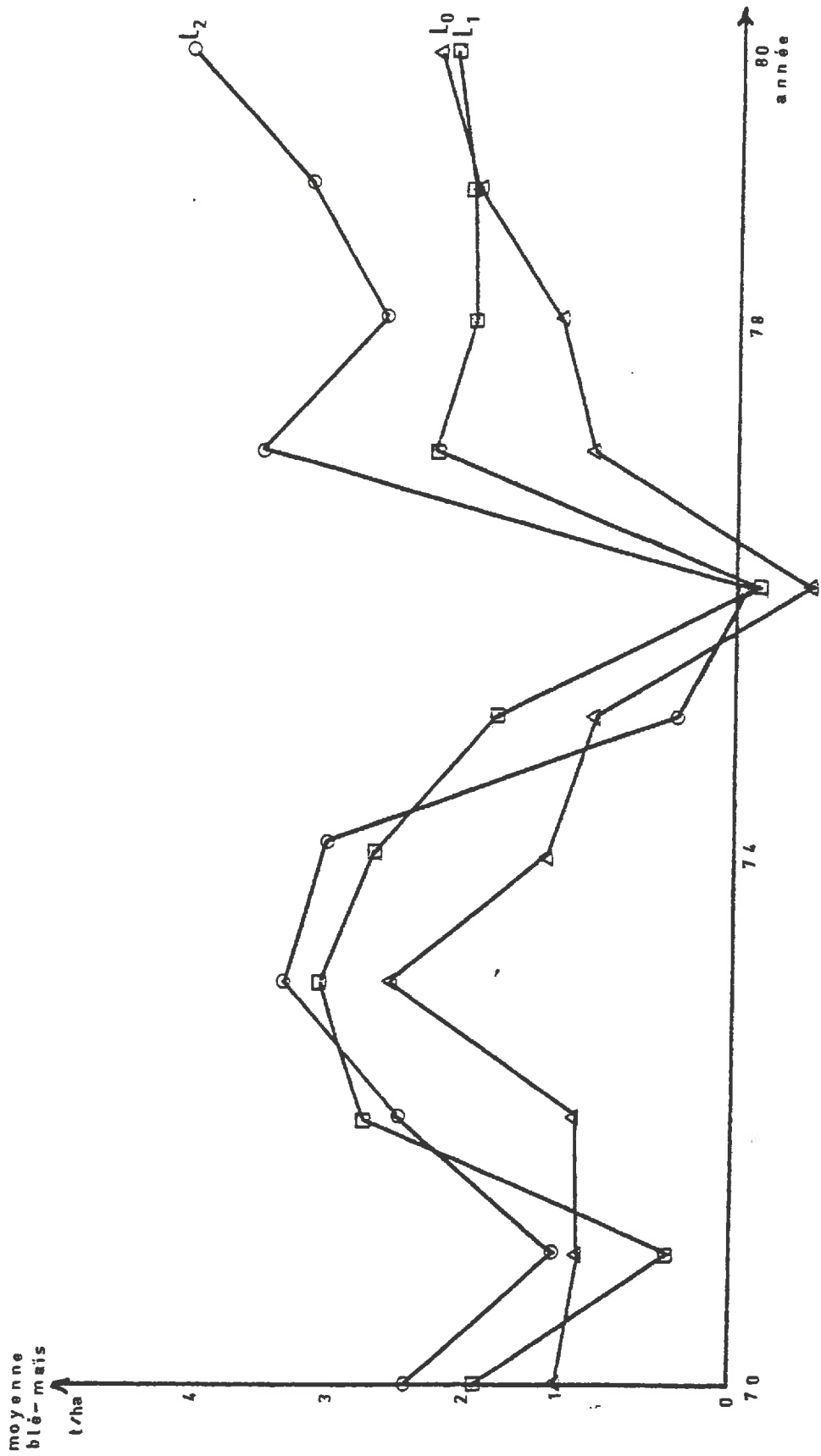
La différence des apports blé et maïs est de plus en plus marquée quand on passe de L_0 à L_2 . L'importance de ces variations de m justifie pleinement notre souci de les intégrer dans le modèle (cf. fig. 6).

4.3. PARTIES RACINAIRES.

Il n'existe pas d'estimation quantitative de la masse des parties racinaires propre à notre jeu de données. Nous ne pourrions nous fonder que sur des évaluations grossières de rapports masse racinaire/masse aérienne communément admises dans la littérature (PICARD D., 1979).

DIFFERENCES DE MASSE DES RESIDUS AERIENS DE MAIS ET DE BLE

FIG 6



Mais :

- la difficulté technique de la mesure de la masse racinaire,
 - la grande variabilité de cette donnée en fonction des espèces, des techniques culturales, etc... nous ont conduit à inclure de manière aveugle l'effet de la masse racinaire dans le k_1 estimé. Le k'_1 obtenu peut alors s'exprimer :

$$k'_1 = k_1 (1 + \lambda)$$

si $\lambda = \frac{\text{masse parties racinaires}}{\text{masse parties aériennes}}$

ou : $k'_1 = k_1 \lambda$ dans le cas de couches ne comprenant que des racines (cas de la couche 10-25 cm de L_1 par exemple).

5 - ESTIMATION DES PARAMETRES DU MODELE.

5.1. REMARQUES ET METHODES.

Il existe trois paramètres à estimer dans le modèle k_1 , k_2 et \hat{C}_0 .
 Posons :

$$y_n = C_n / (1 - k_2)^n$$

$$x_n = \left(\sum_{i=0}^{n-1} (1 - k_2)^i m_{n-i-1} \right) / (1 - k_2)^n$$

alors, la formule $C_n = C_0 (1 - k_2)^n + k_1 \sum_{i=0}^{n-1} (1 - k_2)^i m_{n-i-1}$

devient : $y_n = C_0 + k_1 x_n$

Le modèle se ramène donc à une expression linéaire à k_2 connu.

k_2 étant petit ($k_2 \ll 1$), $\text{var } y_n \approx \text{var } C_n$, on a donc choisi

$$\text{var } y_n = \sigma^2 \text{ constant}$$

Les méthodes employées sont :

- Estimation non linéaire des trois paramètres par la méthode des moindres carrés.

- Estimation non linéaire en k_2 :

à k_2 fixé, on peut calculer $\hat{k}_1(k_2)$, $\hat{C}_0(k_2)$, $SCR(k_2)$ par le modèle précédent. On choisit pour k_2 la valeur qui minimise $SCR(k_2)$.

- Estimation de k_2 dans une couche de sol où les résidus de récolte sont considérés comme négligeables :

Dans ce cas, $m = 0$ donc,

$C_n = C_0 (1 - k_2)^n$ et on estime C_0 et k_2 par régression exponentielle.

- Utilisation d'une série de valeurs de k_2 choisie arbitrairement et encadrant la valeur considérée comme la plus probable dans la région d'implantation de l'essai en fonction de ses conditions climatiques moyennes (k_2 probable = .015)

k_1 et C_0 se calculent alors :

- linéairement avec le modèle $y_n = C_0 + k_1 x_n$

- ou, si on admet la notion d'équilibre dans le cas d'une rotation, et le fait que celui-ci soit atteint, par

$$k_1 = \frac{k_2 C^*}{m}$$

C^* = masse de carbone à l'équilibre.

Le modèle proposé : $y_n = C_0 + k_1 x_n$ n'est pas un modèle linéaire dans le sens où x_n est estimé. On a donc préféré, plutôt que de calculer un \hat{k}_1 sur l'ensemble des parcelles et un ellipsoïde de confiance asymptotique sur les paramètres, calculer un k_1 par parcelle, et faire une analyse de variance sur ces k_1 .

5.2. RESULTATS.

5.2.1. Estimations de (k_2 , k_1 , C_0).

L'estimation non linéaire des trois paramètres par la méthode des moindres carrés donnant pour k_2 des intervalles de confiance de largeur 10^{11} , on a été amené à minimiser la $SCR(k_2)$ du modèle linéaire pour améliorer la convergence.

On obtient :

BLOC	I		II		III		IV	
	M	B	M	B	M	B	M	B
L_0	-0.04	0.07	-0.56	0.04	0.02	0.05	0.032	0.19
L_1	-0.05	0.04	-0.11	-0.05	0.15	0.05	0.007	0.05
L_2	-0.11	-0.03	-0.02	-0.03	-0.05	0.08	-0.13	0.00

La variance des résultats est trop importante. On ne peut estimer k_2 . De plus, on sort souvent de l'hypothèse $k_2 \ll 1$, ou $k_2 \geq 0$ ($k_2 < 0$ n'a aucun sens physique). On a donc cherché à estimer k_2 par d'autres méthodes.

5.2.2. Estimation de k_2 dans les couches où l'on considère que les résidus de récolte sont inexistant.

On a choisi de travailler sur des couches de sol n'ayant subi aucun remaniement. Dans cette hypothèse, on est amené à considérer les résidus racinaires comme négligeables. Il vient :

$$m_n = 0 \quad \text{donc} \quad C_n = C_0 (1 - k_2)^n$$

$$\text{d'où} \quad \text{Log } C_n = \text{Log } C_0 + n \text{Log } (1 - k_2)$$

qui est donc ainsi un modèle linéaire.

- dans la couche $(10 - y)$ de L_1

BLOC	I		II		III		IV	
	M	B	M	B	M	B	M	B
k_2	0.012	0.009	0.010	0.019	0.011	0.004	0.008	0.017
r^2	0.39	0.68	0.21	0.88	0.71	0.10	0.84	0.84

donc $\bar{k}_2 = 0.011$ $(\text{var } k_2)^{1/2} = 0.005$

et, si on considère toutes les parcelles comme des répétitions :

$$\hat{k}_2 = 0.011$$

$$r^2 = 0.41$$

- dans la couche (5 - y) de L_2

BLOC	I		II		III		IV	
s/s Bloc	M	B	M	B	M	B	M	B
k_2	0.010	0.018	0.003	0.006	0.008	0.011	0.015	0.016
r^2	0.35	0.77	0.03	0.26	0.45	0.58	0.64	0.88

$$\bar{k}_2 = 0.011$$

$$(\text{var } k_2)^{1/2} = 0.005$$

et, si on considère chaque parcelle comme une répétition :

$$\hat{k}_2 = 0.011$$

$$r^2 = 0.23$$

- Conclusion

On ne peut définir, au vu des résultats obtenus, une valeur précise de k_2 , mais seulement un ordre de grandeur en accord avec la valeur 0.015. Il convient cependant de remarquer la concordance des résultats obtenus en L_1 comme en L_2 dans les couches non remaniées.

La non-prise en compte des résidus racinaires induit nécessairement une sous-estimation de k_2 qui pourrait expliquer la différence entre $\hat{k}_2 = 0.011$ estimé et la valeur qu'on était en droit d'attendre ($k_2 = 0.015$).

On prendra donc par la suite $\hat{k}_2 = 0.015$ ainsi que les valeurs qui l'entourent (par pas de 0.0025). On obtient ainsi une estimation de k_1 en fonction de k_2 .

5.2.3. Estimation linéaire à k_2 fixé.

En choisissant $k_2 = .015$, et en faisant une estimation linéaire par parcelle, on trouve pour k_1 :

BLOC	I		II		III		IV		Moyenne	Variance
s/s bloc	M	B	M	B	M	B	M	B		
L_0	0.043	0.211	0.094	0.125	0.111	0.175	0.110	0.169	0.13	0.0028
L_1	0.184	0.228	0.216	0.146	0.200	0.258	0.205	0.162	0.20	0.0013
L_2	0.244	0.305	0.353	0.339	0.292	0.383	0.315	0.331	0.32	0.0012

soit Ω l'hypothèse : $-(k_1)_{L_0} \neq (k_1)_{L_1} \neq (k_1)_{L_2}$

- toutes les erreurs ont même variance

alors : $SCR_{\Omega} = 3.689 \cdot 10^{-2}$ à 21 ddl

et ω la sous-hypothèse $(k_1)_{L_0} = (k_1)_{L_1} = (k_1)_{L_2} = \bar{k}_1$

et $\bar{k}_1 = .21667$

$$SCR_{\omega} - SCR_{\Omega} = 0.14773$$

le test d'égalité est : $F = \frac{(SCR_{\omega} - SCR_{\Omega})/2}{SCR_{\Omega}/21}$

les k_1 sont distincts $F = 42 \sim F(2, 21)$

influence de k_2 sur k_1 :

moyenne de k_1 en fonction de k_2 :

k_2	0.0125	0.015	0.0175
L_0	0.105	0.13	0.15
L_1	0.17	0.20	0.225
L_2	0.29	0.32	0.35

5.2.4. Estimation à l'équilibre.

Si on admet être à l'équilibre, c'est-à-dire que les entrées compensent les sorties, alors $C = \frac{k_1}{k_2} m$ ($\Delta C = 0$). On remarque que C_n décroît en L_0 et croît en L_2 , on n'a donc pas encore atteint l'équilibre et k_1 sera surestimé en L_0 et sous-estimé en L_2 .

Pour $k_2 = 0.015$, on obtient alors :

	\bar{k}_1	var k_1
L_0	0.17	0.0014
L_1	0.20	0.0028
L_2	0.25	0.0061

5.3. ESTIMATION "PAS A PAS".

Il aurait été intéressant de suivre l'évolution des différentes valeurs de k_1 au cours de la différenciation des parcelles en fonction des trois traitements.

On peut, dans cet esprit, calculer k_1 pour deux mesures successives ($k_2 = 0.015$)

$$k_1 = \frac{C_n - C_0 (1 - k_2)^n}{\sum_{i=0}^{n-1} (1 - k_2)^i m_{n-i-1}}$$

Mais la dispersion des valeurs de masse de carbone autour de la tendance générale d'évolution dans le temps ne permet pas d'accorder à ce k_1 un sens numérique quelconque. Ce calcul permet tout au plus de retrouver les aléas climatiques et cultureux grossiers (effet gigantesque de l'année de sécheresse : 1976).

\bar{k}_1 var k_1	70-74	74-76	76-78	78-80
L_0	0.16 0.008	0.44 0.111	-0.30 0.22	0.09 0.11
L_1	0.28 0.005	0.34 0.113	-0.19 0.102	0.34 0.083
L_2	0.61 0.017	0.35 0.027	-0.23 0.03	0.53 0.028

5.4. CONCLUSION

Il est actuellement impossible d'estimer à la fois k_1 , k_2 et C_0 sur les données présentes. Deux solutions apparaissent à cette heure :

* soit disposer de données sur un grand nombre d'années pour estimer conjointement k_1 et k_2 ,

* soit il faut se donner les moyens d'estimer k_2 séparément, dans un horizon sans incorporation de résidus par exemple.

Cette dernière solution, plus économique en temps d'expérimentation, nécessite d'admettre que k_2 est invariant suivant que le sol est remanié ou non, qu'il contient ou non des matières organiques fraîches.

6 - PREVISIONS.

La masse des résidus de récolte varie suivant la culture pratiquée et son rendement. On a donc évalué des prévisions de tendance suivant $m = \text{constant}$ (monoculture ou m moyen sur une rotation) ou (m_n) cyclique d'ordre p dans le cas d'une rotation à p cultures.

6.1. m = constante.

On a alors :

$$C_n = \left(C_o - \frac{k_1 m}{k_2} \right) (1 - k_2)^n + \frac{k_1 m}{k_2}$$

- Influence des erreurs sur les estimations de C_o , k_1 , k_2

$$* \quad \frac{\partial C_n}{\partial C_o} = (1 - k_2)^n \approx 1 - n k_2$$

$$* \quad \frac{\partial C_n}{\partial k_1} = \frac{m}{k_2} \left[1 - (1 - k_2)^n \right] \approx m n \left(1 - \frac{n-1}{2} k_2 \right)$$

$$* \quad \frac{\partial C_n}{\partial k_2} = -n(1 - k_2)^{n-1} C_o - \frac{k_1 m}{k_2} \left[1 - n k_2 (1 - k_2)^{n-1} - (1 - k_2)^n \right]$$

$$\approx -n \left(1 - (n-1)k_2 \right) C_o + k_1 m n (n-1) \left(-\frac{1}{2} + \frac{1}{3}(n-2)k_2 \right)$$

Si on admet des erreurs faibles et indépendantes

$$\sigma_{C_n}^2 \approx \left(\frac{\partial C_n}{\partial C_o} \right)^2 \sigma_{C_o}^2 + \left(\frac{\partial C_n}{\partial k_1} \right)^2 \sigma_{k_1}^2 + \left(\frac{\partial C_n}{\partial k_2} \right)^2 \sigma_{k_2}^2$$

Ex : si $C_o = 35$ t

$$k_2 = 0.015$$

$$n = 10$$

$$k_1 = 0.20$$

$$m = 3.5 \text{ t de carbone}$$

x	$\frac{\partial C_n}{\partial x}$	Δx	ΔC
C_o	0.85	0.5	0.45
k_2	-400	0.005	2.00
k_1	32.65	0.05	1.6

donc $\Delta C = 4$ t, soit environ 11 %

Remarque : En prenant des Δx très importants (surtout pour k_1 et k_2), on a largement maximisé les erreurs possibles.

Deux facteurs diminuent fortement la précision : $\frac{\partial C_n}{\partial k_1}$ et $\frac{\partial C_n}{\partial k_2}$ linéaires en n au premier ordre. Ces erreurs dues à k_1 et k_2 étant respectivement $m \cdot n \cdot k_1$ et $C_0 \cdot n \cdot k_2$, il est nécessaire d'avoir sur k_1 et k_2 une précision d'autant meilleure que l'on cherche à prévoir à long terme.

- Influence d'une erreur de prévision sur m :

$$\frac{\partial C_n}{\partial m} = \frac{k_1}{k_2} (1 - (1 - k_2)^n) \approx n k_1$$

dans le cas précédent, avec $\Delta m = 0.5$ t, l'erreur sera alors de 2.5 t soit environ 7 %.

6.2. CAS D'UNE ROTATION D'ORDRE p .

Si $n = a p + b$ $0 \leq b < p$

$$C_n = (1 - k_2)^n C_0 + k_1 x_n$$

$$\text{avec } x_n = \frac{(1 - k_2)^b}{1 - (1 - k_2)^p} \left[1 - (1 - k_2)^a \right] \sum_{i=0}^{p-1} (1 - k_2)^i m_{p-i-1} \\ + \sum_{i=0}^{b-1} (1 - k_2)^i m_{b-i-1}$$

d'où :

$$\frac{\partial C_n}{\partial C_0} \approx 1$$

$$\frac{\partial C_n}{\partial k_1} \approx a \left(\sum_{i=0}^{p-1} m_i \right) + \sum_{i=0}^{b-1} m_i = m_0 + \dots + m_n$$

$$\frac{\partial C_n}{\partial k_2} \approx -n C_0 + k_1 \left[(ab + \frac{a(a-1)}{2}) \sum_{i=0}^{p-1} m_i + a \sum_{i=0}^{p-1} i m_{p-i-1} + \sum_{i=0}^{b-1} i m_{b-i-1} \right]$$

Erreurs dues aux m_i :

Pour des m_i très différents, cette différence moyenne, mise en 6.1. sur le compte de la variabilité de m , est là prise en compte

$$\frac{\partial C_n}{\partial m_i} = k_1 (\alpha + 1 [0, b-1] (i))$$

6.3. APPLICATION à BOIGNEVILLE.

Remarque : Toutes les valeurs données à l'équilibre ne représentent en rien la réalité. Elles ne sont fournies qu'à titre indicatif, pour illustrer la lenteur du phénomène (voir ΔC en L_2 alors qu'on est encore loin de l'équilibre). Elles sont en effet extrêmement sensibles à une erreur sur k_2 (à k_1 fixé, si k_2 croît de 0.01 à 0.02, C^* à l'équilibre est divisé par 2).

6.3.1. Prévisions sur les parcelles L.

On a choisi $n = 10$ ou 20

Les apports blé et maïs sont estimés par leur moyenne sur les années 1970 à 1980, parcelle par parcelle.

On a une rotation d'ordre 2, d'où :

$$C_{1990} = C_{1980} (1 - k_2)^{10} + \frac{k_1 (1 - (1 - k_2)^5)}{(1 - (1 - k_2)^2)} (m_1 + (1 - k_2) m_0)$$

- Traitement L_0

$$k_2 = 0.015 \quad k_1 = 0.13$$

BLOC	I		II		III		IV	
	M	B	M	B	M	B	M	B
C ₁₉₈₀	34.19	35.60	33.13	35.25	34.54	36.31	33.49	37.19
m ₀	3.30	3.69	2.91	3.66	3.12	3.88	3.33	3.70
m ₁	4.33	3.36	3.92	3.37	4.03	3.39	4.27	3.34
C ₁₉₉₀	34.04	34.89	32.64	34.50	37.05	35.63	33.42	36.25
C ₂₀₀₀	33.90	34.28	32.22	34.00	33.62	35.05	33.35	35.44

Pour $n = 10$:

$$\frac{\partial C_n}{\partial C_0} = 0.85$$

$$\frac{\partial C_n}{\partial k_1} = 40$$

$$\frac{\partial C_n}{\partial k_2} = -320$$

$$\frac{\partial C_n}{\partial m_i} = 0.65$$

si on admet :

$$\Delta C_0 = 0.5 \text{ t}$$

$$\Delta k_1 = 0.02$$

$$\Delta k_2 = 0.0025$$

$$\Delta m_i \approx 0.3 \text{ t}$$

alors $\Delta C = 2.5 \text{ t}$

Moyennes prévues	en 1990	en 2000
Parcelles Maïs	= 33.53 t/ha	= 33.27 t/ha
Parcelles Blé	= 35.34 t/ha	= 34.69 t/ha
Toutes parcelles confondues	= 34.44 t/ha	= 33.98 t/ha

Valeur d'"équilibre" : $\frac{k_1 \bar{m}}{k_2} = 31.19 \text{ t/ha}$

- Traitement L₁ :

$$k_2 = 0.015$$

$$k_1 = 0.20$$

On prend les mêmes Δx .

BLOC	I		II		III		IV	
s/s bloc	M	B	M	B	M	B	M	B
C ₁₉₈₀	37.89	38.23	38.62	37.93	37.29	36.12	36.08	37.35
m ₀	3.07	4.15	3.00	4.11	2.93	3.89	2.97	3.59
m ₁	4.13	3.28	3.89	3.36	4.12	2.99	4.29	2.93
C ₁₉₉₀	39.32	39.81	39.65	39.59	38.66	37.48	37.82	38.20
C ₂₀₀₀	40.54	41.17	40.54	41.02	39.84	38.65	39.31	38.94

pour n : 10,

$$\frac{\partial C_n}{\partial C_0} = 0.85$$

$$\frac{\partial C_n}{\partial k_1} = 35$$

$$\frac{\partial C_n}{\partial k_2} = -360$$

$$\frac{\partial C_n}{\partial m_i} = 1$$

d'où $\Delta C = 2,6 \text{ t}$

Moyennes prévues	en 1990	=	en 2000
Parcelles Maïs	C = 38.86 t/ha	=	40.06 t/ha
Parcelles Blé	C = 38.77 t/ha	=	39.94 t/ha
Toutes parcelles confondues	C = 38.82 t/ha	=	40.00 t/ha

$$\text{Valeur à l'«équilibre» : } \frac{k_1 \bar{m}}{k_2} = 47.25 \text{ t/ha}$$

- Traitement L_2 :

$$k_2 = 0.015$$

$$k_1 = 0.32$$

On prend les mêmes Δx

BLOC	I		II		III		IV	
	M	B	M	B	M	B	M	B
C_{1980}	40.40	38.80	42.62	42.31	41.58	43.20	42.77	43.07
m_0	2.73	4.05	2.75	3.96	2.35	3.57	2.53	3.56
m_1	4.18	2.89	3.95	2.95	4.04	2.86	4.38	3.07
C_{1990}	45.09	43.73	46.68	46.70	45.33	46.75	47.13	46.94
C_{2000}	49.12	47.96	50.17	50.48	48.55	49.81	50.88	50.27

pour $n = 10$,

$$\frac{\partial C_n}{\partial C_0} = 0.85$$

$$\frac{\partial C_n}{\partial k_1} = 35$$

$$\frac{\partial C_n}{\partial k_2} = -410$$

$$\frac{\partial C_n}{\partial m_i} = 1,6$$

d'où $\Delta C = 3,10$ t/ha

Moyennes prévues	en 1990	en 2000
Parcelles Maïs	$C = 46.06$ t/ha	$= 49.68$ t/ha
Parcelles Blé	$C = 46.03$ t/ha	$= 49.63$ t/ha
Toutes parcelles confondues	$C = 46.04$ t/ha	$= 49.66$ t/ha

$$\text{Valeur d'\"{e}quilibre} = \frac{k_1 \bar{m}}{k_2} = 71.73 \text{ t/ha}$$

6.3.2. Prévisions sur les parcelles L'

Il existe en travail superficiel et en non travail des parcelles L' ayant subi le même traitement que les parcelles L, et pour lesquelles on envisage la suppression des pailles. On ne dispose pas des mesures sur ces parcelles, c'est pourquoi on prendra les moyennes sur les parcelles L. La suppression est ici envisagée dès 1980.

On rappelle que les k_1 calculés précédemment étaient des k_1 apparents :

$$k_1^{\text{cal}} = k_1^{\text{vrai}} (1 + \lambda) \text{ si } \lambda = \frac{\text{masse racines}}{\text{masse parties aériennes}}$$

Si on laisse sur le terrain une proportion μ de chaume :

$$\mu = \frac{\text{masse chaume}}{\text{masse parties aériennes}}$$

On peut :

- soit calculer k_1^{vrai} et $m = \text{masse chaume} + \text{masse racines}$,
- soit calculer un nouveau k_1 apparent.

On a choisi la deuxième solution pour des raisons pratiques :

$$k_1' = k_1^{\text{cal}} \frac{(\lambda + \mu)}{1 + \lambda}$$

$$\text{Si } \lambda = 0.4$$

$$\mu = 0.15$$

Traitement	L_0		L_1		L_2	
	M	B	M	B	M	B
C_{1980}	33.84	36.09	37.47	37.41	41.84	41.85
m_0	3.16	3.73	2.99	3.94	2.59	3.78
m_1	4.14	3.37	4.11	3.14	4.14	2.94
C_{1990}	30.53	32.42	34.34	34.28	39.22	39.21
C_{2000}	27.68	29.26	31.65	31.58	36.96	36.95

Valeur d'"équilibre"

en L_0	$C^* = 12.25$ t/ha
L_1	$C^* = 18.56$ t/ha
L_2	$C^* = 28.18$ t/ha

6.4. ERREURS DUES AUX FLUCTUATIONS ANNUELLES.

Aux erreurs précédentes doivent être ajoutées les fluctuations annuelles de C d'environ :

1 t en L_0 et L_1
1,5 t en L_2

estimées d'après la SCR du modèle linéaire. Il faut remarquer l'erreur plus importante en L_2 , due principalement à une surestimation par le modèle de C en 1970 (à mettre en parallèle avec la conclusion du § 5).

Toutes nos données ayant servi à estimer les paramètres du modèle, il nous a été impossible d'en tester la valeur prévisionnelle. Il faut donc attendre les données suivantes, 82 et après, pour pouvoir la juger.

7 - ADAPTATION DU MODELE A LA SIMULATION.

7.1. LIMITE DU MODELE FONDE SUR UN BILAN GLOBAL.

La conception d'un modèle en bilan sur une même masse de sol était particulièrement adaptée à la stricte comparaison des trois traitements L_0 , L_1 , L_2 .

Les k_1 évalués précédemment montrent sans ambiguïté le rôle du remaniement et/ou de la dilution de la M.O fraîche sur sa vitesse d'évolution.

Mais ces k_1 évalués sur une même masse de sol, et englobant d'une manière aveugle les restitutions racinaires, sont trop globaux pour être utilisés dans la simulation de la conduite des restitutions : exportation des pailles ou variation des profondeurs de travail.

7.2. BILAN PAR HORIZON HOMOGENE.

Il faudrait pouvoir définir des K_1 relatifs à des couches considérées comme homogènes. Ainsi par exemple, on peut définir un K_1 pour chacune des trois couches suivantes :

- La litière définie par les résidus aériens laissés en surface,
- Un horizon travaillé caractérisé par son brassage et par la présence de résidus aussi bien racinaires qu'aériens, la dilution des apports étant maîtrisée par la profondeur de travail,
- Un horizon non travaillé où les apports sont limités aux résidus racinaires.

Ceci suppose une connaissance de la masse des résidus racinaires (soit pratiquement la connaissance du λ défini au § 4.3) par couche homogène.

7.3. EQUATIONS POUR LES TRAITEMENTS L_0 , L_1 , L_2 .

- Hypothèses générales :

- * L'horizon travaillé en L_0 est ramené à une seule couche homogène,
- * L_1 est constitué de deux couches homogènes : la couche travaillée (rotavator) et la couche sous-jacente,
- * L_2 est constitué de la litière et d'un horizon non travaillé,
- * k_2 est supposé constant dans les trois traitements et dans les couches dites homogènes.

Le modèle d'HENIN-DUPUIS peut s'écrire en teneur sous la forme suivante :

$$\Delta C'_n = K_1 \frac{d m_n}{dM} - k_2 C'_n$$

où : C'_n : taux de carbone dans le sol

k_1 : coef. de transformation des résidus en M.O pour une masse élémentaire de sol considérée comme homogène

k_2 : coef. de minéralisation

m_n : masse des résidus (aériens + racinaires) de l'année n

M : masse de sol

ainsi, pour un horizon homogène :

$$\begin{aligned}\Delta C_n &= K_1 \left(\frac{d m_n}{d M} \right) M - k_2 C_n \\ &= K_1 m_n - k_2 C_n\end{aligned}$$

Dans la litière, il s'écrit :

$$\Delta \left(\frac{d C_n^s}{d s} \right) = K_1^s \left(\frac{d m_n^s}{d s} \right) - k_2 \left(\frac{d C_n^s}{d s} \right)$$

où m_n^s représente la masse des résidus aériens répartis en surface.

en admettant une répartition homogène des résidus sur la litière, il vient :

$$\Delta C_n^s = K_1^s m_n^s - k_2 C_n^s$$

Dans le cadre de l'essai :

pour une couche de 3525 t de terre par ha,

si m_{an} = masse des résidus aériens l'année n :

$$\begin{aligned}\text{- en } L_0 : \Delta C_n &= K_1(L_0) m_n - k_2 C_n \\ &= K_1(L_0) (1 + \lambda) m_{an} - k_2 C_n \\ &= k_1(L_0) m_{an} - k_2 C_n\end{aligned}$$

$$\text{ainsi : } k_1(L_0) = K_1(L_0) (1 + \lambda)$$

$$\text{- en } L_1 : \Delta C_n = \Delta C_n^1 + \Delta C_n^2$$

si l'indice supérieur i indique l'appartenance à la couche i .

$i = 1$: couche travaillée

$i = 2$: couche sous-jacente non remaniée

$$\Delta C_n^i = K_1^i(L_1) m_n^i - k_2 C_n^i$$

$$\text{d'où : } \Delta C_n = (K_1^1(L_1)(1 + \lambda^1) + (K_1^2(L_1)\lambda^2)) m_{an} - k_2 C_n$$

$$\text{ainsi : } k_1(L_1) = K_1^1(L_1)(1 + \lambda^1) + K_1^2(L_1)\lambda^2$$

$$k_1^1(L_1) = K_1^1(L_1)(1 + \lambda^1)$$

$$- \text{ en } L_2 : \Delta C_n = \Delta C_n^s + \Delta C_n^2$$

$$\text{d'où } \Delta C_n = (K_1^s(L_2) + K_1^2(L_2)\lambda) m_{an} - k_2 C_n$$

$$\text{ainsi } k_1(L_2) = K_1^s(L_2) + K_1^2(L_2)\lambda$$

Application numérique.

Hypothèse :

$$\lambda^1 = \lambda^2 = 0.2$$

$$\lambda = 0.4$$

c'est-à-dire répartition équivalente des racines dans les horizons,

$$\text{et } = \frac{\text{masse racines}}{\text{masse parties aériennes}} = 0.4$$

pour la couche correspondant à 3525 t/ha de terre

$$K_1^2(L_1) = K_1^2(L_2)$$

$$k_1(L_0) = 0.13$$

$$k_1(L_1) = 0.20$$

$$k_1^1(L_1) = 0.18 \text{ (en utilisant le modèle en bilan sur la couche travaillée)}$$

$$k_1(L_2) = 0.32$$

d'où :

$$K_1(L_0) = 0.09$$

$$K_1^1(L_1) = 0.15$$

$$K_1^1(L_1) = K_1^2(L_2) = \frac{0.02}{0.2} = 0.1 \text{ (d'une grande incertitude)}$$

$$K_1^s(L_2) = 0.28$$

7.4. A L'EQUILIBRE.

* Avec restitution des pailles, sous les hypothèses précédentes, on atteint à l'équilibre les taux :

$$\text{en } L_0 : C' = \left(\frac{k_1^m}{k_2}\right) \frac{1}{M} = 0.8 \% \text{ (} C^* = 31.196 \text{)}$$

$$\text{en } L_1 : \text{ première couche : } C' = \left(\frac{K_1(L_1)(1 + \lambda^1) m_a}{k_2} \right) \frac{1}{M_1} = 3.1 \% \\ (C^* = 42.54 \text{ t/ha})$$

$$\text{deuxième couche : } C' = \left(\frac{K_1^2(L_1)\lambda^2 m_a}{k_2} \right) \frac{1}{M_2} = 0.25 \% \\ (C^* = 4.73 \text{ t/ha})$$

- or, en 1980, nous avons des taux de :

$$\text{- première couche : } C' = 1.3 \%$$

$$\text{- deuxième couche : } C' = 0.9 \%$$

on a donc un sens de variation différent dans les deux couches, chose qui était masquée par le k_1 global. On doit donc aboutir à une différenciation de plus en plus marquée du profil dans le temps.

$$\text{en } L_2 : \text{ dans le sol, } C' = \left(\frac{K_1^2(L_2)\lambda m_a}{k_2} \right) \frac{1}{M} = 0.25 \% \quad (C^* = 8.97 \text{ t/ha})$$

$$\text{en surface } C = \frac{K_1^S}{k_2} m_a = 62.77 \text{ t/ha}$$

* avec exportation de 85 % des pailles, si on admet en première approche que $K_1^S(L_2)$ reste le même, on trouve à l'équilibre :

$$\text{dans le sol : } C' = 0.25 \%$$

$$\text{en surface : } C = 9.42 \text{ t/ha}$$

correspondant à une masse de carbone à l'équilibre dans l'ensemble de $C^* = 18.38 \text{ t/ha}$ alors que le modèle en bilan donnait au § 6 :

$$C^* = 28.18 \text{ t/ha}$$

7.5. RESTRICTIONS ET CONCLUSIONS.

Ces valeurs doivent être observées avec toute la rigueur qui s'impose :

✦ la notion d'équilibre reste contestable en elle-même,

* la valeur à l'équilibre C dépend énormément de k_2

(cf. § 6.3)

- dans le cas de L_2 (et à un degré moindre dans les autres traitements) interviennent des phénomènes de migration du carbone (vers de terre, infiltration,....)
- la litière de surface se trouve en fait incorporée à une faible couche de sol,
- on ne tient pas compte d'une protection partielle du carbone (par les argiles par exemple).

Cependant, les valeurs trouvées dans le cas de l'exportation des pailles du traitement L_2 montrent bien l'intérêt d'une meilleure adéquation du modèle à la réalité dès que l'on cherche à l'appliquer dans des conditions où il n'a pas été calé (ici : la répartition des apports n'est plus la même dès que l'on supprime les pailles).

Mais surtout, et quelque soit la façon d'envisager le problème, un des facteurs limitatifs d'utilisation de ces modèles reste la méconnaissance de l'enracinement des plantes. Seule une meilleure approche de cette question permettra une étude correcte de la répartition dans le sol du carbone dans le cas de couches non travaillées (et plus généralement sans apport aérien).

8 - CONCLUSIONS.

8.1. PARAMETRES DU MODELE.

8.1.1. Coefficient de minéralisation.

k_2 est principalement influencé par les caractéristiques climatiques du lieu (notamment la température). Nous n'avons pu estimer k_2 que dans un cas extrêmement particulier. Nous avons été obligé de supposer k_2 indépendant de la nature et de la quantité des restitutions organiques ainsi que des techniques culturales (remaniement ou non de l'horizon considéré). Si cette dernière série d'hypothèses n'est pas vérifiée, la seule solution est alors d'évaluer k_2 en même temps que k_1 , en multipliant les années de prélèvement. Une solution intermédiaire consiste à évaluer k_2 sur des parcelles nues : on peut alors juger de l'influence du remaniement du sol, mais pas de celle d'apports cycliques de résidus de récolte.

8.1.2. Coefficient de transformation en M.O.

La notion de k_1 apparent, si elle permet de se dégager du problème de l'évaluation de la masse racinaire, ne permet en fait de bonne prévision que dans la mesure où on ne change pas de système de culture. Les k_1 rencontrés dans la littérature sont pour la plupart des k_1 apparents. Leur transposition nécessite la connaissance de la masse de sol concernée ainsi que l'importance du système racinaire des cultures.

L'ensemble de nos résultats montre clairement que, pour une même origine végétale, et donc pour une même constitution biochimique, le coefficient k_1 est fortement influencé par les conditions du milieu : concentration en M.O. et/ou non-remaniement de la couche de sol sur laquelle il est estimé.

- On note une augmentation de k_1 avec la concentration dans les couches remaniées de L_0 et L_1 . Cette limitation de la biodégradation peut être due à l'existence de facteurs limitants :

- * limitation de la biodégradation par "faim d'azote" ou asphyxie,
- * blocage par production de produits toxiques pour la faune et la flore.

Cette augmentation de k_1 était déjà mentionnée par GRAFFIN (1971).

REMARQUE : Si on prend les cas extrêmes, on trouve en L_2 un $k_1 = 0.32$ et en L_0 un $k_1 = 0.13$. Par conséquent, plus la teneur en M.O. augmente (respectivement décroît) et plus k_1 croît (respectivement décroît) et plus la proportion des résidus minéralisés diminue. S'il n'y a pas influence sur k_2 (cf. § 8.1.1.) les prévisions avec exportation des pailles seront en fait des sur-évaluations.

- Le remaniement semble aussi jouer un rôle dans la décomposition des résidus. Dans des expériences in vitro (MONNIER, 1965 ; GRAFFIN, 1971) au cours desquelles un mélange paille + sol est remanié périodiquement, on assiste à des dégagements plus importants de CO_2 juste après chaque remaniement. Il y a réactivation de la dégradation à chaque fois, probablement par mise en présence du carbone, de l'azote, de l'oxygène et de la faune.

L'évolution de k_1 enregistrée lors de la différenciation des parcelles en fonction des trois traitements montre les limites de la notion d'un \bar{k}_1 moyen dans un système en pleine évolution. On peut se demander quel gain on obtiendrait pour la prévision à moyen terme en estimant entre autres k_1 comme une fonction de concentration en M.O.

8.2. CONSEQUENCES PROBABLES DE L'EXPORTATION DES PAILLES.

L'ensemble de ce travail a permis de mettre en évidence l'influence du mode d'enfouissement (essentiellement la profondeur de la couche travaillée) des résidus de récolte sur leur évolution. Celle-ci se traduit au niveau du stock de M.O prévu pour les années 1990 et 2000 en fonction des techniques de travail du sol.

En tonnes de Carbone/ha	Années	L_0	L_1	L_2
	1980	34.96	37.44	41.84
avec restitution	1990	34.44	38.82	46.04
	2000	33.98	40.00	49.66
sans restitution	1990	31.47	34.31	39.22
	2000	28.47	31.62	36.96

On remarque la relative stabilité du stock de M.O dans le cas du labour L_0 pour les vingt années à venir, la légère tendance à la baisse étant inférieure aux variations intraannuelles prévisibles. Les deux techniques de simplification de travail du sol L_1 et L_2 provoquent par contre un enrichissement significatif du stock de M.O.

Dans l'hypothèse d'une exportation systématique des résidus de récolte, on prévoit dans les trois cas une chute sensible du stock, susceptible d'entraîner des variations non négligeables au niveau des comportements physiques des couches de surface. Ainsi par exemple, dans le cas le plus marqué (L_0), le risque d'instabilité augmente si-

gnificativement en dix et vingt ans malgré la stabilité structurale intrinsèque à la fraction minérale du matériau de Boigneville (la teneur en argile varie de 20 à 25 %).

En extrapolant ces résultats à des situations de limons à haut risque d'instabilité (teneurs en argile de 12 à 15 % par exemple), de telles variations du stock de M.O entraîneraient des phénomènes de battance et de prise en masse extrêmement fréquents.

De tels résultats montrent bien l'importance qu'il y a à tester la valeur prédictive de ce modèle, d'une part en effectuant de nouvelles mesures dans les années à venir sur le dispositif de l'I.T.C.F. à Boigneville, d'autre part en tentant une généralisation de ces résultats sur des jeux de données obtenus sur d'autres dispositifs de longue durée.

La possibilité d'interpréter en terme de comportement physique du sol les prévisions d'un tel type de modèle sera accrue :

- si on fait intervenir dans le modèle des paramètres permettant, d'une manière plus analytique, une généralisation à d'autres situations, par exemple :

- effet de la teneur en argile (traduisant la relative proportionnalité entre M.O et A généralement rencontrée dans les sols cultivés)
- relation entre k_1 et la teneur en carbone du sol.

- si on remplace le compartiment trop global de "M.O totales" par deux (M.O libres, M.O liées) ou plusieurs compartiments définis par le rôle qu'ont les fractions organiques qu'ils représentent dans le comportement physique et mécanique des couches de sol de surface.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BARBIER G. et GUENNELON R., 1951 - Variation actuelle de l'humus dans des fermes sans fumier. *C.R. Ac. Agric.*, 1951, p. 119-123.
- DELPHIN J.E. et CONESSA A.Ph., 1979 - Evolution de la matière organique du sol d'un essai rotations, irrigation, restitution des pailles, dans la plaine de la Hardt, II Bilan humique. *Ann. Agro.* 30(2), p. 179-189.
- GILMOUR C.M., BROADBENT F.E. et BECK S.M., 1977 - Recycling of carbon and nitrogen through land disposal of various wastes. In *Soils for Management of Organic Water and Waste Waters. Proc. Symp. Publ. by ASA, CSSA, SSSA, Madison, Wis.*, p. 173-194.
- GRAFFIN Ph., 1971 - Etude intégrée de la décomposition d'apports organiques dans le sol. Evolution du carbone et de l'azote, liaison à la fraction minérale, modification des propriétés physiques. *Ann. Agron.* 22(6), p. 213-239.
- HENIN S. et DUPUIS M., 1945 - Essai de bilan de la matière organique du sol. *Ann. Agro.* 15, p. 17-29.
- HENIN S., MONNIER G., TURC L., 1959 - Un aspect de la dynamique des matières organiques du sol. *C.R. Acad. Sci.* 248, p. 138-
- HUNT H.W., 1977 - A simulation model for decomposition in grasslands. *Ecology* 58, p. 469-484.
- JENKINSON D.S. et RAYNER J.H., 1977 - The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. *Soil Sci.* 123, p. 298-305.
- KORTLEVEN , 1963 - Quantitative Aspekte von Humus Bildung und Humus Ablau Verts. *Landbouwk Onderz.* 9, p. 1-109.
- MONNIER G., 1965 - Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols. *Thèse Fac. des Sciences, PARIS.*

- PAL D. et BROADBENT F.E., 1975 - Kinetics of rice straw decomposition in soils. *J. Environ. Qual.* 4, p. 256-260.
- PAUL E.A. et VAN VEEN T.A., 1978 - The use of tracers to determine the dynamic nature of organic matter. *11th Congress of ISSS Symposia Papers. V(3)*, p. 61-102.
- RUSSEL J.S., 1964 - Mathematical expression of seasonal changes in soil organic matter. *Nature* 204, p. 161-162.
- SINHA M.K., SINHA D.P et SINHA H., 1977 - Organic matter transformation in soils. V. Kinetics of carbon and nitrogen mineralisation in soils amended with different organic materials. *Plant and Soil* 46, p. 579-590.
- SMITH O.L., 1979 - An analytical model of the decomposition of soil organic matter. *Soil Biol. Biochem.* 11, p. 585-606.
- STANFORD G. et SMITH S.J., 1972 - Nitrogen mineralization potentials of soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 36, p. 465-472.
- WAREMBOURG F.R. et PAUL E.A., 1973 - The use of C¹⁴O₂ canopy techniques for measuring carbon transfer through the plant-soil system. *Plant and Soil* 38, p. 331-345.

L_0 = labour (25 cm)

1) Résidus aériens (t/ha de M.O) de 1970 à 1980

BLOC	I		II		III		IV	
/s bloc	M	B	M	B	M	B	M	B
	6.51	7.83	6.51	7.83	6.51	7.83	6.51	7.83
	8.11	6.28	7.16	6.28	7.40	6.28	7.02	6.28
	7.22	7.87	5.49	6.99	6.22	9.11	8.64	8.22
	9.14	6.41	8.36	5.87	8.35	5.99	9.14	6.64
	6.68	8.20	5.76	8.15	7.61	8.38	7.85	8.67
	8.05	6.87	8.22	7.56	8.81	7.96	9.06	7.53
	5.06	4.33	4.53	4.25	4.68	4.42	4.49	3.46
	10.92	7.98	8.55	8.93	8.37	8.63	9.87	7.99
	7.96	8.83	7.24	8.52	6.80	8.62	6.92	8.26
	7.07	6.06	6.87	5.02	7.34	5.03	7.61	5.00
	6.17	7.22	5.33	8.20	5.63	8.23	5.53	7.97

2) Couche 0 - 10 cm

$\rho = 1,32 \text{ g/cm}^3$

Teneur en carbone libre (%)

1.75	1.70	1.92	1.31	1.67	1.75	1.67	1.82	1970
1.46	1.31	1.38	1.21	1.36	1.34	1.53	1.29	1974
1.01	1.46	1.85	1.66	0.99	1.62	0.96	2.52	1976
0.99	0.89	0.90	0.86	1.13	1.22	0.98	0.89	1978
0.92	0.93	0.73	0.98	0.76	0.92	0.89	0.95	1980

Teneur en carbone total (%)

11.40	9.05	10.60	10.20	10.40	10.90	10.10	10.70	1970
9.30	9.95	9.80	9.65	10.05	10.85	9.30	11.20	1974
10.27	11.90	10.25	11.39	10.23	11.82	10.25	13.14	1976
9.10	9.55	10.05	9.00	10.10	11.20	9.10	10.65	1978
9.70	10.10	9.40	10.00	9.80	10.30	9.50	10.55	1980

3) Couche 10 - 25 cm = 1,47 g/cm³

Teneur en carbone libre (%)

BLOC	I		II		III		IV		
bloc	M	B	M	B	M	B	M	B	
	1.52	1.72	1.68	1.61	1.41	1.43	1.45	1.66	1970
	1.57	1.18	1.28	1.34	1.51	1.23	1.64	1.27	1974
	1.01	0.80	0.85	0.98	0.99	1.32	0.95	0.87	1976
	1.12	1.14	1.16	1.06	1.23	1.45	0.88	0.76	1978
	0.92	0.93	0.73	0.98	0.75	0.92	0.89	0.95	1980

Teneur en carbone total (%)

	9.87	9.63	10.10	10.17	10.30	10.37	9.33	10.23	1970
	11.20	9.90	9.93	9.87	10.33	10.73	10.07	10.83	1974
	10.27	10.00	10.25	12.31	10.23	11.99	10.25	10.73	1976
	9.47	10.03	10.37	9.40	10.47	11.60	9.37	10.37	1978
	9.70	10.10	9.40	10.00	9.80	10.30	9.50	10.55	1980

L_1 = travail superficiel (rotavator à 10 cm)

1) Résidus aériens (t/ha de M.O) de 1970 à 1980

BLOC	I		II		III		IV	
bloc	M	B	M	B	M	B	M	B
	6.12	8.03	6.12	8.03	6.12	8.03	6.12	8.03
	5.85	5.87	5.31	5.87	6.70	5.87	7.55	5.87
	6.23	9.09	4.91	8.21	6.68	8.20	5.46	8.72
	8.66	6.05	8.71	5.44	9.03	5.69	8.91	5.82
	6.32	8.66	5.81	8.80	4.62	8.11	5.51	7.41
	9.82	7.67	8.60	8.56	9.26	6.12	8.89	7.02
	5.02	5.26	4.69	5.44	4.51	4.81	4.70	2.80
	10.30	8.18	9.68	8.32	9.74	7.77	10.32	6.51
	7.22	9.60	7.03	9.93	7.40	9.07	7.20	8.18
	6.66	5.03	6.63	5.43	6.49	4.49	7.21	4.11
	5.90	9.19	7.41	8.93	5.83	8.46	6.61	7.91

2) Couche travaillée 0 - x cm $\rho = 1,35 \text{ g/cm}^3$

Teneur en carbone libre (%.)

1.66	1.79	1.66	1.90	1.68	1.54	1.75	1.93	1970
2.05	1.60	1.78	2.25	1.94	1.57	2.03	1.66	1974
1.24	2.23	1.50	2.24	1.50	1.55	1.69	2.19	1976
1.52	1.58	1.43	1.75	2.29	1.49	1.83	1.54	1978
1.50	1.68	1.65	1.98	1.49	1.41	1.70	2.02	1980

Teneur en carbone total (%.)

9.90	10.70	10.10	10.85	10.45	10.05	10.00	11.55	1970
11.45	11.15	11.30	12.40	11.70	10.95	11.10	11.80	1974
11.49	16.97	13.26	14.21	12.44	13.19	12.83	13.70	1976
11.35	12.85	11.95	12.25	13.00	12.50	11.95	12.55	1978
13.00	13.50	12.90	14.00	12.80	12.90	12.55	13.70	1980

3) Couche (x - y) non remaniée

$$\rho = 1,53 \text{ g/cm}^3$$

Teneur en carbone libre (‰)

C bloc	I		II		III		IV		
	M	B	M	B	M	B	M	B	
	1.40	1.70	1.71	1.56	1.39	1.25	1.56	1.53	1970
	1.26	1.09	0.98	1.24	1.23	1.06	1.23	0.96	1974
	0.93	0.98	1.04	1.05	1.05	1.05	1.13	0.90	1976
	0.54	0.67	0.54	0.67	0.91	0.61	0.72	0.54	1978
	0.64	0.63	0.56	0.62	0.60	0.58	0.56	0.53	1980

Teneur en carbone total (‰)

9.93	9.87	9.83	10.40	9.97	8.83	9.33	10.10	1970
9.17	10.13	10.13	10.47	9.97	9.70	9.47	10.23	1974
9.17	9.96	8.78	9.69	9.10	9.66	9.21	9.21	1976
8.23	9.40	8.40	9.27	9.33	9.03	8.97	9.20	1978
9.35	9.20	9.75	8.75	9.20	8.60	8.80	8.67	1980

L₂ = semis direct

1) Résidus aériens de 1970 à 1980

LOC	I		II		III		IV	
Plot	M	B	M	B	M	B	M	B
	5.50	7.89	5.50	7.89	5.50	7.89	5.50	7.89
	7.10	5.27	6.24	5.27	6.19	5.27	6.94	5.27
	4.40	6.61	4.40	7.58	4.65	7.70	3.99	5.55
	8.47	4.22	8.40	5.05	7.60	4.19	8.20	5.82
	4.77	9.29	5.32	8.43	5.01	7.71	5.09	7.14
	8.05	7.67	8.22	8.45	8.81	8.81	9.06	7.35
	4.46	3.96	4.19	4.57	3.59	3.37	3.79	3.64
	11.33	8.21	9.81	6.58	10.61	6.46	11.98	8.22
	7.41	11.31	8.05	9.44	5.13	8.33	7.17	9.20
	6.81	3.57	6.78	4.16	7.23	3.83	7.53	4.05
	6.22	9.58	5.59	9.62	4.31	7.88	4.87	9.24

2) Teneurs en carbone (%)

Année 1970

Couches (0 - 5 - 10 - 15 - 20 - 25 cm)

Teneur en carbone libre (%)

								Couche
1.99	1.77	1.70	1.52	1.45	2.32	1.86	1.87	0- 5 cm
2.05	1.62	1.73	1.54	1.75	1.82	1.83	1.64	5-10 cm
1.99	1.66	1.78	1.55	1.70	1.70	2.37	1.72	10-15 cm
1.60	1.86	1.67	1.45	1.84	1.58	1.89	1.84	15-20 cm
1.83	1.54	1.30	1.10	1.58	1.29	1.62	1.47	20-25 cm

Teneur en carbone total (%)

10.30	8.40	10.30	10.10	10.70	11.40	10.40	11.80
10.70	8.50	10.00	10.30	11.10	10.70	9.80	11.20
10.20	8.80	10.30	10.20	10.90	10.50	11.00	10.90
10.40	10.00	10.50	10.30	10.60	10.10	9.90	9.90

Année 1974

Couches (0 - 1 - 3 - 5 - 10 - 15 - 20 - 25 cm)

Teneur en carbone libre (%)

Bloc	I		II		III		IV	
	M	B	M	B	M	B	M	B
	5.34	5.48	4.44	3.76	5.38	3.45	5.24	4.33
	2.26	2.06	2.73	2.55	2.57	1.83	2.93	2.07
	1.39	1.31	1.48	1.72	1.63	1.23	1.69	1.56
	1.41	1.09	1.07	1.34	1.46	1.01	1.51	1.33
	1.34	0.85	1.05	1.30	1.20	0.92	1.39	1.22
	1.38	0.90	0.97	1.26	1.10	0.98	1.35	1.26
	1.14	0.79	0.95	1.13	1.11	0.89	1.11	1.07

Teneur en carbone total (%)

16.90	19.70	18.50	17.00	21.00	16.20	18.30	18.30
13.00	13.10	13.20	13.90	13.90	12.10	14.00	13.40
10.60	11.00	10.90	11.40	11.70	11.00	11.40	11.50
9.30	9.80	9.90	10.30	10.60	10.70	10.50	10.90
10.10	9.60	9.90	10.10	9.90	10.40	10.20	10.80
10.10	9.60	9.90	10.00	10.10	10.50	10.40	11.90
9.10	8.90	9.40	9.20	9.60	9.49	9.10	10.00

Année 1976

Couches (0 - 1 - 3 - 5 - 10 - 15 - 20 - 25 cm)

Teneur en carbone libre (%)

4.45	6.03	5.88	6.05	3.97	5.33	4.44	5.17
1.63	2.91	1.88	2.08	2.11	1.55	2.05	2.13
1.10	1.08	0.99	1.10	1.21	1.26	1.04	1.11
0.80	0.81	0.77	0.90	0.77	0.93	0.83	1.09
1.05	0.76	0.81	1.02	0.86	0.74	0.89	1.01
0.78	0.85	0.83	1.23	0.93	0.86	0.89	0.92
0.96	0.61	0.74	0.91	0.87	0.74	0.90	0.87

Teneur en carbone total (%)

19.21	23.22	24.22	21.66	21.36	20.83	19.77	23.53
14.33	18.87	15.27	14.05	16.06	15.39	17.42	15.23
11.51	10.90	12.01	10.75	12.73	13.35	11.41	11.53
10.62	9.73	10.65	10.08	10.69	11.05	10.21	11.30
10.39	9.18	10.68	10.01	10.92	10.65	10.47	10.82
9.89	9.37	10.14	9.84	10.41	10.03	9.96	10.22

Année 1978

Couches (0 - 1 - 3 - 5 - 10 - 15 - 20 - 25 cm)

Teneur en carbone libre (‰)

LOC	I		II		III		IV	
bloc	M	B	M	B	M	B	M	B
	5.99	4.67	5.04	5.42	6.51	3.72	7.51	6.25
	1.72	2.36	2.65	2.39	2.31	2.77	2.05	3.07
	1.17	1.24	1.61	1.17	1.01	1.40	0.95	1.75
	0.87	0.66	0.82	0.80	0.94	0.86	0.77	1.12
	0.82	0.62	0.72	0.81	0.72	0.66	0.70	0.67
	0.77	0.56	0.67	0.84	0.81	0.74	0.75	0.73
	0.78	0.44	0.54	0.70	0.63	0.59	0.70	0.68

Teneur en carbone total (‰)

21.00	20.10	20.50	21.20	23.80	20.10	24.60	23.00
12.60	13.60	14.60	14.00	14.80	16.30	13.40	16.50
10.60	10.70	11.40	10.80	11.10	13.00	10.50	13.20
9.60	9.00	9.60	9.90	10.10	10.60	9.50	10.80
9.10	8.60	9.30	9.40	9.80	9.70	9.30	9.90
8.70	8.50	9.20	9.30	9.80	9.60	9.00	9.80
8.20	7.70	8.40	8.40	8.90	7.80	8.40	9.20

Année 1980

Couches (0 - 3 - 5 - 25 cm)

Teneur en carbone libre (‰)

3.30	3.57	2.61	4.26	2.43	4.27	5.50	3.29
0.93	1.49	0.83	1.55	1.52	1.06	1.40	1.34
0.52	0.63	0.66	0.72	0.64	0.67	0.64	0.78

Teneur en carbone total (‰)

18.60	17.90	18.85	20.20	17.70	21.00	22.60	18.60
10.60	12.00	11.85	13.60	13.60	12.85	13.20	13.00
9.00	8.45	9.50	9.20	9.20	9.40	9.10	9.60

3) Densités

en 1970

Couche 0-10 cm : = 1.32

Couche 10-25 cm : = 1.47

en 1974-1976-1978-1980

Couche 0- 5 cm

$C_1 < 6 \%$

$$\frac{1}{(\rho_d)_3} - \frac{1}{(\rho_d)_{7-15}} = 0.0189 C_1 - 0.0251$$

$C_1 > 6 \%$

$$\frac{1}{(\rho_d)_3} - \frac{1}{(\rho_d)_{7-15}} = 0.081$$

Couche 7-15

	I	II	III	IV
Mais Année paire	1.55	1.54	1.52	1.56
Blé Année pair	1.57	1.55	1.55	1.55