RÉSULTATS COMPLÉMENTAIRES À LA MISSION PROSE-BÉNIN

EFFECTUÉE DU 28 OCTOBRE AU 8 NOVEMBRE 1999 :

ANALYSES DU CARBONE ET DE L'AZOTE

Bernard Barthès[1], Cyril Girardin[2]

[1] IRD, BP 5045, 34032 Montpellier cedex 1, France
[2] LBI, Université P.M. Curie, T26/25-4e, case 120, 75252 Paris cedex 05, France

1. INTRODUCTION

Des analyses du carbone et de l'azote totaux, ainsi que de $\delta^{13}C$ et $\delta^{15}N$ en abondance naturelle, ont été réalisées au laboratoire de Biogéochimie Isotopique de l'Université P. & M. Curie à Paris sur les échantillons de sol prélevés lors de la mission à Cotonou effectuée du 28.10 au 8.11.1999 dans le cadre du projet PROSE-Bénin (Barthès *et al.*, 1999).

Les quatre parcelles échantillonnées représentent les quatre traitements suivants :
- T : culture pure traditionnelle de maïs, sans apport ;
- NPK : culture pure de maïs avec apport d'engrais minéral NPK ;
- M1 : association de maïs et d'une légumineuse rampante (*Mucuna pruriens* var. *utilis*) chaque année, sans apport ;
- M2 : association maïs-mucuna une année sur deux, culture pure de maïs la seconde année, sans apport (pas de mucuna semé l'année du prélèvement).

Le travail du sol est manuel et réalisé à la houe jusqu'à une dizaine de centimètres de profondeur (Azontonde *et al.*, 1993, 1998).

Les quatre parcelles échantillonnées sont longues de 30 m et larges de 8 m. Sur chaque parcelle, au milieu de la largeur (soit à 4 m des bordures latérales), trois fosses profondes de 60 cm ont été creusées respectivement à 10 m de la bordure amont de la parcelle (position notée h pour « haut »), 8 m à l'aval de la précédente (position notée m pour « milieu ») et 8 m à l'aval de celle-là, soit 4 m en amont de la bordure aval de la parcelle (position notée b pour « bas »). Les échantillons ont été prélevés au couteau sur l'ensemble de la face amont de chaque fosse à 0-10, 10-20, 20-30, 30-40 et 50-60 cm de profondeur. Des échantillons complémentaires ont été prélevés au moyen de deux sondages à la tarière à main réalisés au fond de chaque fosse à 70-80 et 90-100 cm de profondeur.

2. TENEUR EN CARBONE TOTAL

Les profils de teneur en carbone total C sont présentés à la Figure 1, l'ensemble des données figurant en Annexe 1.

2.1 Effet de la profondeur sur C

Dans l'ensemble, C décroît rapidement en surface, puis plus lentement, et devient presque constant à partir de 70-80 cm. La profondeur à partir duquel cette décroissance ralentit varie selon les parcelles : 20-30 cm pour M1 et 30-40 cm pour M2, mais 10-20 cm pour NPK et T. Bien que n'apparaissant pas toujours dans les moyennes par parcelle, un palier ou une remontée plus ou moins marquée de C en subsurface sont souvent relevés (palier sur les trois positions de M1 à 30-40, sur M2m à 30-40, sur M2b à 20-30, sur Tm à 20-30, sur Tb à 30-40 cm ; remontée à 30-40 cm sur NPK, avec des remontées sur NPKm à 20-30 et 30-40 cm, et sur NPKb à 30-40 et 50-60 cm).

2.2 Effet des traitements sur C

Les résultats moyens par parcelle montrent que l'effet des traitements sur C devient faible à partir de 20-30 cm, et négligeable à partir de 30-40 cm de profondeur. A 0-10 et 10-20 cm, C est plus élevé en M1 (11.5 et 7.3 $g.kg^{-1}$, respectivement) qu'en M2 (8.4 et 6.2 $g.kg^{-1}$), et en M2 qu'en NPK (6.7 et 3.8 $g.kg^{-1}$). La parcelle T présente un C moyen apparaissant relativement élevé à 0-10 et 10-20 cm (8.8 et 4.0 $g.kg^{-1}$), du fait d'une teneur très élevée à l'amont (Th) liée peut-être à un enrichissement très localisé en matière organique (souche décomposée ?). En faisant abstraction de Th, les valeurs de C à 0-10 et 10-20 cm sur T sont les plus faibles des quatre traitements (5.4 et 3.6 $g.kg^{-1}$). Abstraction faite de Th, l'ordre décroissant des teneurs moyennes en C à 0-10 et 10-20 cm de profondeur est donc le suivant : M1 > M2 > NPK > T. La significativité statistique de ces différences est présentée au Tableau II. Les principales différences sont celles entre M1 et T, et entre M1 et NPK, à 0-10 et 10-20 cm de profondeur.

2.3 Effet de la position sur C

L'effet de la position est sensible dans les 20 cm supérieurs du profil : à 0-10 cm de profondeur, et abstraction faite de Th, C est plus élevé en situation médiane et plus faible en position aval ; à 10-20 cm (et à 20-30 cm, quoique moins nettement), C est plus élevé à l'amont et reste plus faible à l'aval. La significativité statistique de ces différences n'a pas été évaluée. Cet effet de la position devient faible à partir de 20-30 cm, et négligeable à partir de 30-40 cm de profondeur. Par ailleurs, alors que le profil moyen amont décroît de manière continue, avec un taux de décroissance qui diminue régulièrement avec la profondeur, le profil moyen médian montre un palier à 30-40 cm, tandis que le profil moyen aval montre une légère remontée de C à 30-40 cm.

2.4 Résultats posant problème

Outre les teneurs relevées sur Th à 0-10 et 10-20 cm de profondeur, relativement élevées, d'autres résultats posent problèmes, en particulier sur NPKb à 30-40 et surtout 50-60 cm de profondeur, où C paraît également relativement élevé.

3. STOCK DE CARBONE TOTAL

Les stocks de carbone total, par tranche de sol de 10 cm d'épaisseur d'une part, cumulés d'autre part, sont présentés aux Figures 1 bis et 1 ter respectivement ; l'ensemble des données figure en Annexe 1 bis. Les calculs sont réalisés à partir des résultats de masse volumique

présentés dans le rapport de mission (Barthès *et al.*, 1999). Pour le calcul des stocks cumulés sur 0-60 cm, le stock de la couche de sol 40-50 cm (non échantillonnée) est déterminé en interpolant les valeurs calculées à 30-40 et 50-60 cm de profondeur.

3.1 Effet de la profondeur sur le stock de carbone

Le stock de carbone par couche de sol diminue depuis la surface vers la profondeur, sauf pour NPKm à 30-40 cm et surtout NPKb à 30-40 et 50-60 cm. La diminution est rapide au sommet du profil pour les trois positions de M1 et M2m de 0-10 à 20-30 cm, pour NPKm et Th de 0-10 à 10-20 cm seulement ; elle est moins rapide au sommet du profil pour NPKb et Tb de 0-10 à 20-30 cm, pour M2b et Tm de 0-10 à 10-20 cm ; la diminution du stock avec la profondeur est plus régulière sur M2h et NPKh.

L'augmentation des stocks cumulés de carbone avec la profondeur est importante sur M1 (surtout au sommet du profil) et sur M2, elle est plus limitée sur NPK et T.

3.2 Effet des traitements sur le stock de carbone

Les différences de stock de carbone par couche de sol sont relevées principalement au sommet du profil : M1 a un stock plus élevé que les autres parcelles à 0-10 cm (1.7 contre 1.1-1.2 $kg.m^{-2}.dm^{-1}$) ; à 10-20 cm, M1 a aussi un stock plus élevé que NPK et T (1.1 contre 0.65 $kg.m^{-2}.dm^{-1}$), avec une valeur intermédiaire en M2 (0.95 $kg.m^{-2}.dm^{-1}$). Les différences sont plus faibles dans les couches de sol inférieures (0.54-0.77 $kg.m^{-2}.dm^{-1}$ à 20-30 cm, 0.37-0.51 $kg.m^{-2}.dm^{-1}$ à 50-60 cm).

Les différences de stock cumulé de carbone entre parcelles tendent à augmenter avec l'épaisseur de la couche de sol considérée. De manière générale, les différences entre parcelles s'inscrivent dans l'ordre suivant : M1>M2>NPK≈T (avec NPK≤T jusqu'à 0-30, NPK=T pour 0-40 et T≤NPK pour 0-60 cm).

La significativité statistique de ces différences est présentée au Tableau II. Les principales différences significatives sont celles entre M1 et T (surtout en excluant Th 0-10 cm) et entre M1 et NPK ; M2 est peu différencié des trois autres parcelles. Sur l'ensemble du profil étudié (0-60 cm), le stock de carbone est significativement plus élevé avec mucuna annuel que sans mucuna.

3.3 Effet de la position sur le stock de carbone

La position a un effet sur le stock de carbone par couche de sol jusqu'à 20-30 cm de profondeur, avec h>m>b (h et m étant proches à 0-10 cm, que Th soit exclu ou pas), mais ces différences paraissent peu significatives ; au-dessous, les différences entre positions sont faibles. Le stock cumulé de carbone est plus faible à l'aval qu'ailleurs (c'est le cas dans les quatre parcelles, sauf sur 0-60 cm pour NPK, mais la valeur relevée pour NPKb à 50-60 cm paraît trop élevée) ; le stock cumulé de carbone est un peu plus élevé à l'amont qu'au milieu, mais cette différence ne paraît pas significative compte tenu d'écarts-types élevés. La significativité statistique des différences entre positions n'a pas été évaluée.

3.4 Résultats posant problème

Les stocks de carbone calculés pour M1h 30-40, NPKm 30-40 et surtout NPKb 30-40 et 50-60 paraissent trop élevés. C'est surtout la teneur en carbone qui paraît poser problème dans ces différents cas.

4. TENEUR EN AZOTE TOTAL

Les profils de teneur en azote total N sont présentés à la Figure 2, l'ensemble des données figurant en Annexe 1.

4.1 Effet de la profondeur sur N

Dans l'ensemble, N diminue rapidement au sommet du profil, puis plus lentement (à partir de 20-30 cm sur M1, de 10-20 cm sur M2, tandis qu'il remonte légèrement sur NPK et varie peu sur T à 20-30 et 30-40 cm), et devient presque constant à partir de 70-80 cm de profondeur. Le palier voire la remontée de N en subsurface est plus systématique que dans le cas de C : en M1, N remonte légèrement pour M1b et plus nettement pour M1h et M1m à 30-40 cm ; en M2, la remontée est nette pour M2h à 20-30 cm, mais peu marquée pour M2m à 30-40 cm et M2b à 20-30 et 30-40 cm ; pour NPK, cette remontée est peu nette pour NPKh à 10-20 cm, mais marquée pour NPKm à 20-30 et 30-40 cm, et NPKb à 30-40 cm ; pour T, elle est absente pour Th (qui présente des particularités) mais assez nette pour Tm à 20-30 cm et pour Tb à 30-40 cm.

Ce palier ou cette remontée du taux d'azote total à faible profondeur pourrait être en relation avec la porosité totale, puisque les masses volumiques moyennes par parcelle diminuent entre 10-20 et 20-30 (NPK nettement, M1 moins nettement, M2 faiblement) ou 30-40 cm (T nettement) ; l'augmentation de porosité totale s'accompagnerait d'une augmentation de N. Ce phénomène paraît lié aussi, peut-être même plus étroitement, avec l'apparition de l'horizon rouge argileux et massif (noté R sur les schémas de profils culturaux), au sommet duquel s'accumuleraient des solutions riches en azote. En revanche, ce phénomène ne paraît pas lié à la densité des racines, puisque le nombre d'impacts racinaires ne montre pas de particularité à ces profondeurs (Barthès *et al.*, 1999). Le phénomène reste toutefois largement à préciser. Des suivis humidimétriques ou tensiométriques permettraient peut-être de l'expliciter.

4.2 Effet des traitements sur N

Comme pour C, les différences de N entre parcelles sont faibles à partir de 20-30 cm de profondeur, et négligeables à partir de 30-40 cm. A 0-10 et 10-20 cm de profondeur, N est plus élevé en M1 (1.0 et 0.6 $g.kg^{-1}$, respectivement) qu'en M2 (0.7 et 0.5 $g.kg^{-1}$), et en M2 qu'en NPK (0.6 et 0.4 $g.kg^{-1}$). Comme pour C, la parcelle T présente des valeurs moyennes de N relativement élevées à 0-10 et 10-20 cm (0.7 et 0.4 $g.kg^{-1}$), du fait d'une teneur très élevée à l'amont (Th). Abstraction faite de Th, N est plus faible à 0-10 et 10-20 cm sur T (0.4 et 0.3 $g.kg^{-1}$) que sur les autres parcelles, ce qui permet de classer pour la partie supérieure du profil les quatre parcelles selon N décroissant : M1 > M2 > NPK > T. La significativité statistique de ces différences est présentée au Tableau II. La principale différence est celle entre M1 et T à 10-20 cm de profondeur.

4.3 Effet de la position sur N

L'effet de la position est sensible en surface : abstraction faite de Th, N est plus élevé à 0-10 cm en position médiane et plus faible en position aval (0.8 contre 0.5 $g.kg^{-1}$ à 0-10 cm), tandis qu'à 10-20 cm et 20-30 cm, il est souvent plus élevé à l'amont et reste plus faible à l'aval. Cet effet est un peu plus profondément marqué pour N que pour C, puisque la différence entre positions reste assez sensible à 20-30 cm, et encore perceptible à 30-40 cm (N plus faible à l'aval). Par ailleurs, N moyen diminue de manière continue à l'amont, tandis qu'il marque une légère remontée à 30-40 cm en positions médiane et aval.

4.4 Résultats posant problème

Comme pour C, N paraît relativement élevé pour Th à 0-10 et 10-20 cm, ainsi que NPKb à 30-40 et 50-60 cm.

5. RAPPORT C/N

Les profils de C/N sont présentés à la Figure 3, l'ensemble des données étant présenté dans l'Annexe 1.

5.1 Effet de la profondeur sur C/N

Dans l'ensemble, C/N décroît depuis la surface (11-13) jusqu'en profondeur (6-7). Cette décroissance est souvent plus marquée jusqu'à 30-40 cm qu'en-dessous, et devient très faible à partir de 70-80 cm. Sur M1, C/N tend toutefois à diminuer moins fortement entre 0-10 et 10-20 cm qu'entre 10-20 et 30-40 cm. Sur M2h et M2b, C/N augmente même de 0-10 à 10-20 cm de profondeur.

5.2 Effet des traitements sur C/N et discussion

M1 et M2 ont des profils moyens très voisins, sauf à 0-10 cm, où C/N est respectivement de 12 et de 11. De même, NPK et T présentent des profils moyens relativement voisins, sauf à 0-10 cm (environ 11 et 12, respectivement) et à 30-40 et 50-60 cm. Dans ces deux derniers cas, les différences sont liées à des valeurs de N qui apparaissent anormalement élevées sur NPKb ; leur exclusion dans la détermination du profil NPK moyen rapproche très fortement celui-ci du profil de T. En excluant ces deux valeurs (NPKb 30-40 et 50-60), la comparaison des profils de C/N donne M1=M2>NPK=T, sauf à 0-10 cm, caractérisé par la relation M1=T>M2=NPK. La significativité statistique de ces relations est présentée au Tableau II. La principale différence est celle entre M2 et T à 20-30 cm de profondeur.

Le fait que les profils C/N, sauf en surface, soient plus élevés sur M1 et M2 que sur NPK et T paraît contradictoire avec la richesse en azote de mucuna (légumineuse), qui devrait s'accompagner d'un C/N plus faible dans le sol sous mucuna. Il est possible que l'azote de mucuna soit minéralisé et/ou lixivié relativement plus vite que son carbone, comparativement aux autres végétaux présents dans les parcelles (maïs et adventices). Cela permettrait aussi d'expliquer pourquoi, à 0-10 cm, C/N est plus élevé sur M1 que sur M2 (où mucuna n'est semé qu'une année sur deux). Par ailleurs, la très forte décroissance de C/N sur T au sommet du profil peut être expliquée par l'érosion, importante sur cette parcelle (Barthès *et al.*, 2000) : entre le niveau le plus superficiel à C/N élevé, enrichi en matières organiques jeunes et

n'ayant pas encore été érodé, et les niveaux à C/N plus faible vers 20 ou 30 cm, le niveau à C/N intermédiaire paraît aminci, en relation avec l'érosion.

5.3 Effet de la position sur C/N

C/N tend à être plus élevé à l'aval, la différence étant particulièrement marquée sur M1 ; sur cette parcelle, N est plus faible à l'aval qu'ailleurs, ce qui n'est pas le cas pour C. Les profils de C/N amont et médian sont peu différents, ils sont même identiques sur T.

5.4 Résultats posant problème

C/N paraît anormalement élevé sur NPKb à 30-40 et surtout 50-60 cm (problème avec N), mais aussi sur M2b à 90-100 cm. Sur M2h, les C/N à 0-10 et/ou 10-20 cm paraissent peu satisfaisants.

6. $\delta^{13}C$ EN ABONDANCE NATURELLE

Les profils de $\delta^{13}C$ sont présentés à la Figure 4, les données étant présentées en Annexe 2. Dans l'ensemble, les variations de $\delta^{13}C$ sont limitées, puisque la plupart des valeurs sont comprises entre -22 et -23‰, sauf au sommet des profils sur M1 (<-23‰ jusqu'à 20-30 cm) et T (>-22‰ à 0-10 cm, et sur Tb <-23‰ jusqu'à 30-40 cm), et sur la plus grande partie de M2b (<-23‰ sauf à 30-40 cm).

6.1 Effet de la profondeur sur $\delta^{13}C$

L'évolution de $\delta^{13}C$ avec la profondeur varie selon les situations :

- sur M1, cette évolution est homogène et relativement importante pour les trois positions, avec un minimum à 10-20 cm (-24‰), une nette augmentation jusqu'à un maximum à 50-60 cm de profondeur (-22‰), puis une faible décroissance (profil en S déformé) ;
- sur M2, les variations avec la profondeur sont plus modérées ; les profils amont et aval présentent toutefois une évolution grossièrement comparable à la précédente (mais minimum à 20-30 cm pour M2b, et maxima à 30-40 cm), tandis que sur M2h, $\delta^{13}C$ diminue jusqu'à 30-40 cm, puis reste presque stable en-dessous ;
- sur NPK, les évolutions avec la profondeur sont également modérées, et varient selon la position : en position médiane, le profil se rapproche encore grossièrement de celui en « S », avec un minimum subsuperficiel (20-30 cm) et un maximum à moyenne profondeur (30-40 puis 70-80 cm), tandis que les profils amont et aval sont principalement caractérisés par un maximum vers 30 cm de profondeur ;
- sur T, l'évolution avec la profondeur est plus importante, avec un net maximum en surface (-21.5‰) puis une forte diminution jusqu'à 10-20 cm ; sur Tb, cette diminution conduit à un minimum marqué à 10-20 cm (-24‰) puis une remontée sensible ; sur Tm, elle conduit à un minimum moins marqué à 10-20 cm (-23‰) suivi de faibles variations ; sur Th, elle est suivie d'une faible diminution.

On distingue donc les quatre types de profils suivants : (i) profil en S, à minimum subsuperficiel et maximum mi-profond, avec des amplitudes relativement importantes sur M1h, M1m et M1b (environ 2‰), plus limitées sur M2h, M2b et NPKm (environ 1‰) ; (ii) profil à maximum puis minimum en surface, avec des amplitudes assez importantes (1.5 à 3‰) sur Tm et Tb ; (iii) profil en Γ ouvert, à décroissance sensible au sommet du profil puis

limitée en-dessous, avec des amplitudes modérées (<1.5‰), sur M2m et Th ; (iv) profil en cuillère (tournée vers les valeurs négatives), à maximum en subsurface, avec des amplitudes modérées (0.5 à 1‰), sur NPKh et NPKb.

Toutes parcelles et positions confondues, le profil moyen est en forme de cuillère tournée vers les valeurs positives, avec un minimum à 10-20 cm et des maxima à 0-10 et 30-40 cm de profondeur.

6.2 Effet des traitements sur $\delta^{13}C$ du sol

Les éléments suivants se dégagent de la comparaison des profils moyens de $\delta^{13}C$ entre parcelles :

- M2 et NPK ont des profils moyens voisins et assez plats, avec de faibles amplitudes : $\delta^{13}C$ y varie entre -22.5 et -23.1‰, et la différence moyenne entre les deux parcelles à une même profondeur ne dépasse pas 0.4‰ et même 0.2‰ à partir de 30-40 cm ; toutes deux marquent un léger maximum à 30-40 cm (-22.5‰) et un léger minimum en profondeur ; M2 présente également un minimum à 10-20 cm ;
- le profil moyen de T s'en distingue principalement par un maximum plus élevé en surface (-21.4‰) ; $\delta^{13}C$ marque ensuite un minimum à 10-20 cm (-23.2‰), puis reste compris entre -22.7 et -22.9‰, soit une évolution voisine de celles de NPK et surtout M2 ;
- M1 présente des différences importantes avec les autres parcelles : $\delta^{13}C$ y est plus faible jusqu'à 20-30 cm, avec un minimum moyen à 10-20 cm (-24.1‰), puis augmente pour atteindre des valeurs peu variables à partir de 30-40 cm (-22.1 à -22.6‰), supérieures à celles des autres parcelles à partir de 50-60 cm, avec un léger maximum à 50-60 cm.

Par ailleurs, les écarts-types associés à ces moyennes par parcelle sont souvent faibles, en profondeur (>50 cm) mais aussi en surface sur M1 et T, c'est-à-dire là où sont relevées des différences entre traitements. La significativité des différences entre traitements est présentée au Tableau II. Les principales différences sont celles entre M1, NPK et T à 0-10 cm, et entre M1 et NPK à 10-20 cm de profondeur.

En résumé, $\delta^{13}C$ est peu variable en moyenne sur M2 et NPK (environ -22.5 à -23‰), soit un profil plat ; il en est de même sur T, excepté un maximum en surface (environ -21.5‰), soit un profil en Γ ; sur M1, $\delta^{13}C$ est plus faible jusqu'à 20-30 cm (environ -23 à -24‰) et plus élevé à partir de 50-60 cm (environ -22 à -22.5‰), soit un profil en S. Les profils moyens par parcelle présentent un minimum à 10-20 cm, sauf NPK.

6.3 Effet de la position sur $\delta^{13}C$ du sol

Les trois profils moyens par position ont une forme comparable en cuillère (tournée vers les valeurs positives), avec un minimum à 10-20 cm, puis des valeurs relativement stables à partir de 30-40 cm, voisines de celles relevées en surface (mais à l'amont, $\delta^{13}C$ diminue à 70-80 cm). $\delta^{13}C$ est plus faible sur le profil moyen aval ; en revanche, il est plus élevé sur le profil moyen amont de 20 à 60 cm de profondeur. Ces différences paraissent toutefois peu significatives du fait des écarts-types souvent importants associés aux moyennes par position.

6.4 Discussion et relation avec la végétation

Chacun des 12 profils étant considéré individuellement, les valeurs de $\delta^{13}C$ sont assez variables en surface : de -21.3 à -23.9‰ à 0-10 cm et de -22.1 à -24.4‰ à 10-20 cm, soit une amplitude d'environ 2.5‰ dans les deux cas ; en revanche, elles sont assez constantes en

profondeur : de -22.0 à -23.2‰ à 30-100 cm. On peut donc admettre que les $\delta^{13}C$ profonds témoignent de l'histoire ancienne du sol, homogène pour l'ensemble du site (les valeurs plus élevées sur M1 semblent liées à la variabilité intrinsèque du site), tandis que les valeurs relevées au sommet du profil reflètent les conditions de l'expérimentation en cours depuis une dizaine d'années, liées en particulier au couvert végétal.

Les valeurs de $\delta^{13}C$ des adventices, ainsi que du maïs et de mucuna, sont présentées au Tableau I. La biomasse aérienne adventice a été prélevée de manière exhaustive dans des cadres carrés de 25 cm de côté, avec trois répétitions sur chaque position de chaque parcelle (Barthès *et al.*, 1999) ; $\delta^{13}C$ est analysé pour chaque répétition, puis moyenné après pondération par le poids sec (40°C) et la teneur en carbone de la végétation prélevée à chaque répétition. Pour maïs et mucuna, $\delta^{13}C$ est déterminé à partir d'échantillons des différentes parties de la plante (Lesaint, 1998).

La correspondance entre $\delta^{13}C$ de la biomasse aérienne et du sol superficiel (0-10 cm) est souvent médiocre à l'échelle d'une même position (avec trois répétitions pour les adventices et une pour le sol), sans doute parce qu'adventices et sol ne sont pas prélevés exactement au même endroit (le sol est prélevé sur une largeur d'environ 1 m ; Barthès *et al.*, 1999), et parce que $\delta^{13}C$ des adventices s'avère très variable entre prélèvements réalisés chacun sur 1/16e de m^{2}. En revanche, la correspondance entre $\delta^{13}C$ de la végétation et du sol superficiel est relativement satisfaisante à l'échelle de la parcelle (avec neuf répétitions pour les adventices et trois pour le sol).

Sur M1, $\delta^{13}C$ de la couche de sol 0-10 cm (-23.8‰) est un peu plus élevé que celui de mucuna (-24.5)‰ ; mais les restitutions au sol comprennent aussi des résidus de maïs (-11.5‰), bien qu'en quantité relativement peu importante, et sans doute quelques adventices, qui tendent à relever un peu $\delta^{13}C$ du sol superficiel. La valeur de $\delta^{13}C$ à 10-20 cm (-24.1‰) est encore plus proche de celle de mucuna, en revanche $\delta^{13}C$ diminue à partir de 30 cm ($\delta^{13}C$ >-23‰), qui est également la profondeur à partir de laquelle les teneurs en C et N cessent de diminuer fortement (*Cf.* Fig. 1 et 2). Mucuna influencerait donc la quantité et la qualité de la matière organique du sol jusqu'à 30 cm de profondeur environ. Par ailleurs, l'homogénéité des profils de $\delta^{13}C$ sur M1 reflète l'homogénéité du couvert végétal sur cette parcelle, très largement dominé par mucuna.

Sur M2, $\delta^{13}C$ de la couche 0-10 cm (-22.6‰) est sensiblement plus faible que celui des adventices (-20.3‰), mais les prélèvements ont été réalisés durant une année où mucuna n'avait pas été semé sur cette parcelle ; $\delta^{13}C$ des restitutions étant fortement marqué par mucuna une année sur deux (car mucuna tend à couvrir complètement le sol), il est logique que $\delta^{13}C$ du sol superficiel (-22.6‰) soit intermédiaire entre ceux des adventices (-20.3‰) et de mucuna (-24.5‰), les restitutions de maïs étant peu importantes. Par ailleurs, la variabilité des profils de $\delta^{13}C$, notamment en surface, reflète une certaine hétérogénéité du couvert végétal, adventice en particulier.

Sur NPK, $\delta^{13}C$ de la couche 0-10 cm (-22.8‰) et des adventices(-23.1‰) sont presque similaires. Les profils des trois positions diffèrent sensiblement, mais le profil moyen est très stable sur cette parcelle.

Sur T, $\delta^{13}C$ de la couche 0-10 cm (-21.4‰) est beaucoup plus faible que celui des adventices (-16.1‰). Mais l'érosion est importante sur cette parcelle, de l'ordre de 30 t.ha^{-1}.an^{-1} (Barthès

et al., 2000) soit une abrasion annuelle d'environ 2 mm en supposant une densité apparente de 1.5 (elle est de 1.44 en moyenne sur T à 0-10 cm ; Barthès *et al.*, 1999), mais sans doute beaucoup plus car la densité des quelques mm supérieurs du profil est largement inférieure à 1.5. Le décapage d'horizons superficiels à $\delta^{13}C$ élevé (comme la végétation) peut donc expliquer le décalage entre $\delta^{13}C$ du sol en place et des adventices. Le faible niveau des restitutions sur T (*Cf.* biomasses adventices dans Tab. I et restitutions du maïs dans Azontonde *et al.*, 1998) peut aussi expliquer une moindre influence de la végétation actuelle par rapport à la matière organique ancienne du sol sur $\delta^{13}C$ du sol ($\delta^{13}C$ de la matière organique ancienne peut être estimé à environ -23‰, d'après les valeurs relevées en profondeur). Par ailleurs, la faible variabilité de $\delta^{13}C$ à 0-10 cm semble témoigner d'une certaine homogénéité du couvert végétal, que confirme dans une certaine mesure la variabilité de $\delta^{13}C$ des adventices, relativement plus faible sur T (-13.4 à -20.9‰) que sur NPK (-17.4 à -26.6‰) et M2 (-14.9 à -24.5‰).

Remarque complémentaire, les parcelles s'ordonnent de la même manière en fonction des $\delta^{13}C$ de la végétation et de la couche de sol 0-10 cm (en tenant compte de restitutions de mucuna sur M2).

6.5 Comparaison avec les données Lesaint (1998)

Les échantillons de sol prélevés lors de la mission de début 1998 au Bénin étaient des composites, constitués à partir de trois sondages à la tarière à main situés respectivement vers l'amont, le milieu et l'aval de chacune des quatre parcelles (Barthès *et al.*, 1998). Les résultats d'analyse de $\delta^{13}C$ sur ces échantillons ont été valorisés par Lesaint (1998), et figurent en Annexe 2. Les résultats que nous avons proposés ci-dessus sont obtenus sur la base de trois prélèvements élémentaires par parcelle (amont, milieu et aval) et par profondeur, sur fosse jusqu'à 60 cm puis à la tarière en-dessous.

Sur M1, notre profil $\delta^{13}C$ moyen est proche de celui dressé par Lesaint, avec la même forme en cuillère. A chaque profondeur, les valeurs de Lesaint sont comprises entre les extrêmes que nous avons relevés ou proches de ces extrêmes (0.1‰), sauf à 90-100 cm (pour cette profondeur, elle propose une valeur supérieure de 0.3‰ à notre maximum et de 0.5‰ à notre moyenne).

Sur M2, nos profils de $\delta^{13}C$ sont assez variables ; à chaque profondeur, nos valeurs extrêmes englobent celles proposées par Lesaint, qui ne s'écartent pas de nos moyennes de plus de 0.2‰, sauf à 90-100 cm (pour cette profondeur, elle propose une valeur supérieure de 0.2‰ à notre maximum et de 0.4‰ à notre moyenne).

Sur NPK, notre profil moyen et celui de Lesaint sont très peu variables. A chaque profondeur, les valeurs qu'elle propose sont incluses entre nos extrêmes, sauf à **0-10** cm (pour cette profondeur, elle propose une valeur supérieure de 0.4‰ à notre maximum et de 0.7‰ à notre moyenne) et 90-100 cm (pour cette profondeur, elle propose une valeur supérieure de 0.3‰ à notre maximum et de 0.4‰ à notre moyenne).

Sur T, le profil proposé par Lesaint est compris entre nos valeurs extrêmes à chaque profondeur, sauf à **0-10** cm (elle y propose une valeur inférieure de 0.7‰ à notre minimum et de 0.8‰ à notre moyenne), à 50-60 cm (mêmes types d'écarts entre sa valeur et les nôtres ; mais cette valeur semblait peu satisfaisante par rapport au reste de son profil) et à 90-100 cm (elle propose une valeur inférieure de 0.4‰ à notre minimum et à notre moyenne).

En résumé, les différences entre les $\delta^{13}C$ de Lesaint et les nôtres concernent systématiquement la couche 90-100 cm : selon la parcelle, les valeurs de Lesaint sont supérieures (M1, M2, NPK) ou inférieures (T) de 0.2 à 0.4‰ à nos extrêmes et de 0.4 à 0.5‰ de nos moyennes à cette profondeur, ce est limité mais néanmoins intriguant car les variations intraparcellaires que nous observons à cette profondeur restent faibles (écarts-types ≤0.2‰) ; toutefois, dans la mesure où ce niveau du profil n'est pas le plus déterminant dans l'analyse qui est faite ici, cette divergence ne pose pas problème. Des différences moins systématiques (NPK et T seulement) mais plus importantes sont relevées à 0-10 cm : selon la parcelle, les valeurs de $\delta^{13}C$ proposées par Lesaint sont supérieures (NPK) ou inférieures (T) de 0.4 à 0.7‰ à nos extrêmes et de 0.7 à 0.8‰ à nos moyennes à cette profondeur ; ces différences peuvent peut-être s'expliquer par le fait que $\delta^{13}C$ du sol superficiel sur ces deux parcelles sans mucuna dépend fortement de la végétation adventice récente, laquelle est susceptible de varier d'une année à l'autre.

7. $\delta^{15}N$ EN ABONDANCE NATURELLE

Les profils de $\delta^{15}N$ sont présentés à la Figure 5, l'ensemble des données étant présenté en Annexe 2.

7.1 Effet de la profondeur sur $\delta^{15}N$

De manière générale, $\delta^{15}N$ augmente avec la profondeur, passant de 4-7‰ à 0-10 cm à 9-11‰ à 90-100 cm. Cet accroissement, rapide au sommet du profil, ralentit fortement à partir de 30-40 cm environ.

7.2 Effet des traitements sur $\delta^{15}N$

L'effet des traitements sur $\delta^{15}N$ est assez peu marqué, et à une même profondeur, les différences entre $\delta^{15}N$ moyens par traitement sont inférieures à 2‰ jusqu'à 10-20 cm, puis inférieures à 1‰ en-dessous. Jusqu'à 10-20 cm de profondeur, les parcelles tendent à s'ordonner selon $\delta^{15}N$ de la manière suivante : M1<M2<NPK<T ; la significativité statistique de ces différences est présentée au Tableau II. La principale différence est celle entre M1 et T au sommet du profil. Aucune hiérarchie nette n'est perceptible en-dessous de 10-20 cm.

7.3 Effet de la position sur $\delta^{15}N$

L'effet de la position est également peu marqué, puisqu'à une même profondeur, la différence entre $\delta^{15}N$ moyens par position ne dépasse pas 1‰. Toutefois, en moyenne, $\delta^{15}N$ est toujours plus élevé à l'amont (c'est notamment le cas sur M1) ; il est plus faible au milieu jusqu'à 30-40 cm (et sur l'ensemble du profil sur M1 et NPK), et à l'aval en-dessous (il est plus faible sur l'ensemble du profil aval sur M2). La significativité statistique de ces différences n'a pas été évaluée.

7.4 Résultats posant problème

Certains résultats de $\delta^{15}N$ paraissent peu cohérents avec le reste des profils, c'est notamment le cas pour M1m à 50-60 cm, M1b à 90-100 cm, M2h et surtout M2b à 70-80 cm, Th à 70-80 cm.

8. BIBLIOGRAPHIE

Azontonde A., 1993. Dégradation et restauration des terres de barre (sols ferrallitiques faiblement désaturés argilo-sableux) au Bénin. Cah. ORSTOM, sér. Pédol. 28 (2) : 217-226.

Azontonde A., Feller C., Ganry F., Rémy J.C., 1998. Le mucuna et la restauration des propriétés d'un sol ferrallitique au sud du Bénin. Agriculture et Développement 18 : 55-62.

Barthès B., Azontonde A., Boli B.Z., Prat C., Roose E., 2000. Field-scale run-off and erosion in relation to topsoil aggregate stability in three tropical regions (Benin, Cameroon, Mexico). European Journal of Soil Science 51 (3) : 1-11.

Barthès B., Blanchart E., Girardin C., Villenave C., 1999. Compte rendu et premiers résultats de la mission PROSE-Bénin effectuée du 28 octobre au 8 novembre 1999. IRD, Montpellier, 8 p.+ fig. et ann.

Barthès B., Blanchart E., Lesaint S., Oliver R., 1998. Compte rendu et premiers résultats de la mission PROSE-Bénin effectuée du 30 janvier au 11 février 1998. IRD, Montpellier, 12 p.+ fig. et ann.

Lesaint S., 1998. Effet d'une légumineuse de couverture (*Mucuna pruriens* var. *utilis*) sur le stock organique d'un sol ferrallitique (Bénin) cultivé en maïs. Etude avec le ^{13}C en abondance naturelle. Mém. DEA national de science du sol, Univ. Nancy I – INAPG – ENSAM – ENSAR, 20 p.+ fig. et tab.

Figure 1. Profils de teneur en carbone total (moyennes et écarts-types).

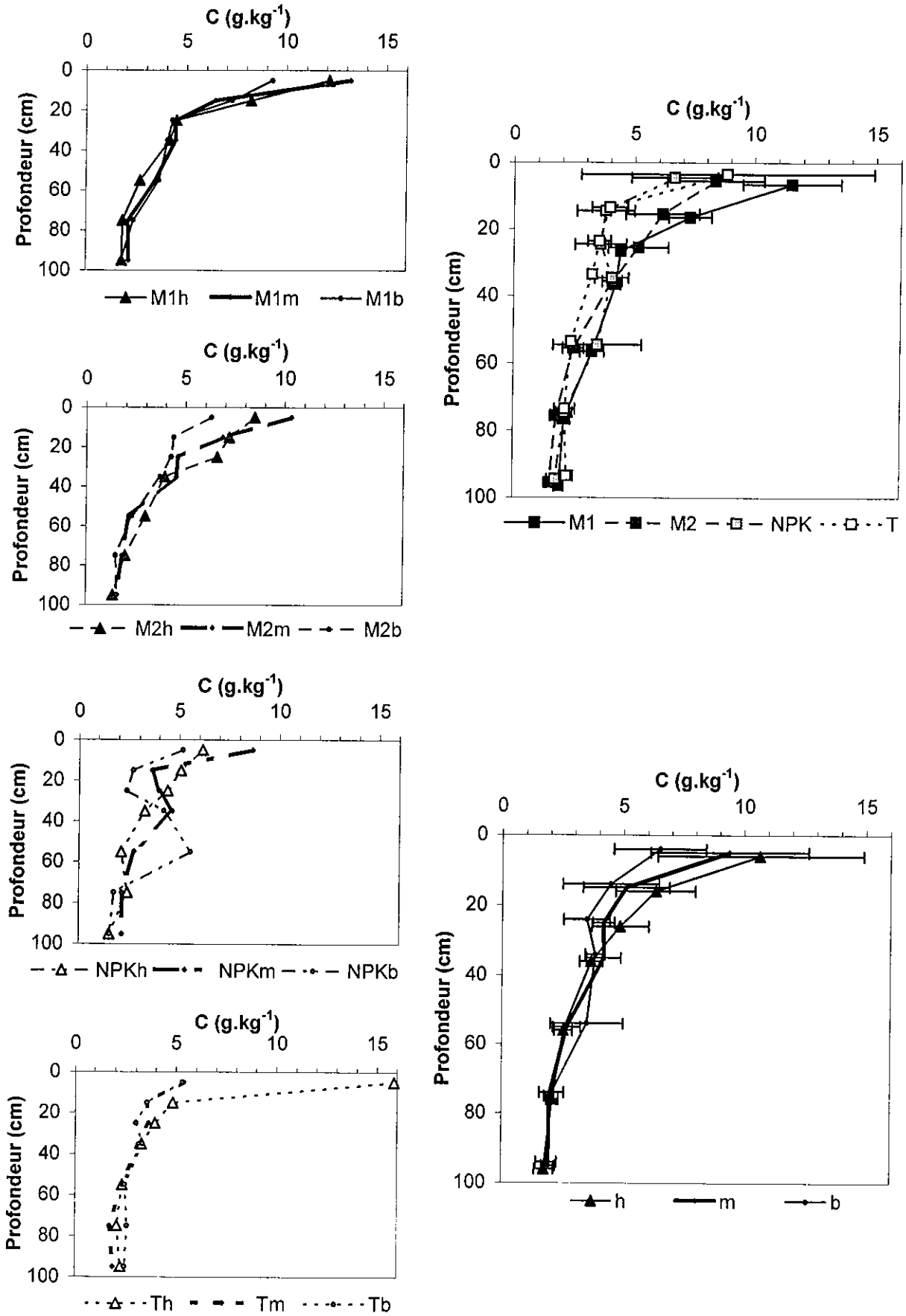

Figure 1 bis. Profils de stocks de carbone total par tranche de 10 cm de sol (moyennes et écarts-types).

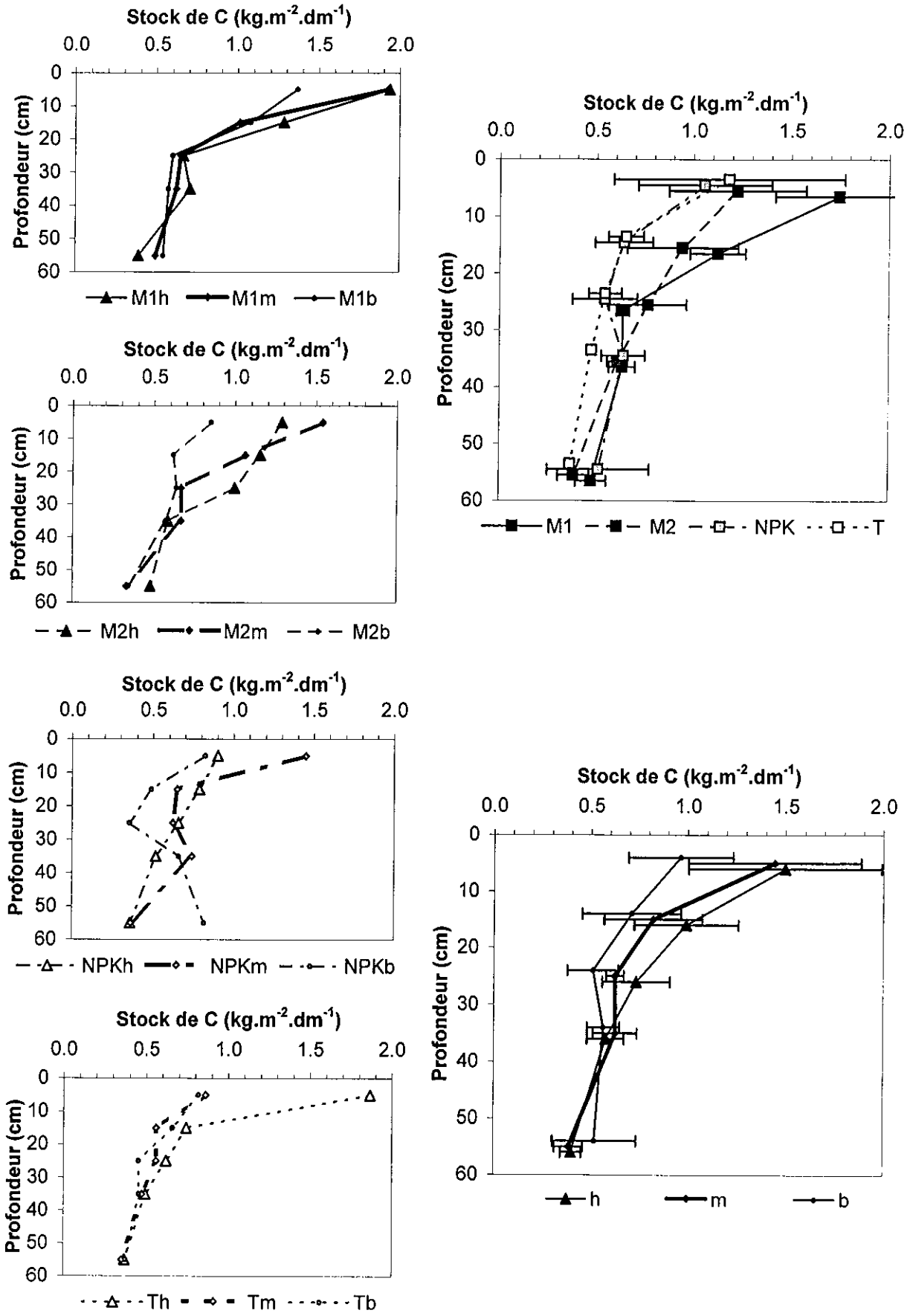

Figure 1 ter. Profils de stock cumulé de carbone (moyennes et écarts-types).

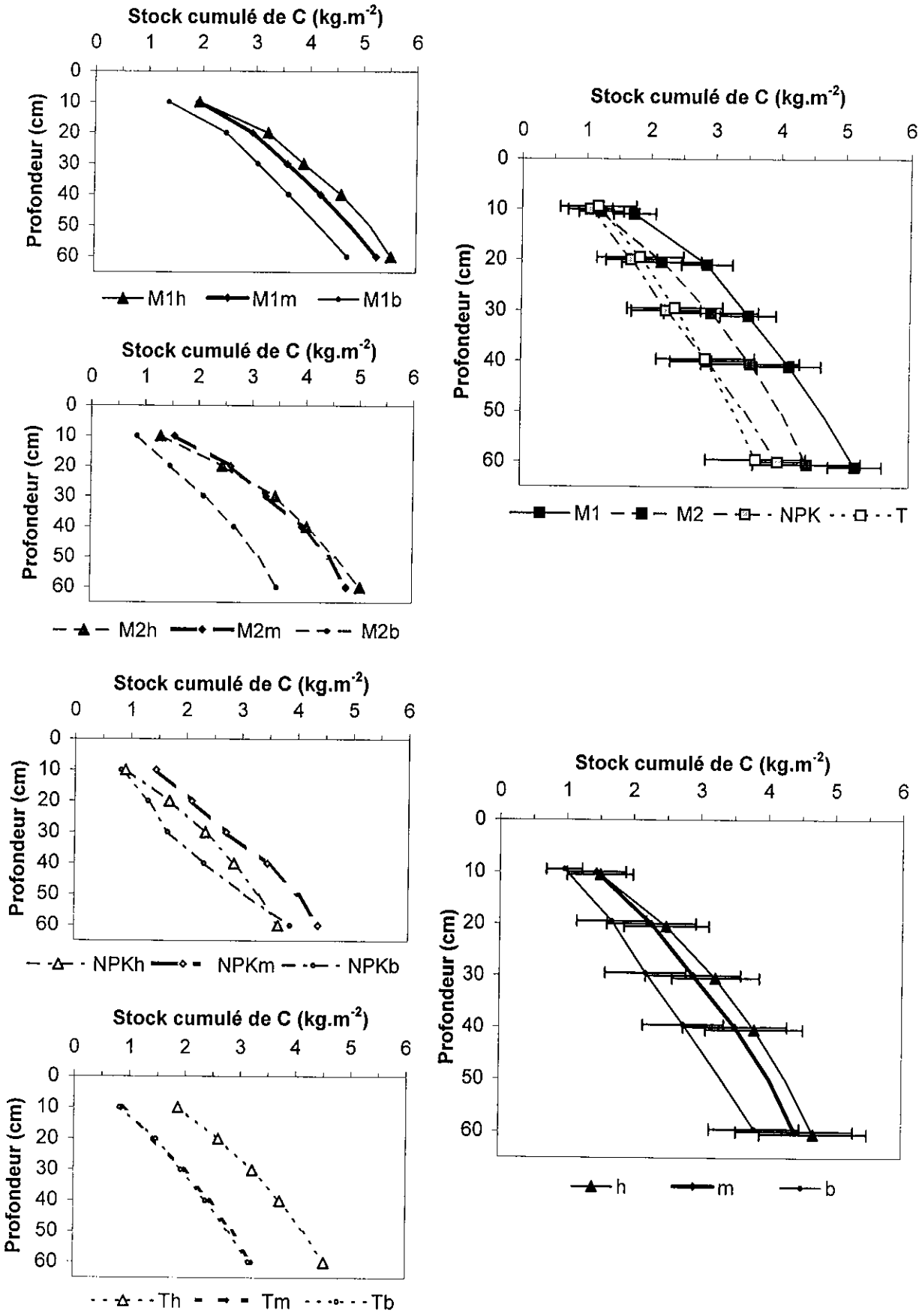

Figure 2. Profils de teneur en azote total (moyennes et écarts-types).

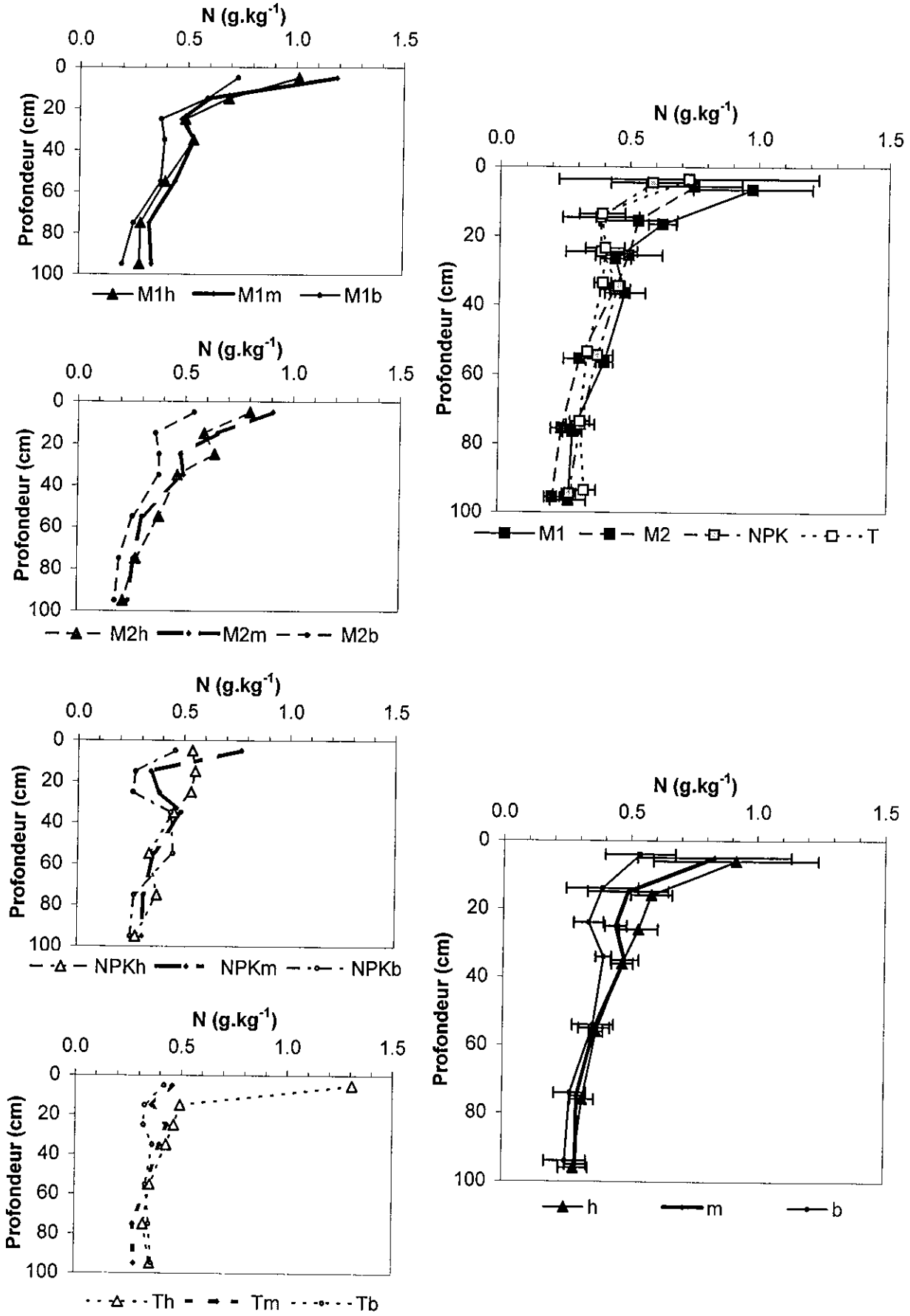

Figure 3. Profils de C:N (moyennes et écarts-types).

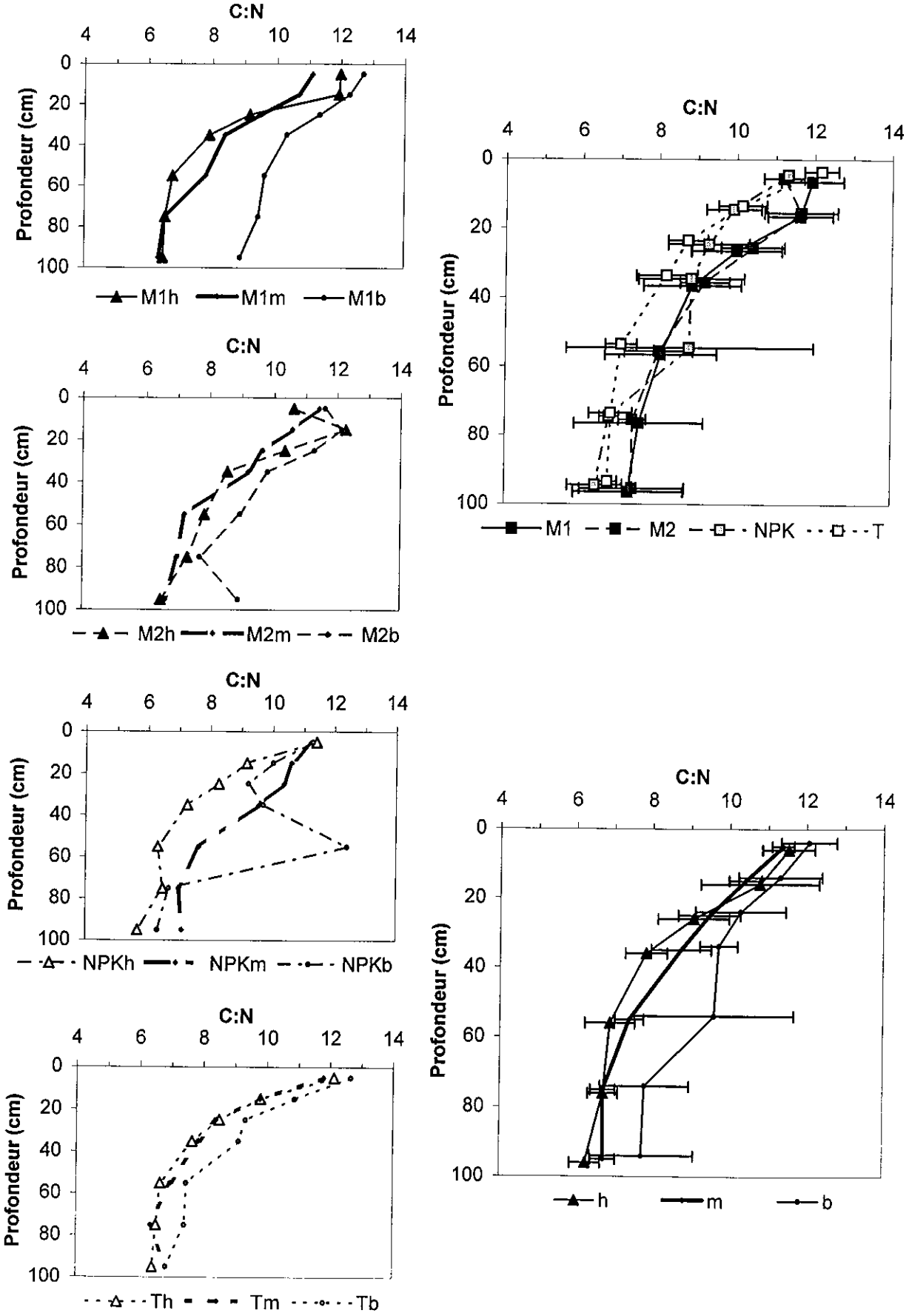

Figure 4. Profils de $\delta^{13}C$ (moyennes et écarts-types).

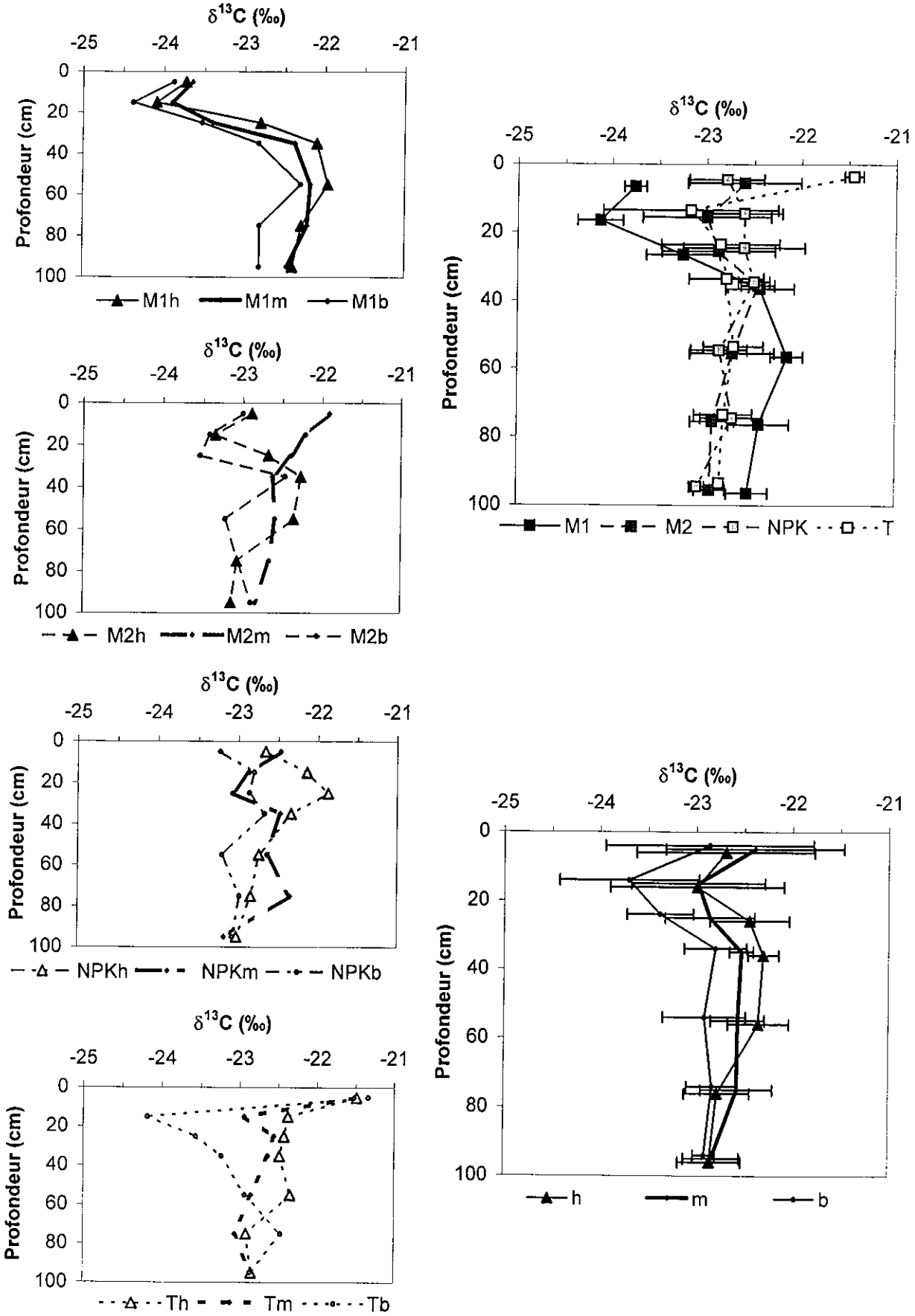

Figure 5. Profils de $\delta^{15}N$ (moyennes et écarts-types)

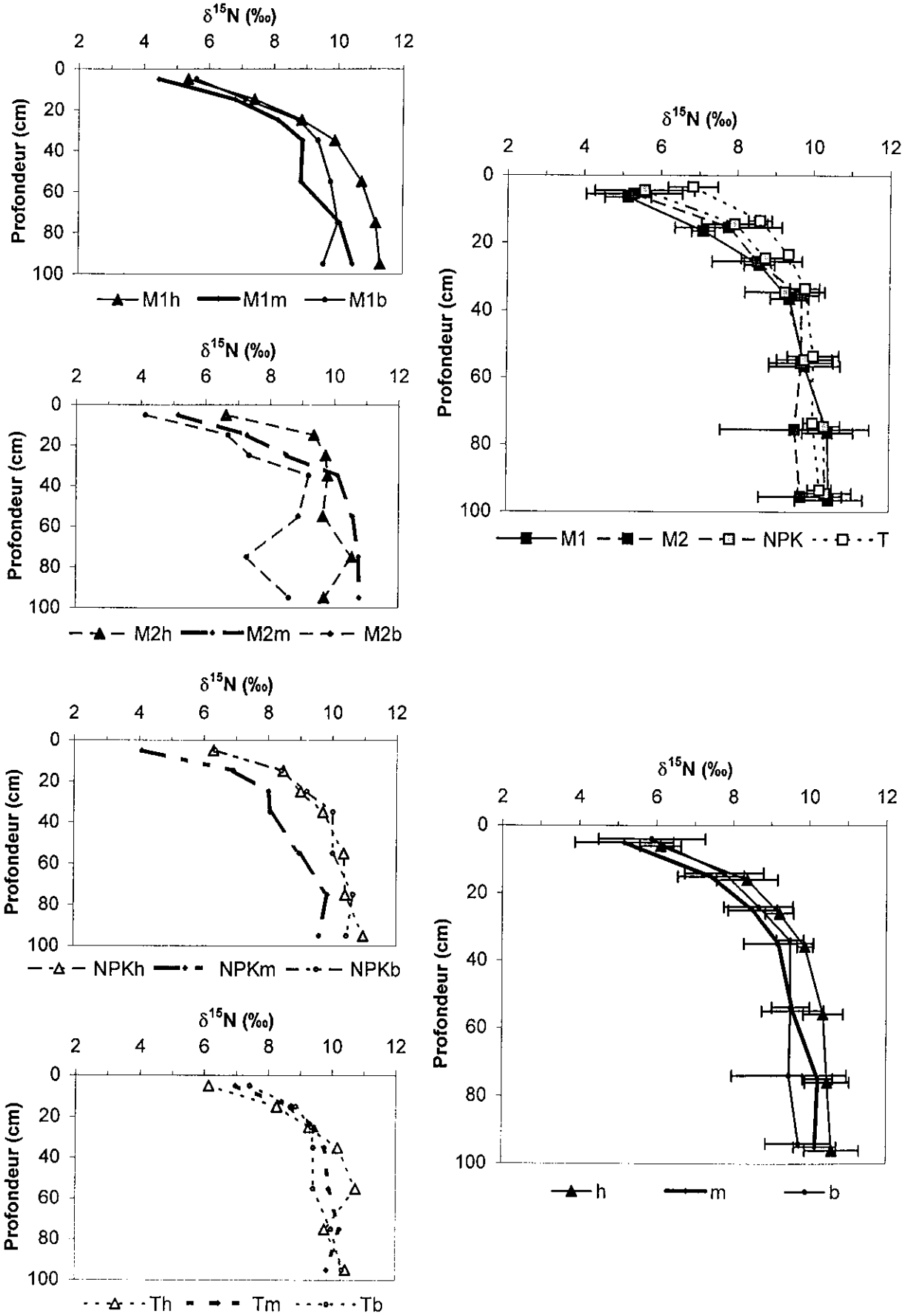

Tableau I : $\delta^{13}C$ des adventices, du maïs et du mucuna.

Adventices

Situation	Masse (g)	C ($g.kg^{-1}$)	$\delta^{13}C$ (‰)		
			par répétition	par position	par parcelle
Th1	8.70	438.1	-18.2		
Th2	4.23	409.9	-19.1		
Th3	8.01	436.5	-20.9		
Th				-19.4	
Tm1	10.70	450.1	-15.7		
Tm2	11.49	443.9	-14.5		
Tm3	7.48	446.2	-13.4		
Tm				-14.6	
Tb1	11.51	448.5	-14.2		
Tb2	7.94	445.0	-14.7		
Tb3	6.30	445.3	-17.1		
Tb				-15.0	
T					**-16.1**
NPKh1	12.23	436.8	-23.9		
NPKh2	12.60	437.5	-20.8*		
NPKh3	14.23	437.8	-22.0		
NPKh				-22.2	
NPKm1	10.00	408.2	-17.4		
NPKm2	9.45	427.4	-23.9		
NPKm3	9.66	421.0	-24.7		
NPKm				-21.9	
NPKb1	11.40	435.4	-26.6		
NPKb2	12.80	427.3	-24.9		
NPKb3	14.10	435.1	-23.6		
NPKb				-25.0	
NPK					**-23.1**
M2h1	19.12	450.7	-20.3		
M2h2	22.65	445.3	-16.2		
M2h3	15.32	449.4	-14.9		
M2h				-17.2	
M2m1	22.35	455.7	-22.8		
M2m2	16.80	456.6	-24.5		
M2m3	24.79	461.2	-20.8		
M2m				-22.5	
M2b1	12.88	452.1	-22.4		
M2b2	12.69	445.9	-19.6		
M2b3	13.38	450.0	-21.3		
M2b				-21.1	
M2	(année sans mucuna)				**-20.3**

* 6 répétitions: -20.5, -20.9, -20.9, -20.9, -20.9, -20.5

Maïs : -11.5‰ **Mucuna : -24.5‰**

Tableau II : Significativité des différences entre traitements.

Test *t* apparié de comparaison de moyennes (la topographie est supposée avoir une influence)

Prof	C	N	C:N	d13C	d15N	stock C
0-10	NPK<M2<<<M1 avec NPK<<M1	NPK<M1 et M2<<M1	pas différents	M1<NPK<T avec M1<<<T	pas différents	M2<M1 §§
10-20	T<<<M1, NPK<M1, NPK<M2	T<<<M1 et NPK<M1	pas différents	M1<NPK	pas différents	T<<<M1 et NPK<<M1
20-30	pas différents	NPK<<<M2	T<<M2	pas différents	M1<T	pas différents
30-40	T<M1	pas différents	T<M2	T<<M1	pas différents	T<M1
50-60	pas différents	pas différents	pas différents *	T<M1 et NPK<M1	pas différents	pas différents
70-80	M2<NPK	M2<NPK	pas différents	pas différents	pas différents	-
90-100	pas différents	M2<<<NPK	pas différents **	NPK<T	pas différents	-

Test *t* non apparié de comparaison de moyennes (la topographie est supposée ne pas avoir d'influence)

Prof	C	N	C:N	d13C	d15N	stock C
0-10	NPK<M1 et T<M1 §	pas différents §§	NPK<T §§§	M1<<NPK<<<T, M1<M2<T et M1<<<T	M1<T	T<M1 §
10-20	T<<<M1 et NPK<<M1	T<<M1	pas différents	M1<<<NPK	M1<<<T	T<<<M1 et NPK<<M1
20-30	T<M1	pas différents	T<M2	pas différents	M1<T	pas différents
30-40	T<<<M1 et T<M2	pas différents	pas différents	pas différents	pas différents	T<<M1 et T<<M2
50-60	T<M1	T<M1	pas différents *	NPK<M1	pas différents	pas différents
70-80	pas différents	pas différents	pas différents	pas différents	pas différents	-
90-100	M2<<T et M2<M1	M2<<T	pas différents **	NPK<<M1 et NPK<<<T	pas différents	-

Stock cumulé de carbone

Prof	test *t* apparié	test *t* non apparié
0-10	M2<M1	T<M1 §
0-20	NPK<M1	NPK<M1 et T<<M1 §
0-30	NPK<M1	NPK<M1 et T<<M1 §
0-40	NPK<M1 et T<M1 §§§	NPK<M1 et T<<M1 §
0-60	T<M1 §§§	NPK<M1 et T<<<M1 § (T<M1 §§§)

§ en écartant Th 0-10
§§ que Th 0-10 soit écarté ou pas
§§§ en conservant Th 0-10
* en écartant NPKb 50-60
** en écartant M2m 90-100

Significativité : **<<< signifie p < 0.01** **<< signifie p < 0.02** **< signifie p < 0.05** **autres cas p > 0.05**

Annexe 1. Teneurs en carbone et azote totaux, et C:N.

Carbone total ($g.kg^{-1}$)

Prof	M1h	M1m	M1b	**M1 moy**	M1 étyp
0-10	12.1	13.2	9.3	11.5	2.0
10-20	8.2	6.4	7.3**	7.3	0.9
20-30	4.5	4.5	4.3	4.4	0.1
30-40	4.2	4.5	4.1	4.2	0.2
50-60	2.7	3.4	3.6	3.3	0.5
70-80	1.9	2.1	2.4	2.1	0.3
90-100	1.8	2.1	1.8	1.9	0.2
Prof	M2h	M2m	M2b	**M2 moy**	M2 étyp
0-10	8.5	10.3	6.3	8.4	2.0
10-20	7.2	6.9	4.4	6.2	1.5
20-30	6.6	4.6	4.3	5.2	1.2
30-40	4.0	4.5	3.7	4.1	0.4
50-60	3.0	2.2	2.3	2.5	0.4
70-80	2.0	1.8	1.5	1.8	0.2
90-100	1.4	1.6	1.6	1.5	0.1
Prof	NPKh	NPKm	NPKb	**NPK moy**	NPK étyp
0-10	6.2	8.6	5.2	6.7	1.8
10-20	5.1	3.6	2.7	3.8	1.2
20-30	4.4	4.0	2.4	3.6	1.1
30-40	3.3	4.6	4.2	4.1	0.7
50-60	2.1	2.7	5.6	3.5	1.8
70-80	2.4	2.2	1.8	2.1	0.3
90-100	1.5	2.2	1.6	1.8	0.3
Prof	Th	Tm	Tb	**T moy**	T étyp
0-10	15.8	5.4	5.3	8.8	6.1
10-20	4.8*	3.5	3.6	4.0	0.7
20-30	4.0	3.6	3.0	3.5	0.5
30-40	3.3	3.1	3.3	3.2	0.1
50-60	2.4	2.3	2.5	2.4	0.1
70-80	2.1	1.7	2.6	2.1	0.4
90-100	2.3	1.9	2.5	2.2	0.3

Azote total ($g.kg^{-1}$)

M1h	M1m	M1b	**M1 moy**	M1 étyp
1.0	1.2	0.7	1.0	0.2
0.7	0.6	0.6§§	0.6	0.1
0.5	0.5	0.4	0.4	0.1
0.5	0.5	0.4	0.5	0.1
0.4	0.4	0.4	0.4	0.0
0.3	0.3	0.3	0.3	0.0
0.3	0.3	0.2	0.3	0.1
M2h	M2m	M2b	**M2 moy**	M2 étyp
0.8	0.9	0.5	0.7	0.2
0.6	0.6	0.4	0.5	0.2
0.6	0.5	0.4	0.5	0.1
0.5	0.5	0.4	0.4	0.1
0.4	0.3	0.3	0.3	0.1
0.3	0.3	0.2	0.2	0.0
0.2	0.2	0.2	0.2	0.0
NPKh	NPKm	NPKb	**NPK moy**	NPK étyp
0.5	0.8	0.5	0.6	0.2
0.6	0.3	0.3	0.4	0.1
0.5	0.4	0.3	0.4	0.1
0.5	0.5	0.4	0.5	0.0
0.3	0.4	0.4	0.4	0.1
0.4	0.3	0.3	0.3	0.1
0.3	0.3	0.2	0.3	0.0
Th	Tm	Tb	**T moy**	T étyp
1.3	0.5	0.4	0.7	0.5
0.5§	0.4	0.3	0.4	0.1
0.5	0.4	0.3	0.4	0.1
0.4	0.4	0.4	0.4	0.0
0.4	0.3	0.3	0.3	0.0
0.3	0.3	0.3	0.3	0.0
0.4	0.3	0.4	0.3	0.0

C:N

M1h	M1m	M1b	**M1 moy**	M1 étyp
12.0	11.1	12.7	11.9	0.8
11.9	10.7	12.3$$	11.6	0.8
9.2	9.5	11.3	10.0	1.2
7.9	8.4	10.3	8.9	1.3
6.8	7.8	9.6	8.1	1.4
6.5	6.5	9.4	7.5	1.7
6.5	6.3	8.9	7.2	1.4
M2h	M2m	M2b	**M2 moy**	M2 étyp
10.6	11.4	11.6	11.2	0.5
12.3	10.6	12.1	11.7	0.9
10.3	9.6	11.3	10.4	0.8
8.5	9.2	9.8	9.2	0.6
7.8	7.2	9.0	8.0	0.9
7.3	7.0	7.7	7.3	0.4
6.5	6.6	8.9	7.3	1.4
NPKh	NPKm	NPKb	**NPK moy**	NPK étyp
11.4	11.3	11.3	11.3	0.1
9.2	10.6	10.0	9.9	0.7
8.3	10.4	9.2	9.3	1.0
7.3	9.6	9.7	8.8	1.4
6.3	7.6	12.4	8.8	3.2
6.5	7.0	6.7	6.7	0.3
5.7	7.1	6.3	6.4	0.7
Th	Tm	Tb	**T moy**	T étyp
12.1	11.8	12.6	12.2	0.4
9.8$	9.8	10.9	10.1	0.6
8.5	8.4	9.3	8.7	0.5
7.6	7.8	9.1	8.2	0.8
6.6	7.0	7.5	7.0	0.4
6.5	6.3	7.4	6.8	0.6
6.4	6.8	6.8	6.7	0.2

Moyennes par position sur le site

Prof	**h moy**	h étyp	**m moy**	m étyp	**b moy**	b étyp
0-10	10.7	4.2	9.4	3.3	6.5	1.9
10-20	6.3	1.7	5.1	1.8	4.5	2.0
20-30	4.9	1.2	4.2	0.5	3.5	1.0
30-40	3.7	0.5	4.2	0.7	3.8	0.4
50-60	2.5	0.4	2.7	0.6	3.5	1.5
70-80	2.1	0.2	2.0	0.2	2.1	0.5
90-100	1.8	0.4	1.9	0.3	1.9	0.4

*2 répétitions: 4.8, 4.9; **4 répétitions: 6.7, 7.5, 7.8, 7.1

h moy	h étyp	**m moy**	m étyp	**b moy**	b étyp
0.9	0.3	0.8	0.3	0.5	0.1
0.6	0.1	0.5	0.2	0.4	0.1
0.5	0.1	0.4	0.0	0.3	0.1
0.5	0.0	0.5	0.1	0.4	0.0
0.4	0.0	0.4	0.1	0.4	0.1
0.3	0.0	0.3	0.0	0.3	0.1
0.3	0.1	0.3	0.0	0.2	0.1

§2 répétitions: 0.5, 0.5; §§4 répétitions: 0.6, 0.6, 0.6, 0.6

h moy	h étyp	**m moy**	m étyp	**b moy**	b étyp
11.5	0.7	11.4	0.3	12.1	0.7
10.8	1.5	10.4	0.4	11.3	1.1
9.1	0.9	9.5	0.8	10.3	1.2
7.8	0.5	8.7	0.8	9.7	0.5
6.9	0.7	7.4	0.4	9.6	2.1
6.7	0.4	6.7	0.3	7.8	1.2
6.2	0.4	6.7	0.3	7.7	1.4

$2 répétitions: 9.9, 9.7 $$4 répétitions: 12.1, 12.1, 12.8, 12.1

Annexe 1 bis. Stocks de carbone total.

Stock de C par tranche de 10 cm d'épaisseur ($kg.m^{-2}.dm^{-1}$)

Prof	M1h	M1m	M1b	**M1 moy**	M1 étyp
0-10	1.939	1.928	1.367	1.745	0.327
10-20	1.286	1.014	1.079	1.126	0.142
20-30	0.665	0.649	0.599	0.638	0.035
30-40	0.708	0.623	0.573	0.634	0.068
50-60	0.387	0.495	0.542	0.475	0.079
Prof	M2h	M2m	M2b	**M2 moy**	M2 étyp
0-10	1.288	1.540	0.849	1.226	0.350
10-20	1.154	1.062	0.618	0.945	0.287
20-30	0.997	0.667	0.638	0.767	0.200
30-40	0.585	0.668	0.573	0.609	0.052
50-60	0.478	0.333	0.343	0.384	0.081
Prof	NPKh	NPKm	NPKb	**NPK moy**	NPK étyp
0-10	0.901	1.450	0.821	1.058	0.342
10-20	0.788	0.650	0.490	0.642	0.149
20-30	0.658	0.623	0.352	0.544	0.167
30-40	0.518	0.742	0.659	0.640	0.113
50-60	0.359	0.363	0.819	0.514	0.265
Prof	Th	Tm	Tb	**T moy**	T étyp
0-10	1.865	0.860	0.818	1.181	0.593
10-20	0.743	0.561	0.658	0.654	0.091
20-30	0.621	0.561	0.453	0.545	0.085
30-40	0.495	0.473	0.454	0.474	0.020
50-60	0.370	0.354	0.375	0.366	0.011

Moyennes par position sur le site

Prof	**h moy**	h étyp	**m moy**	m étyp	**b moy**	b étyp
0-10	1.498	0.493	1.445	0.441	0.964	0.269
10-20	0.993	0.268	0.822	0.253	0.711	0.256
20-30	0.735	0.176	0.625	0.046	0.510	0.132
30-40	0.576	0.096	0.626	0.114	0.565	0.084
50-60	0.399	0.054	0.386	0.074	0.520	0.218

Stock cumulé de C ($kg.m^{-2}$)

Prof	M1h	M1m	M1b	**M1 moy**	M1 étyp
0-10	1.939	1.928	1.367	1.745	0.327
0-20	3.224	2.941	2.447	2.871	0.394
0-30	3.890	3.590	3.045	3.508	0.428
0-40	4.597	4.213	3.619	4.143	0.493
0-60*	5.532	5.266	4.718	5.172	0.415
Prof	M2h	M2m	M2b	**M2 moy**	M2 étyp
0-10	1.288	1.540	0.849	1.226	0.350
0-20	2.442	2.603	1.467	2.170	0.615
0-30	3.439	3.269	2.104	2.938	0.727
0-40	4.024	3.937	2.677	3.546	0.754
0-60*	5.034	4.770	3.478	4.427	0.833
Prof	NPKh	NPKm	NPKb	**NPK moy**	NPK étyp
0-10	0.901	1.450	0.821	1.058	0.342
0-20	1.689	2.100	1.311	1.700	0.394
0-30	2.347	2.723	1.663	2.244	0.537
0-40	2.865	3.465	2.322	2.884	0.572
0-60*	3.661	4.381	3.881	3.974	0.369
Prof	Th	Tm	Tb	**T moy**	T étyp
0-10	1.865	0.860	0.818	1.181	0.593
0-20	2.608	1.421	1.475	1.835	0.670
0-30	3.229	1.982	1.928	2.380	0.736
0-40	3.724	2.455	2.382	2.854	0.755
0-60*	4.527	3.222	3.172	3.640	0.768

Prof	**h moy**	h étyp	**m moy**	m étyp	**b moy**	b étyp
0-10	1.498	0.493	1.445	0.441	0.964	0.269
0-20	2.491	0.632	2.266	0.661	1.675	0.520
0-30	3.226	0.648	2.891	0.704	2.185	0.601
0-40	3.802	0.723	3.518	0.773	2.750	0.600
0-60*	4.688	0.798	4.410	0.871	3.812	0.670

* le stock de la couche de sol 40-50 cm est calculé en faisant la moyenne des stocks mesurés à 30-40 et 50-60 cm.

Annexe 2. $\delta^{13}C$ et $\delta^{15}N$ en abondance naturelle.

$\delta^{13}C$

Prof	M1h	M1m	M1b	**M1 moy**	M1 étyp
0-10	-23.7	-23.7	-23.9	-23.8	0.1
10-20	-24.1	-23.9	-24.4**	-24.1	0.2
20-30	-22.8	-23.4	-23.5	-23.2	0.4
30-40	-22.1	-22.4	-22.8	-22.4	0.4
50-60	-22.0	-22.2	-22.3	-22.1	0.2
70-80	-22.3	-22.2	-22.8	-22.4	0.3
90-100	-22.4	-22.5	-22.8	-22.6	0.2
Prof	M2h	M2m	M2b	**M2 moy**	M2 étyp
0-10	-22.9	-21.9	-23.0	-22.6	0.6
10-20	-23.4	-22.2	-23.4	-23.0	0.7
20-30	-22.7	-22.4	-23.5	-22.9	0.6
30-40	-22.3	-22.6	-22.5	-22.5	0.2
50-60	-22.4	-22.6	-23.2	-22.7	0.4
70-80	-23.1	-22.7	-23.1	-22.9	0.2
90-100	-23.1	-22.8	-22.9	-23.0	0.2
Prof	NPKh	NPKm	NPKb	**NPK moy**	NPK étyp
0-10	-22.7	-22.5	-23.2	-22.8	0.4
10-20	-22.1	-22.9	-22.8	-22.6	0.4
20-30	-21.9	-23.1	-22.9	-22.6	0.6
30-40	-22.3	-22.5	-22.7	-22.5	0.2
50-60	-22.7	-22.6	-23.2	-22.9	0.3
70-80	-22.8	-22.4	-23.0	-22.7	0.3
90-100	-23.0	-23.2	-23.1	-23.1	0.1
Prof	Th	Tm	Tb	**T moy**	T étyp
0-10	-21.5	-21.5	-21.3	-21.4	0.1
10-20	-22.4*	-22.9	-24.2	-23.2	0.9
20-30	-22.4	-22.6	-23.6	-22.9	0.6
30-40	-22.5	-22.6	-23.2	-22.8	0.4
50-60	-22.4	-22.9	-22.9	-22.7	0.3
70-80	-22.9	-23.1	-22.5	-22.8	0.3
90-100	-22.8	-22.9	-22.9	-22.9	0.0

Moyennes par position sur le site

Prof	**h moy**	h étyp	**m moy**	m étyp	**b moy**	b étyp
0-10	-22.7	0.9	-22.4	0.9	-22.9	1.1
10-20	-23.0	0.9	-23.0	0.7	-23.7	0.7
20-30	-22.4	0.4	-22.9	0.5	-23.4	0.3
30-40	-22.3	0.2	-22.5	0.1	-22.8	0.3
50-60	-22.4	0.3	-22.6	0.3	-22.9	0.4
70-80	-22.8	0.3	-22.6	0.4	-22.8	0.3
90-100	-22.9	0.3	-22.8	0.3	-22.9	0.1

* 2 répétitions : -22.4, -22.4 ; ** 4 répétitions : -24.4, -24.3, -24.4, -24.4

Composites 1998 £

Prof	**M1**
0-10	-23.6
10-20	-24.4
20-30	-23.0
30-40	-22.7
50-60	-22.2
70-80	-22.1
90-100	-22.1
Prof	**M2**
0-10	-22.7
10-20	-23.2
20-30	-22.7
30-40	-22.5
50-60	-22.6
70-80	-23.1
90-100	-22.6
Prof	**NPK**
0-10	-22.1
10-20	-22.2
20-30	-22.4
30-40	-22.5
50-60	-22.6
70-80	-22.6
90-100	-22.7
Prof	**T**
0-10	-22.2
10-20	-23.6
20-30	-23.3
30-40	-22.9
50-60	-23.5
70-80	-23.0
90-100	-23.3

£ Lesaint

$\delta^{15}N$

Prof	M1h	M1m	M1b	**M1 moy**	M1 étyp
0-10	5.4	4.5	5.6	5.1	0.6
10-20	7.4	6.8	7.1§§	7.1	0.3
20-30	8.9	8.1	8.8	8.6	0.4
30-40	9.9	8.9	9.4	9.4	0.5
50-60	10.7	8.9	9.8	9.8	0.9
70-80	11.2	10.1	10.0	10.4	0.7
90-100	11.3	10.5	9.6	10.4	0.9
Prof	M2h	M2m	M2b	**M2 moy**	M2 étyp
0-10	6.6	5.2	4.1	5.3	1.3
10-20	9.4	7.3	6.7	7.8	1.4
20-30	9.7	8.5	7.4	8.5	1.2
30-40	9.8	10.1	9.2	9.7	0.5
50-60	9.6	10.6	8.9	9.7	0.8
70-80	10.6	10.8	7.3	9.5	2.0
90-100	9.7	10.8	8.6	9.7	1.1
Prof	NPKh	NPKm	NPKb	**NPK moy**	NPK étyp
0-10	6.3	4.1	6.4	5.6	1.3
10-20	8.5	6.9	8.4	7.9	0.9
20-30	9.0	8.0	9.2	8.7	0.6
30-40	9.7	8.1	10.0	9.3	1.1
50-60	10.4	9.0	10.0	9.8	0.7
70-80	10.4	9.9	10.7	10.3	0.4
90-100	11.0	9.6	10.5	10.3	0.7
Prof	Th	Tm	Tb	**T moy**	T étyp
0-10	6.1	7.0	7.4	6.8	0.6
10-20	8.3§	8.7	8.9	8.6	0.3
20-30	9.3	9.4	9.4	9.4	0.1
30-40	10.2	9.8	9.4	9.8	0.4
50-60	10.7	9.9	9.4	10.0	0.7
70-80	9.8	10.3	10.0	10.0	0.2
90-100	10.4	9.8	10.3	10.2	0.3

Prof	**h moy**	h étyp	**m moy**	m étyp	**b moy**	b étyp
0-10	6.1	0.5	5.2	1.3	5.9	1.4
10-20	8.4	0.8	7.4	0.9	7.8	1.0
20-30	9.2	0.4	8.5	0.6	8.7	0.9
30-40	9.9	0.2	9.2	0.9	9.5	0.4
50-60	10.4	0.5	9.6	0.8	9.5	0.5
70-80	10.5	0.6	10.2	0.4	9.5	1.5
90-100	10.6	0.7	10.2	0.6	9.7	0.9

§ 2 répétitions : 8.4, 8.1 ; §§ 4 répétitions : 7.2, 7.1, 7.0, 7.1