

Influence d'une fertilisation organique et de la solarisation sur la productivité maraîchère et les propriétés d'un sol sableux sous abri

L. Thuriès^(1, 4, 5), A. Arrufat⁽²⁾, M. Dubois⁽³⁾, C. Feller⁽¹⁾, P. Herrmann⁽⁴⁾, M.-C. Larré-Larrouy⁽¹⁾, C. Martin⁽³⁾, M. Pansu⁽¹⁾, J.-C. Rémy⁽⁴⁾ et M. Viel⁽⁵⁾

- (1) IRD (ex ORSTOM), Laboratoire d'Etude du Comportement des Sols Cultivés, BP 5045, 34032 Montpellier Cedex 1
 (2) Civambio Languedoc Roussillon, avenue de Grande Bretagne 66000 Perpignan
 (3) Agriphyto Méditerranée, 19 avenue de Grande Bretagne 66025 Perpignan
 (4) INRA-ENSAM, Unité de Science du Sol, 2 place P. Viala 34060 Montpellier Cedex 1
 (5) Phalippou-Frayssinet S.A., fertilisants organiques, BP 42, 81270 Labastide-Rouairoux

RÉSUMÉ

Un dispositif suivi sur cinq ans, dans le sud de la France, a permis de tester les effets de l'apport d'un amendement organique commercial à base végétale ($\sim 7 \text{ t MO ha}^{-1}\text{an}^{-1}$) et de la solarisation sur la productivité végétale (laitue, melon) sous abri, le statut organique et diverses autres propriétés du sol.

La fertilisation organique (amendement et engrais) n'a pas d'effet significatif sur la productivité de la laitue, mais semble exercer un effet positif sur le melon. La solarisation, appliquée avant les cultures de laitue, exerce un effet positif et significatif sur la productivité de cette plante, mais aucun arrière-effet n'est décelable sur la culture suivante de melon. La solarisation (combinée ou non à la fertilisation organique) a révélé sa grande efficacité, à court terme, dans la lutte contre certains pathogènes telluriques comme *Sclerotinia* spp.

Concernant les propriétés édaphiques, la fertilisation organique (engrais + amendement) conduit à des augmentations significatives des teneurs et stocks en C et N du sol (0-20 cm), mais la solarisation semble entraîner une diminution des teneurs en N. Cette augmentation des teneurs en C conduit à une diminution de la densité apparente, et à une augmentation de la porosité, des cations échangeables, de la capacité d'échange cationique, du phosphore total, et du point de flétrissement permanent, mais aucune variation significative n'est notée pour la capacité au champ, les pH-eau et -KCl, l'indice de stabilité de l'agrégation et l'indice de dispersion.

Mots clés

Fertilisation organique - solarisation - maraîchage - serre - sol sableux - matière organique.

SUMMARY

ORGANIC FERTILIZATION AND SOLARIZATION EFFECTS ON YIELD AND PROPERTIES OF A SANDY SOIL IN MARKET GARDENING

We have investigated the medium-term effects (5 years) of the application of a commercial compost and the solarization technique on lettuce and melon productions, the soil organic status and some soil properties. Organic fertilization do not seemed to have significant effects on lettuce yields, but tended to increase the melon yields. A single application of organic fertilizer is self sufficient to grow melons compared to several applications of mineral fertilizer before and during (fertirrigation) the melon culture. Solarization, used just

before the lettuce growing season, has a positive and significant effect on lettuce yields (+15%), but no feed-back effect was shown on the following (10 months later) melon culture. Solarization (with or without organic fertilization) revealed its high efficiency in a short term (figure 5) to reduce drastically the soil-borne pests as *Sclerotinia* spp.

Organic fertilization allowed significant increases in C and N soil contents and stocks in the 0-20 cm layer (table 4, figure 6); however, N content seemed to decrease under solarization. With this experimental design, the increase of C contents induced a decrease of the bulk density, and increased the porosity, exchangeable cations, cation exchange capacity and permanent wilting point. No significant change was noted for field capacity, pH-H₂O or pH-KCl, index of aggregate stability, index of dispersion.

Key-words

Organic fertilization - solarization - market gardening - greenhouse - sandy soil - organic matter.

RESUMEN

INFLUENCIAS DE UNA FERTILIZACIÓN ORGÁNICA Y DE LA SOLARIZACIÓN SOBRE LA PRODUCCIÓN Y LAS PROPIEDADES EDÁFICAS DE UN SUELO ARENOSO EN INVERNADERO

Un dispositivo seguido durante cinco años, en el sur de Francia, permitió investigar las influencias de una enmienda comercial de base vegetal (compost, 7 t MO ha⁻¹ año⁻¹) y de la solarización sobre las cosechas de lechugas y melones en invernadero, así como el estatus orgánico y unas propiedades edáficas. La fertilización orgánica (abono y compost) no parece tener un efecto significativo sobre la productividad de las lechugas, pero aumenta la productividad de los melones (+14%). Una sola aplicación de abono y compost orgánico es suficiente para una producción de melones comparable a una con aplicaciones de abonos minerales antes y durante (fertirrigación) el cultivo. La solarización, practicada antes el cultivo de lechugas, tiene un efecto significativo y positivo sobre la productividad (+15%), pero no parece tener un efecto significativo sobre el cultivo de melones (diez meses después). Aquí la solarización (con o sin fertilización orgánica) ha demostrado su gran eficacia para luchar rápidamente contra los patógenos edáficos (p.e. *Sclerotinia* spp.).

La fertilización orgánica conlleva el aumento significativo del contenido en C y N del suelo de 0 a 20 cm. Con la solarización, los contenidos en N parecen disminuir. El aumento de los contenidos en C conduce a una disminución de la densidad aparente, y a un aumento de la porosidad, de los cationes intercambiables, de la capacidad de intercambio catiónico, del fósforo total y del punto de marchitamiento permanente, pero no cambia la capacidad de campo, ni el pH-H₂O o -KCl, ni el índice de estabilidad de la agregación, ni el índice de dispersión.

Palabras claves

Fertilización orgánica - solarización - hortalizas - invernadero - suelo arenoso - materia orgánica

Les cultures maraîchères intensives conventionnelles sous abri sont souvent caractérisées par l'utilisation de fortes doses d'intrants tels que les fertilisants et les pesticides. Les rotations étant souvent très courtes, l'occupation du sol est très intense et les pathogènes telluriques peuvent être hébergés durablement; on utilise alors des pesticides en quantités importantes. Par ailleurs, les passages répétés des engins sur les mêmes zones peuvent entraîner par compaction des diminutions de la porosité, de l'infiltrabilité, et provoquer l'apparition d'une semelle de labour. Dans les conditions climatiques régnant sous abri (température et humidité élevées), les processus de minéralisation de la matière organique (MO) du sol sont intenses ce qui peut conduire dans le cas d'apports organiques insuffisants à des baisses notables des teneurs en MO du sol avec des conséquences néfastes sur d'autres propriétés édaphiques.

Face à ces problèmes, des conduites de cultures dites "intégrées" et dites "biologiques" sont réalisées depuis plusieurs années. Les conduites "intégrées" sont caractérisées par une réduction - mais non une suppression totale - des apports en fertilisants et pesticides de synthèse. Les conduites "biologiques" ne font appel qu'à des fertilisants - engrais et amendements - organiques (N) et minéraux (P, K) d'origine naturelle et les produits phytosanitaires de synthèse sont interdits (règlement CEE 2092/91). La solarisation pour lutter contre les pathogènes telluriques (Katan, 1981; Martin et Thicoïpé, 1994) peut être pratiquée dans les deux systèmes.

Les cultures sous abri sont fortement développées dans le Roussillon, et des recherches sont entreprises pour évaluer l'intérêt et la faisabilité des pratiques "intégrées" ou "biologiques" (Arrufat *et al.*, 1998). En particulier, un site d'expérimentation nommé Biophyto, a été implanté en 1994 à Théza (Pyrénées Orientales) par un collectif d'organismes: "Agriphyto Méditerranée", "Civambio Languedoc Roussillon", "Centre National de Formation des Serristes" et lycée agricole de Théza.

L'objectif de ce travail, grâce à l'étude de conduites intégrées et biologiques, est d'analyser les effets d'une fertilisation organique et de la solarisation sur la productivité végétale, sur le statut organique d'un sol sableux et ses relations avec d'autres caractéristiques édaphiques (physiques, chimiques et biologiques).

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Sol

Le sol étudié est un Fluvisol (FAO-UNESCO-ISRIC, 1988), peu évolué sur alluvions récentes de la plaine du Réart. Il a été décrit par Servat et Callot (1966): il est de texture sablo-limoneuse (69 % sables, 11 % argile), non carbonaté et à pH neutre. L'analyse minéralogique par diffraction RX a révélé la présence de quartz en abondance, de feldspaths et de micas. Les argiles les plus représentées sont la smectite puis la kaolinite, la chlorite et les minéraux interstratifiés. La capacité d'échange cationique est faible, de l'ordre de 5 cmol (+) kg⁻¹ sur la couche 0-40 cm.

Dispositif expérimental

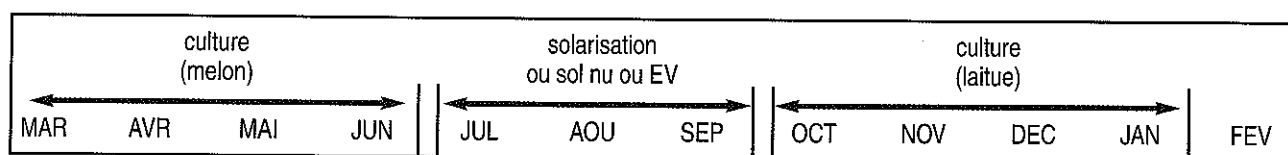
Les informations concernant le dispositif expérimental données ci-dessous sont extraites et résumées de Anonyme (1994, 1995, 1996, 1997, 1998) et Arrufat *et al.*, (1998). Ce dispositif n'a pas été conçu spécifiquement et uniquement pour l'étude développée ici.

Il est constitué de quatre serres fixes, de type tunnel (T) plastique froid de 400 m², orientées nord-sud. Une rotation laitue-melon a été pratiquée chaque année dans les tunnels T1, T2 et T3 (*figure 1*), et seulement une année sur quatre dans T4 (laitue - melon - céleri - tomate - blette - fenouil).

Les tunnels T1 et T2 ont été conduits en agriculture intégrée (fertilisation minérale, produits phytosanitaires de synthèse), et les tunnels T3 et T4 ont été conduits en agriculture biologique (fertilisation organique, produits phytosanitaires d'origine naturelle). Le travail du sol (un sous-solage à 40 cm, quatre passages de rotobèche à 25 cm, et quatre passages de rotarouveau à 15 cm de profondeur par an) et l'irrigation étaient identiques. Le dispositif expérimental est présenté dans le *tableau 1* et le calendrier cultural à la *figure 1*.

Les quantités d'engrais nécessaires ont été calculées avant chaque culture en fonction des résultats d'extraits de sols à l'eau (au 1/5) et des besoins des cultures. Les tunnels T1 et T2 ont été fertilisés avec des engrais azotés minéraux (ammonitrate 50-100 kg N ha⁻¹ an⁻¹), et de faibles doses d'amendement organique (4,2 t MO ha⁻¹ de fumure de fond en 1994 et 1,2 t

Figure 1 - Calendrier cultural.



Tunnels 1 à 3 : rotation laitue-melon

Tunnel 4 : rotation laitue-melon-céleri-tomate-blette-fenouil

EV : engrais vert = sorgho

Figure 1 - Cropping calendar

Tableau 1 - Apports d'azote (N amendement, N engrais en kg N ha⁻¹), de matière organique (t ha⁻¹) et traitements du sol pendant l'interculture d'été

Table 1 - N fertilization (N amendment, N fertilizer in kg N ha⁻¹), organic matter inputs (t ha⁻¹) and summer soil treatments

			apports azotés (kg N ha ⁻¹) et traitements estivaux													apports totaux N kg ha ⁻¹	apports totaux MO t ha ⁻¹	
demi-tunnel	fertilisation	forme d'N apporté	02/94	04/94	été 94	10/94	03/95	été 95	11/95	03/96	été 96	11/96	03/97	été 97	10/97	§	§	§§
1N	MIN+org	amendement	75	106	Nu	0	0	Nu	0	40	EV	0	0	EV	0	221	5,4	5,4
		engrais minéral	99	133		33	108		0	167		138	199		66	540		
1S	MIN+org	amendement	75	106	Sol ^o	0	0	Sol ^o	0	40	Sol ^o	0	0	Sol ^o	0	221	5,4	5,4
		engrais minéral	99	133		0	141		0	131		17	199		17	504		
2N	MIN+org	amendement	75	106	Nu	0	0	Nu	0	40	Nu	0	0	Nu	60	221	5,4	7,3
		engrais minéral	99	133		0	75		0	171		33	196		0	478		
2S	MIN+org	amendement	75	106	Sol ^o	0	0	Sol ^o	0	40	Sol ^o	0	100	EV	60	221	5,4	10,3
		engrais minéral	99	133		0	141		0	135		33	183		83	507		
3N	ORGA	amendement	62	100	EV	100	100	EV	60	100	EV	100	100	Nu	60	523	20	28,8
		engrais organique	175	210		140	210		0	100		119	70		70	835		
3S	ORGA	amendement	62	100	Sol ^o	100	100	Sol ^o	60	100	Sol ^o	100	100	Sol ^o	60	523	19	27,4
		engrais organique	175	210		0	210		0	140		0	70		0	735		
4N	ORGA	amendement	62	100	EV	100	100	EV	100	100	EV	100	100	EV	100	563	23,4	34,6
		engrais organique	175	210		140	280		380	140		119	70		105	1325		
4S	ORGA	amendement	62	100	Sol ^o	100	100	Sol ^o	100	100	Sol ^o	100	100	Sol ^o	100	563	21,3	31,6
		engrais organique	175	210		0	280		220	140		60	70		105	1025		

MIN+org : fertilisation minérale avec un faible apport organique

ORGA : fertilisation exclusivement organique

Sol^o : solarisation

EV : engrais vert

§ sur 3 ans (1994 à 03/1996)

§§ 1994 à 10/1997

MO ha⁻¹ en 1996). Les tunnels T3 et T4 ont été fertilisés uniquement avec un amendement organique (Végethumus® 2/0,5/1, ~ 6 t MO ha⁻¹ an⁻¹) et un engrais organique (Guanor® 7/6/8, ~ 2 t MO ha⁻¹ an⁻¹).

Les tunnels ont été séparés en une partie nord (N), et une partie sud (S) différenciées par les traitements estivaux :

- la solarisation a été appliquée sur tous les demi-tunnels sud. Le but principal de la solarisation est de réduire la pression des populations de pathogènes par augmentation de la température du sol. La technique consiste à tendre un film plastique transparent (polyéthylène résistant à 700 heures d'ensoleillement) de 50 µm d'épaisseur sur un sol préalablement travaillé et humidifié, selon Chen *et al.* (1991), et Katan (1981, 1996).

- les sols ont été laissés nus sur les demi-tunnels nord de T1 et T2 (1N, 2N),

- du sorgho (*Sorghum vulgare*) a été cultivé comme engrais vert (EV) sur les demi-tunnels nord de T3 et T4 (3N, 4N).

Mesures des rendements

Pour la laitue (*Lactuca sativa* L.), 6 prélèvements de 13 plants ont été réalisés par demi-tunnel. Les 13 plants ont été récoltés sur une même ligne et sur une demi-largeur de tunnel. Seuls les plants entourés de huit voisins ont été choisis (de Tourdonnet, 1998). Les plants ont été débarrassés des feuilles rendues impropres à la vente suite à l'attaque de pathogènes (opération d'épluchage ou parage), puis pesés individuellement. Pour chacun des 6 prélèvements, la masse moyenne d'un pied a été calculée à partir des 13 plants prélevés. A surface et densité de plantation égales, la masse moyenne d'un pied (g) est le paramètre du rendement sur lequel portent les comparaisons. L'impact du champignon tellurique pathogène *Sclerotinia* spp. a été suivi par cartographie de la mortalité des laitues dans les demi-tunnels 1N, 1S, 2N, 2S, 3N et 3S.

Pour le melon (*Cucumis melo* L.), le rendement a été calculé en cumulant la masse des fruits récoltés par demi-tunnel (kg m⁻²).

Analyses des sols

Mesure de la température des sols

La température des sols des demi-tunnels 2N et 2S a été relevée en continu (toutes les minutes) pendant les traitements estivaux de 1994 grâce à une centrale d'acquisition de données (Campbell). Les sondes cuivre-constantan étaient placées à 10 cm dans le sol.

Analyses physiques et chimiques

Des prélèvements de sols ont été effectués après melon en troisième année de l'essai (juillet 1996), dans les couches 0-10, 10-20 et 20-40 cm de profondeur. Il y a 6 répétitions par demi-tunnel. Chaque répétition est un échantillon composite de 10 prélèvements effectués sur une sous-parcelle de 18 m². Le sol

a été séché à l'air, tamisé à 2 mm et broyé à 0,1 mm pour les analyses chimiques.

L'analyse mécanique a été réalisée selon la méthode internationale, avec détermination des argiles (A, 0-2 µm) et limons fins (Lf, 2-20 µm) à la pipette Robinson. La capacité de rétention en eau a été déterminée à -50 kPa (pF 2,7), -100 kPa (pF 3,0) et -1500 kPa (pF 4,2), selon la méthode des plaques (Richards 1947; Bruand *et al.*, 1996). La densité apparente (Da) a été estimée à l'aide de cylindres à bords biseautés de 500 cm³. La stabilité structurale des agrégats a été déterminée selon la méthode de Kemper et Rosenau (1986) modifiée selon Kouakoua *et al.* (1997). Dans notre étude, l'indice d'agrégation (I_{agrégation}) représente la quantité de macroagrégats (agrégats > 200 µm moins sables grossiers SG) rapportée à 100 g de "sol moins sables grossiers (SG)". L'indice de dispersion (I_{dispersion}) représente la quantité d'argiles + limons fins (A+Lf) rapportée à 100 g de A+Lf total du sol.

Les teneurs en C et N ont été déterminées par voie sèche à l'aide d'un analyseur élémentaire Carlo Erba NA 2000. Le phosphore assimilable a été dosé selon la méthode Olsen-Dabin (Dabin, 1967). Les cations échangeables ont été dosés après extraction par le chlorure de cobaltihexamine (Rouiller *et al.*, 1994).

Calcul des stocks organiques

Les stocks de C et N exprimés en tonne par hectare pour une couche donnée ont été calculés de la façon suivante :

$$S = [10 \times e \times Da_{st} (1 - r)] \times c$$

où S est le stock de carbone ou d'azote (t ha⁻¹), e l'épaisseur de la couche de sol (m), Da_{st} la masse volumique assimilée à la densité apparente du sol total (t m⁻³), r le refus supérieur à 2 mm (exprimé en fraction massique du sol total), c la concentration en carbone ou en azote de la couche de sol tamisé à 2 mm (g kg⁻¹ sol). Les refus étaient siliceux et considérés comme ayant une teneur en C organique nulle.

Activité respirométrique

L'activité des microorganismes des sols des deux tunnels 1S et 3S a été estimée par respirométrie grâce à une incubation en conditions contrôlées décrite en détail dans Thuriès *et al.* (2000) : 50 g de terre ont été mis à incuber dans des enceintes hermétiques de 1,2 L à une humidité maintenue à 75% de la capacité de rétention en eau du sol et la température à 28°C. Le CO₂ dégagé, piégé par NaOH 0,5 M, a été dosé en retour par acidimétrie. On a calculé :

- le coefficient de minéralisation du carbone du sol (C_M) selon Dommergues (1960) pour une durée de 28 jours : C minéralisé en % du C total initial du sol,

- le C potentiellement minéralisable (C₀), selon l'équation suivante :

$$C_m = C_0(1 - e^{-kt}) \quad (1)$$

où C_m est la quantité de C minéralisé à un temps t , k la constante de vitesse de minéralisation (exprimée dans l'unité de t^{-1}) pour une durée maximale de 28 jours.

Sélection des demi-tunnels pour les processus étudiés

Productivité végétale

Le dispositif expérimental étant complexe, seule la comparaison de quelques demi-tunnels permet de tester les traitements étudiés.

Effet de la fertilisation organique

La comparaison portait a priori sur les tunnels T1 ou T2 avec T3 ou T4. Le tunnel T4 a été écarté puisqu'il n'avait pas les mêmes rotations culturales que T1, T2 et T3. Les demi-tunnels 1N, 2N et 3N n'ont pas été pris en compte car ils n'avaient pas les mêmes traitements estivaux (tableau 1). Seuls restaient les demi-tunnels 1S, 2S, et 3S qui ont reçu respectivement sur la période 1994-1997, environ 5, 10 et 27 t MO ha^{-1} . Le choix a porté sur la comparaison des demi-tunnels 1S et 3S qui sont les situations les plus contrastées sur le plan de la fertilisation organique.

Effet de la solarisation

Cet effet ne peut s'étudier que par la comparaison des demi-tunnels Nord et Sud, et non cultivés en engrais vert (EV) pendant l'interculture d'été. Aussi, seule la comparaison des demi-tunnels 2N et 2S a été possible.

Statut organique et autres propriétés des sols

Les effets sur les teneurs en C et N du sol : (i) de la fertilisation organique ont été évalués par la comparaison des demi-tunnels 1S/3S, 2S/3S ; (ii) de la solarisation par la comparaison 1N/1S et 2N/2S.

Les effets des variations des teneurs en C et N sur les autres caractéristiques physico-chimiques de ces sols ont été testés par l'étude des corrélations entre les teneurs en C et N et les propriétés mesurées dans l'ensemble des huit demi-tunnels. On a fait l'hypothèse que les rotations culturales ont une influence limitée sur les caractéristiques physico-chimiques de ces sols. Aussi le tunnel T4 a-t-il été inclus dans les comparaisons.

Les analyses statistiques présentées (au seuil de 5% quand non spécifié), proviennent des tests de comparaison des moyennes de Student et de Fischer (logiciel Statview™ 4-5).

RÉSULTATS

Type de fertilisation et productivité végétale

Laitue. La figure 2a présente une comparaison des masses moyennes de laitues pour les demi-tunnels 1S (fertilisation minérale) et 3S (fertilisation organique élevée). Pour chaque année, on n'observe aucune différence significative entre traitements. Les formes (engrais ou amendement) et quantités d'azote apportées variant selon les traitements et les années (tableau 1), on a recherché pour l'ensemble des traitements solarisés comparables 1S, 2S, 3S, s'il existait une relation significative entre les quantités d'azote (N) apportées et la masse moyenne des laitues entre le printemps 1994 et l'automne 1997 ($n = 15$). Il ressort (i) l'absence de relation significative avec N-amendement seul ($r = 0,27$) ; (ii) des relations significatives et positives avec N-engrais ($r = 0,79$), et N total apporté (engrais + amendement, $r = 0,71$).

Melon. La figure 2b présente une comparaison des rendements en masse de melon par m^2 . L'absence de répétitions ne permet pas de tester statistiquement les différences observées. On peut noter toutefois que trois années sur quatre (1994, 1995 et 1996), la production avec fertilisation organique forte (3S) est plus élevée qu'avec fertilisation minérale et faible apport organique (1S). Sur l'ensemble des quatre années, la production du demi-tunnel 3S est en moyenne de 14% plus élevée. Ce chiffre doit être considéré avec prudence et relève plus de la tendance que d'une différence nette, puisqu'il n'a pu être réalisé de test statistique. Toutefois, il n'existe aucune relation significative entre les rendements de melon et les quantités d'azote apportées sous forme d'engrais ($n = 12$, $r = 0,28$), d'amendement ($r = 0,29$) ou de somme engrais + amendement ($r = 0,39$).

Solarisation et productivité végétale

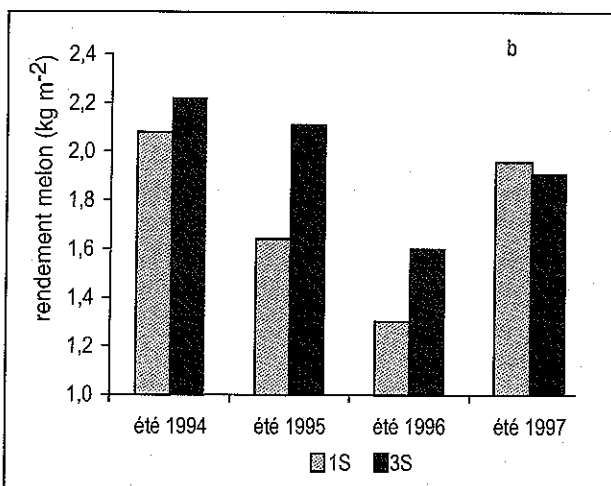
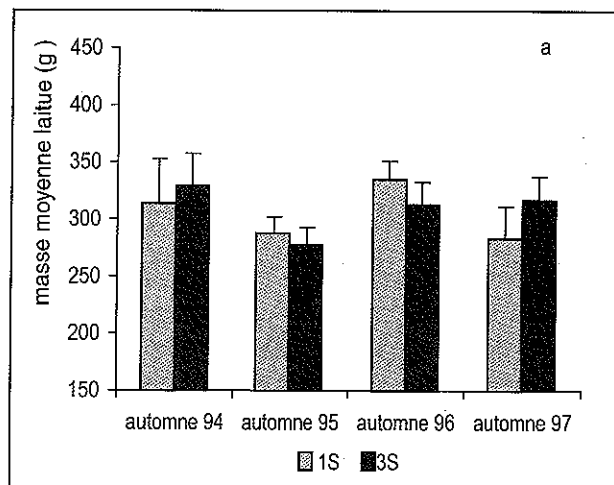
Laitue. Les mesures ont porté sur 3 ans pour les demi-tunnels 2N et 2S (figure 3a).

La solarisation a inversé les différences de masses moyennes par pied observées entre les demi-tunnels 2S et 2N. Dans l'état initial en 1994 avant solarisation, les masses moyennes des laitues dans le demi-tunnel 2S étaient plus faibles que dans 2N. Après la première solarisation, pour chaque année, les masses moyennes sont significativement plus élevées (différence d'environ 15%) pour 2S que pour 2N.

L'effet phytosanitaire (thermique) de la solarisation a été évalué (figure 4). Les températures les plus élevées ont été mesurées dans la partie solarisée (27,5 à 47,5°C) et les plus faibles dans la partie non solarisée (20 à 35°C) ; des différences de plus de 15°C ont pu être relevées entre les deux sols. L'efficacité de cette augmentation de température pour réduire la pression des populations de pathogènes a été mise en évidence en comparant le taux de mortalité des laitues dû à

Figure 2 - Masse moyenne (g) d'un pied de laitue (a), rendements commerciaux du melon (kg m^{-2}) pour ~30 jours de récolte (b) : comparaison des situations avec (3S) et sans (1S) fertilisation organique.

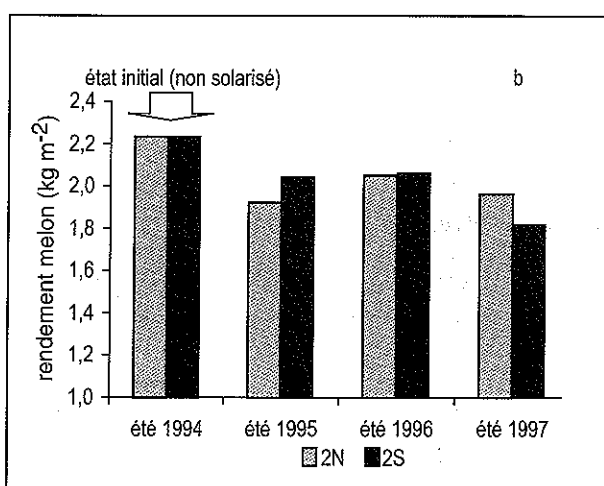
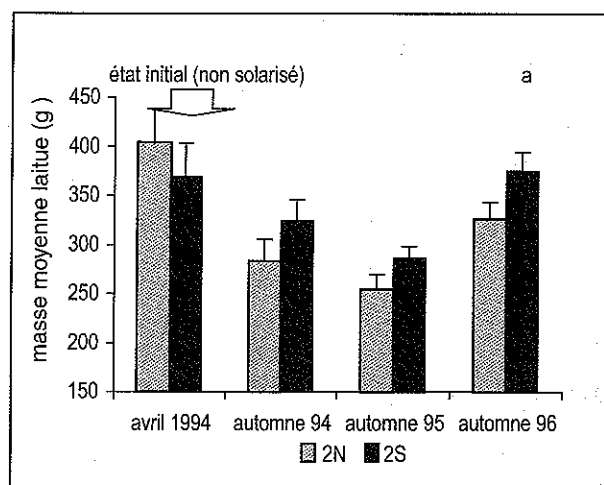
Figure 2 - Mean weight of lettuce plant (g), a) and melon yield (kg m^{-2}), b) : on plots with (3S) or without (1S) organic fertilization.



Sclerotinia avant et après solarisation. Lors de la culture de laitue d'avril 1994, avant la première solarisation, le taux de mortalité dû à *Sclerotinia* était assez homogène (2 à 4% dans les demi-tunnels 1N, 1S, 2N, 3N, 3S) et atteignait environ 7% pour 2S (figure 5). Après la première campagne de solarisation, on observe une diminution spectaculaire de la mortalité due à *Sclerotinia* (de 7 à 0,5%). Cette mortalité devient nulle avec les solarisations suivantes. Pour le demi-tunnel 2N, bien que la mortalité due aux attaques parasitaires ait été relativement faible (~ 3%) en 1994, on doit constater qu'elle est toujours présente au cours des années suivantes.

Figure 3 - Masse moyenne (g) d'un pied de laitue (a), rendements commerciaux du melon (kg m^{-2}) pour ~30 jours de récolte (b) : comparaison des situations solarisée (2S) et non solarisée (2N).

Figure 3 - Mean weight of lettuce plant (g), a) and melon yield (kg m^{-2}), b) : on solarized (2S) and unsolarized soils (2N).



Melon. A la différence de la culture de laitue (figure 3a), on n'observe pas d'effet notable de la solarisation sur le rendement de la culture de melon (figure 3b).

Pratiques culturales et statut organique du sol

Aperçu général sur le statut organique du sol

Le carbone potentiellement minéralisé à 28 jours est un indice utilisé pour caractériser l'activité biologique des sols (Dommergues, 1960). Après 28 jours d'incubation, 152 et 188 $\text{mg C-CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ sol}$ ont été respectivement minéralisés par 1S et 3S (figure 6). Le calcul des intervalles de confiance cumulés

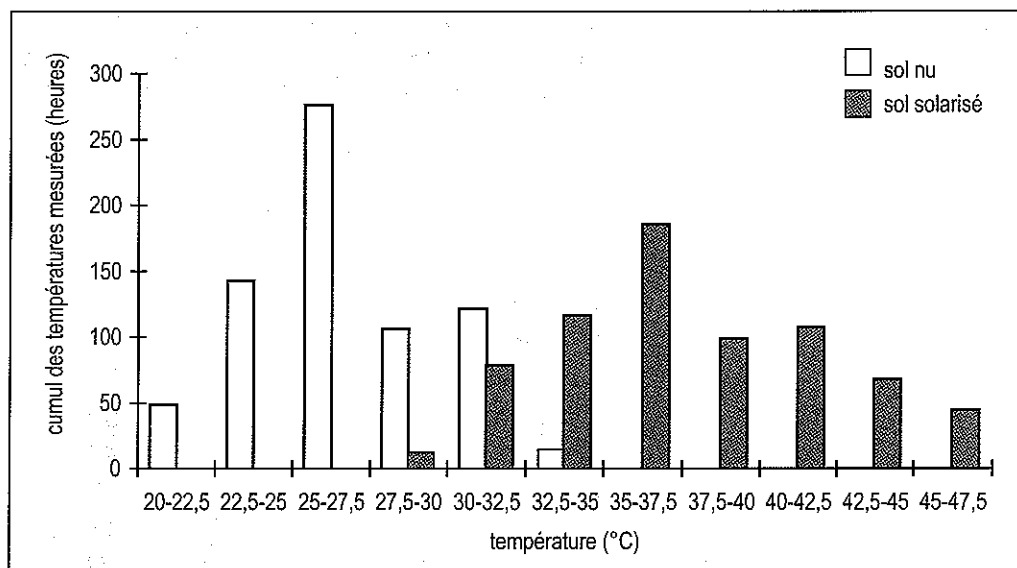
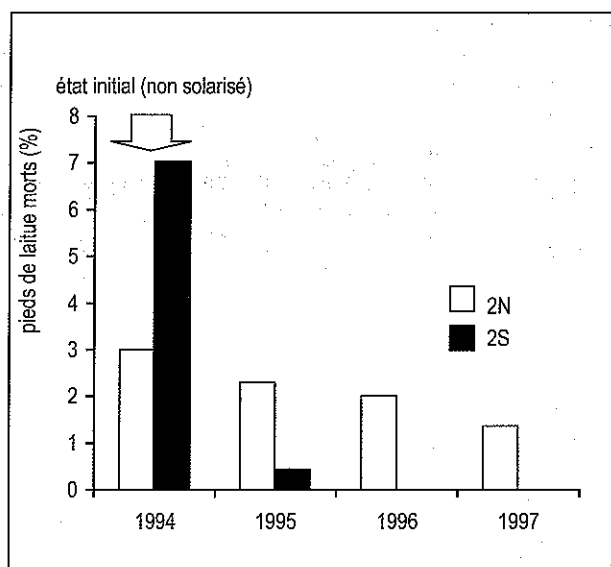


Figure 4 - Nombre d'heures par classe de température enregistrée à 10 cm de profondeur dans les sols solarisés et nu au cours de l'été 1994.

Figure 4 - Number of hours per temperature class, recorded at 10 cm deep in bare and solarized soils during summer 1994.

Figure 5 - Pourcentage de mortalité due à *Sclerotinia* sp. sur laitue : comparaison des situations solarisées (2S) et non solarisées, sol nu (2N).

Figure 5 - Lettuce death (%) due to *Sclerotinia* sp.: on solarized (2S) or unsolarized soils (2N).



montre que les résultats des deux séries sont significativement différents. Le coefficient de minéralisation C_M est de 3,4% pour 1S et de 2,5% du C initial pour 3S. L'utilisation de l'équation (1) permet de calculer la quantité de C potentiellement minéralisable, C_0 (170 et 200 mg C kg⁻¹ sol pour 1S et 3S), et la constante de vitesse de minéralisation k (0,074 et 0,080 jour⁻¹ pour ces mêmes sols).

Les teneurs (g kg⁻¹ sol) et stocks (t ha⁻¹) en C et N en été 1996 sont présentés au *tableau 2*. Teneurs et stocks sont liés très positivement, que les stocks soient calculés sur 0-40 cm (l'ensemble du profil étudié) ou calculés pour une masse fixe de sol selon Ellert et Bettany (1995). De plus, que l'on considère les teneurs ou les stocks, le sens des variations entre les différents traitements reste le même. Aussi, par simplification, les teneurs seront préférentiellement commentées.

Les tunnels T1 et T2 présentaient sur l'ensemble du profil des teneurs en C significativement plus faibles (environ 4,5 à 5,5 g kg⁻¹) que celles des tunnels T3 et T4 (environ 6 à 11 g kg⁻¹) qui ont reçu une fertilisation organique forte. On observe les mêmes tendances pour les teneurs en N. Au niveau des demi-tunnels, on note peu de variations de C et N avec la profondeur.

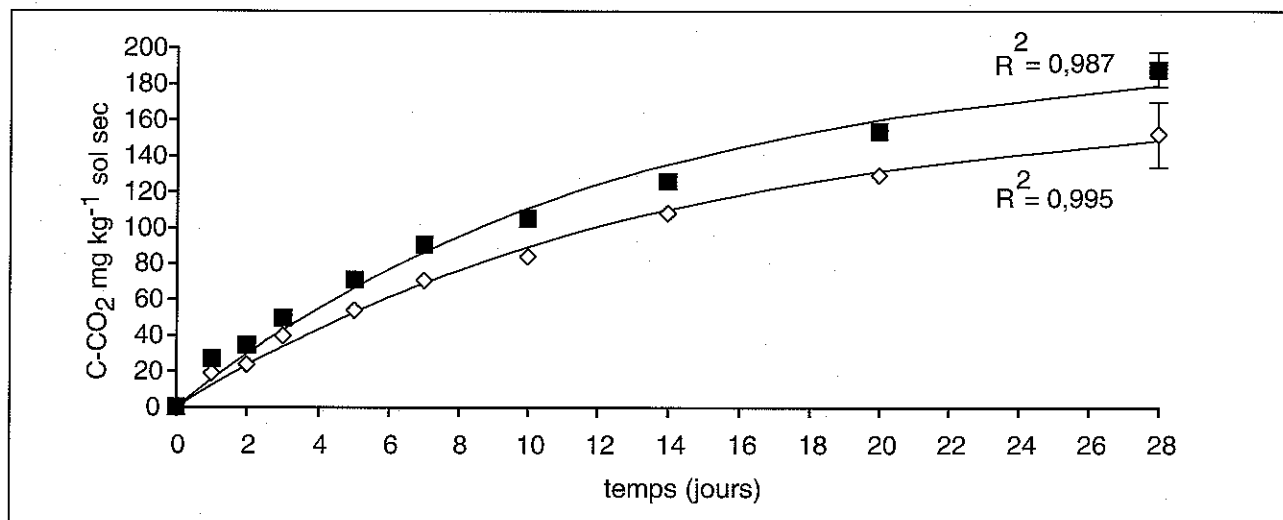
On a étudié les relations entre teneurs en argile (A, <0,002 mm), en éléments fins (A+Lf, <0,02 mm), en sables (Sg+Sf), en éléments grossiers (refus >2 mm) et les teneurs en C. On constate (*tableau 3*) qu'il n'existe pas de relation significative entre teneurs en C (ou N) et taux de refus > 2 mm, ou teneurs en argile A. Toutefois une corrélation significative et positive existe avec les teneurs en (A+Lf). De ce fait, l'analyse des effets des traitements sur les teneurs en C et N doit porter sur des situations à faibles différences de teneurs en éléments fins.

Fertilisation organique et teneur en C et N du sol

Quelle que soit la couche considérée, il n'existe pas de différence significative de teneur en (A+Lf) entre 2S et 3S. Les effets de la fertilisation organique sur les teneurs en C et N ont donc été évalués en comparant ces deux demi-tunnels. Les teneurs en C étaient plus élevées dans le demi-tunnel 3S avec fertilisation organique, que dans le demi-tunnel 2S (*figure 7a*). Les effets les plus importants sont notés pour la couche 0-10

Figure 6 - Activité biologique potentielle (C-CO₂ mg kg⁻¹, 28°C, 28 jours) de sol recevant (3S, ■) ou non (1S, ◇) une fertilisation organique. (Intervalles de confiance cumulés). Les courbes représentent les valeurs prédites.

Figure 6 - Carbon mineralization potential (CO₂-C mg kg⁻¹, 28°C, 28 days) of soil with (3S, ■) or without (1S, ◇) organic fertilization. (Bars are cumulated confidence intervals). Solid lines are predicted values.



cm avec une différence de 41% (significative au risque $\alpha < 5\%$). Pour l'ensemble du profil 0-40 cm, cette différence est de 23% (significative au risque $\alpha < 1\%$). Les teneurs en N suivent les mêmes tendances (figure 7b).

Solarisation et teneur en C et N du sol

Il n'existe pas de différence significative des teneurs en éléments fins (A+Lf) pour les demi-tunnels 2N/2S. On peut donc tester l'effet de la solarisation sur les teneurs en C et N par la comparaison de ces deux demi-tunnels (figure 8). Quel que soit l'horizon considéré, il n'y a aucune différence significative pour les teneurs en C (figure 8a). A l'opposé, les teneurs en N étaient plus faibles pour toutes les couches des sols solarisés (figure 8b) et ce, très significativement (au risque de 1%). Les différences varient de 17 à 25%.

Relations entre teneurs en C et propriétés physico-chimiques du sol

De nombreuses propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols sont fortement dépendantes des teneurs en C et en A+Lf. Aussi, avons-nous calculé pour la couche 0-10 cm, les coefficients de corrélation (r_1 et r_2 respectivement) entre diverses caractéristiques (Y) physiques et chimiques des échantillons et les teneurs en C et A+Lf. Les résultats sont reportés au tableau 5.

On constate que parmi les propriétés Y testées, aucune n'est significativement liée à A+Lf. Par contre des corrélations significativement positives sont trouvées entre teneur en C et

les propriétés d'échange telles que CEC et cations échangeables, le phosphore total (Pt) et la capacité de rétention en eau au point de flétrissement permanent (pF 4,2). Il n'y a pas d'effet significatif des teneurs en C sur le pH (eau ou KCl), la capacité au champ (pF 2,7), l'eau utile, et les paramètres des tests d'agrégation ($I_{agrégation}$ et $I_{dispersion}$). Des corrélations significativement négatives existent entre la teneur en C et le phosphore assimilable (P Olsen-Dabin). On note aussi une relation négative entre la teneur en C et les densités apparentes (D_a) du sol total ou de la terre fine. Des différences de D_a du sol total (et par conséquent de porosité, les deux étant liées) apparaissent à la lecture du tableau 2. Globalement, les tunnels T1 et T2 ont des D_a plus élevées, et donc des porosités plus faibles, que celles des tunnels T3 et T4.

DISCUSSION ET CONCLUSION

Pratiques culturales et productivité végétale

Fertilisation organique

On n'a pas noté d'effet du mode de fertilisation (minérale ou organique) sur les masses moyennes des laitues des demi-tunnels solarisés 1S et 3S (les seuls pouvant être comparés). Le faible nombre de produits phytosanitaires disponibles et utilisables en conduite biologique, à l'opposé de ceux disponibles et utilisés en conduite intégrée dans 1S, peut avoir pénalisé la productivité des laitues dans 3S. En effet, le nombre de feuilles

Tableau 2 - Teneurs et stocks de carbone et d'azote, densité apparente et porosité du sol total, teneurs en éléments grossiers (refus>2mm) et en argiles + limon fin en été 1996.

Table 2 - Carbon and nitrogen contents and stocks, bulk density, porosity, fraction>2mm and clay + fine silt (A+Lf) in summer 1996.

demi-tunnel	horizon (cm)	Da sol total	porosité* sol total	refus % total	A+Lf % sol	C N		C t ha ⁻¹	N t ha ⁻¹
						g kg ⁻¹	sol sec		
1N	0-10	1,543	0,422	8,85	25,3	4,444	0,595	6,25	0,84
	10-20	1,539	0,424	8,94	22,7	4,596	0,630	6,44	0,88
	20-40	1,508	0,435	8,22	22,8	4,946	0,639	14,30	1,85
	0-40							26,99	3,57
1S	0-10	1,468	0,450	5,21	22,5	4,440	0,495	6,18	0,69
	10-20	1,462	0,453	6,68	20,4	4,580	0,499	6,25	0,68
	20-40	1,462	0,452	8,53	19,2	4,435	0,490	12,42	1,37
	0-40							24,84	2,74
2N	0-10	1,532	0,426	15,32	24,5	5,271	0,667	6,84	0,86
	10-20	1,521	0,430	13,85	25,7	5,169	0,676	6,77	0,88
	20-40	1,526	0,428	14,52	23,5	4,906	0,634	12,80	1,65
	0-40							26,41	3,40
2S	0-10	1,545	0,421	15,58	24,5	5,292	0,504	6,90	0,66
	10-20	1,508	0,435	14,99	24,1	5,469	0,527	7,01	0,68
	20-40	1,585	0,406	18,41	24,9	5,156	0,501	13,34	1,29
	0-40						27,25	2,63	
3N	0-10	1,401	0,475	8,04	28,3	8,162	0,851	10,51	1,10
	10-20	1,393	0,478	8,20	26,1	9,091	0,901	11,63	1,15
	20-40	1,490	0,442	9,25	27,2	8,885	0,862	25,26	2,46
	0-40							47,39	4,71
3S	0-10	1,488	0,443	5,09	28,1	7,492	0,808	10,58	1,14
	10-20	1,465	0,451	4,56	29,4	6,092	0,664	8,52	0,93
	20-40	1,477	0,447	4,87	25,1	6,002	0,657	17,30	1,89
	0-40							36,39	3,96
4N	0-10	1,395	0,478	2,58	28,1	11,22	1,289	15,25	1,75
	10-20	1,366	0,488	2,43	28,9	10,29	1,078	13,71	1,44
	20-40	1,416	0,470	2,95	28,8	10,38	1,137	28,97	3,15
	0-40							57,93	6,34
4S	0-10	1,394	0,478	1,18	24,1	7,204	0,777	9,92	1,07
	10-20	1,468	0,450	1,28	32,1	8,013	0,813	11,61	1,18
	20-40	1,487	0,443	2,05	31,5	7,415	0,779	21,83	2,28
	0-40							43,36	4,53

* Da et porosité totale sont liées par la relation : porosité = 1-(Da/Dréelle).

Tableau 3 - Coefficients de corrélation entre refus >2 mm, Sg+Sf, A+Lf, A, Da et teneurs en C et N.

Table 3 - Correlation coefficients between fraction >2mm, coarse+fine sand, clay+fine silt, clay, bulk density and C and N contents.

R pour C	refus	Sg+Sf	A+Lf	A	Da sol total
0-10 cm	-0,536 ns	-0.908 **	0,761 *	-0,290 ns	-0.754 *
10-20 cm	-0,567 ns	-0.664 ns	0,736 *	0,372 ns	-0.879 **
20-40 cm	-0,545 ns	-0.821 **	0,731 *	0,330 ns	-0.588 ns
R pour N	refus	Sg+Sf	A+Lf	A	Da sol total
0-10 cm	-0,534 ns	-0.852 **	0,738 *	0,351 ns	-0.689 *
10-20 cm	-0,555 ns	-0.640 ns	0,726 *	0,453 ns	-0.785 *
20-40 cm	-0,602 ns	-0.748 *	0,671 *	0,250 ns	-0.668 *

Figure 7 - Teneurs en C (a) et N (b) en $g\ kg^{-1}$ de sols recevant (3S, ▲) ou non (2S, ●) une fertilisation organique.

Figure 7 - C (a) and N (b) contents in $g\ kg^{-1}$ of soil with (3S, ▲) or without (2S, ●) organic fertilization.

Figure 8 - Teneurs en C (a) et N (b) en $g\ kg^{-1}$ de sols solarisé (2S, ●) ou non solarisé (2N, ○).

Figure 8 - C (a) and N (b) contents in $g\ kg^{-1}$ of solarized soil (2S, ●) or unsolarized soil (2N, ○).

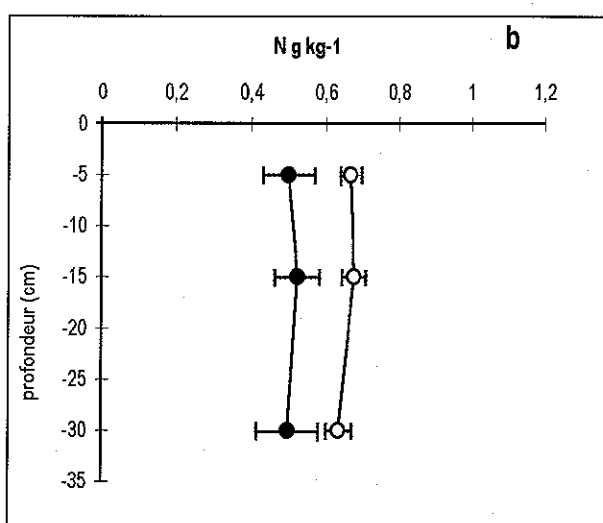
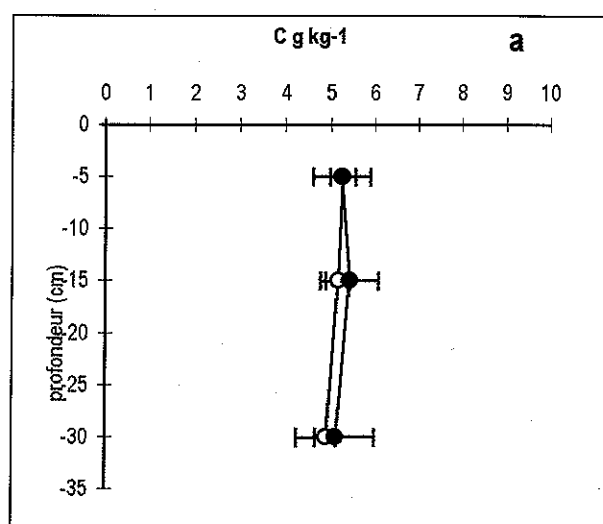
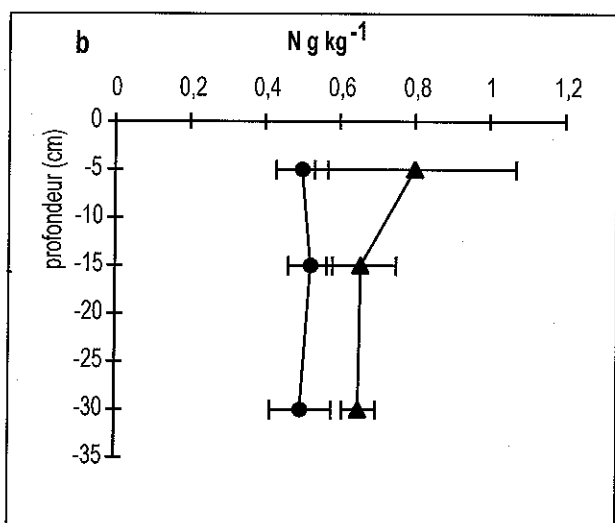
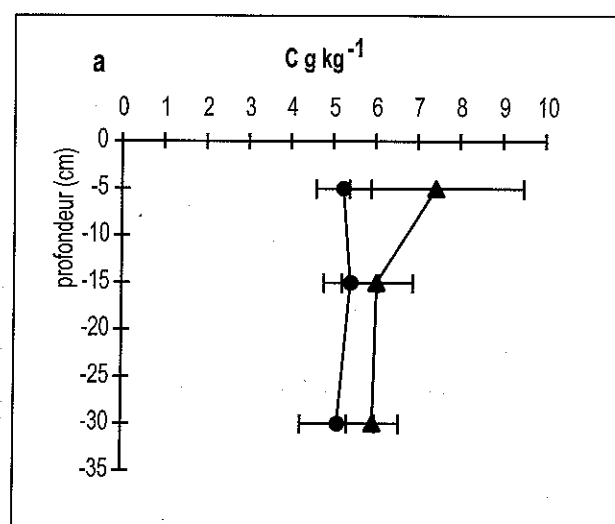


Tableau 4 - Effets (en %) de la fertilisation et de la solarisation sur les teneurs en C et N, niveaux de signification.**Table 4** - Management effects (%) on C and N contents, tendencies and significance levels.

FERTILISATION	horizon	tendance en %			
		C	N	C	N
2S vs 3S	0-10	-41,6	-60,3	*	*
	10-20	-11,4	-25,9	ns	*
	20-40	-16,4	-31,3	ns	**
	0-20	-26,2	-42,8	ns	**
	0-40	-23,0	-39,0	**	***
1S vs 3S	0-10	-68,8	-63,3	**	*
	10-20	-33,0	-33,0	**	**
	20-40	-35,3	-34,2	***	***
	0-20	-50,6	-48,1	***	***
	0-40	-45,6	-43,5	***	***
SOLARISATION 2S vs 2N	0-10	-0,4	-25,0	ns	***
	10-20	4,9	-22,7	ns	***
	20-40	4,2	-21,7	ns	**
	0-20	3,1	-24,3	ns	***
	0-40	3,5	-23,5	ns	***
1S vs 1N	0-10	-0,1	-16,9	ns	***
	10-20	-0,3	-20,9	ns	***
	20-40	-10,3	-23,3	ns	***
	0-20	-0,2	-18,9	ns	***
	0-40	-3,8	-20,4	ns	***

* : significatif 5%

** : 1%

*** : <0,1%

qu'il a fallu éliminer des laitues (feuilles attaquées par des pathogènes) a souvent été plus important dans 3S que dans 1S. Les masses moyennes des laitues ont donc été affectées différemment par l'opération de parage. Toutefois, les masses moyennes des laitues dépendent du niveau de la fertilisation azotée minérale, mais non de N apporté par le seul amendement; cet effet de la fertilisation minérale est connu. Pour ces tunnels, quelques données de concentrations en nitrates de la solution du sol (résultats non présentés), semblent indiquer la présence de teneurs en azote minéral assez importantes (environ 100 mg N-NO₃ kg⁻¹ et jusqu'à 400 en 1995) dans le sol avant la plantation des laitues. Le risque de lessivage des nitrates n'est donc pas négligeable, et même pour ces types de conduites (intégrées et biologiques), il est nécessaire de bien maîtriser l'irrigation. Cet azote minéral mesuré avant la plantation des laitues peut être un effet de la solarisation comme cela a déjà été noté par d'autres auteurs (Chen et Katan, 1980; Chen *et al.*, 1991). Ceci pourrait masquer un éventuel effet positif de N apporté par l'amendement organique. La solarisation peut aussi agir sur les rendements par la production de molécules organiques (type substances humiques) à effet d'hormone de croissance, *auxine-like* par exemple (Albuzio *et al.*, 1993; Nardi *et al.*, 1994; Muscolo *et al.*, 1998).

Pour le melon, l'apport d'une fertilisation organique en une seule fois à la plantation permet d'obtenir des rendements égaux ou supérieurs à ceux des parcelles fertilisées avec plusieurs apports d'azote minéral (à la plantation et en cours de culture par fertirrigation). On a enregistré, avec la fertilisation organique, une tendance à l'augmentation de 14 % de la productivité. Toutefois, ces rendements en melon ne dépendent pas du niveau de fertilisation azotée, et il est possible que les apports organiques permettent de lever un autre niveau de carence minérale non testée ici. De plus, sous tunnel froid, les conditions climatiques présentent une hétérogénéité due à la construction des abris. Elle peut être accentuée par les vents dominants et les effets d'ombrage pour des tunnels contigus, ce qui est le cas du dispositif étudié. Il sera donc nécessaire à l'avenir de réaliser des répétitions de mesures de rendements dans l'espace et dans le temps, afin de confirmer ou infirmer la tendance que l'on a observée.

De manière générale, pour mieux comprendre les effets ou non-effets observés sur les rendements, d'autres études sur les variations saisonnières des éléments nutritifs seraient nécessaires.

Solarisation

La solarisation exerce une fonction de phytoprotection en réduisant les populations et l'incidence des pathogènes (Katan, 1981 et 1996; Chen *et al.*, 1991; Gracia-Garza *et al.*, 1997; Chellemi *et al.*, 1997; Gullino *et al.*, 1998). Les températures des sols du dispositif (différences de l'ordre de 10°C entre sols solarisés et non solarisés) sont en accord avec ce qui a été décrit par d'autres auteurs (Chen et Katan, 1980; Chellemi *et al.*, 1997). Dans notre étude, le dis-

Tableau 5 - Coefficients de corrélation (r_1 , r_2) entre variables mesurées Y et teneur en carbone C ou teneur en éléments fins (A+Lf), couche 0-10 cm, n = 8, signification : * ($R_{0,05} = 0,6664$).

Table 5 - Correlation coefficients (r_1 and r_2 respectively) between measured characteristics (Y) and C or clay+fine silt (A+Lf) soil contents, 0-10 cm layer, n = 8, signification : * $R_{0,05} = 0,6664$

Y	r_1 (Y et C)		r_2 (Y et A+Lf)	
refus >2 mm	-0,536	ns	-0,220	ns
A+Lf	0,761	*	1	
Da sol total	-0,754	*	-0,369	ns
Da terre fine	-0,749	*	-0,480	ns
pF 2,7	0,649	ns	0,542	ns
pF 3,0	0,617	ns	0,516	ns
pF 4,2	0,788	*	0,615	ns
eau utile	0,544	ns	0,469	ns
agrégation	0,594	ns	0,044	ns
dispersion	-0,385	ns	-0,128	ns
pH eau	-0,152	ns	0,181	ns
pH KCl	-0,279	ns	0,083	ns
CEC	0,749	*	0,606	ns
Cations éch.	0,751	*	0,605	ns
P total	0,775	*	0,594	ns
P Olsen-Dabin	-0,726	*	-0,648	ns

ns = non significatif * = significatif à P = 0,95

Les caractéristiques Y sont décrites dans Matériel et méthodes

positif initial n'apparaissait pas fortement infesté, puisqu'en début d'expérimentation le taux maximum de mortalité de laitue due à *Sclerotinia* était de 7%. Malgré ces niveaux déjà faibles, non seulement la solarisation a diminué très fortement dès la première année la mortalité due à *Sclerotinia*, mais encore l'a éliminée totalement à partir de la deuxième campagne. Pour d'autres pathogènes de ces laitues comme *Botrytis* et *Rhizoctonia*, l'effet de la solarisation suit la même tendance (Arrufat *et al.*, 1998). Cela confirme l'efficacité d'une durée de traitement de 35-40 jours. Lorsque, par ailleurs, la solarisation est associée à l'apport de fertilisants organiques (principalement dans 3S), des molécules organiques volatiles à effet désinfectant peuvent être libérées au cours de la thermogenèse (Gamliel et Stapleton, 1997). Cet effet global de la solarisation a été nommé IGR, *Increased Growth Response* (Katan, 1981 et 1996; Chen *et al.*, 1991) quand il correspond à une augmentation de la productivité (+14% ici). Cet effet ne se retrouve pas chez le melon où la fonction de phytoprotection, si elle semble exister sur les pathogènes racinaires (Arrufat *et al.*, 1998), n'a pas la même intensité que sur la laitue.

Pratiques culturales, statut organique et caractéristiques des sols

L'apport d'amendements organiques à des doses importantes peut être utilisé pour maintenir ou augmenter les teneurs et stocks de MO des sols (Persson et Kirchmann, 1994; Wander *et al.*, 1994; Gerzabek *et al.*, 1997). L'analyse des profils de C (*figure 6a*) montre que dans notre expérimentation, l'effet de la fertilisation organique (comparaison 2S/3S) s'exprime essentiellement sur les 10 premiers cm. C'est en effet la zone d'apport privilégiée des fertilisants organiques, et le travail du sol concerne surtout les couches de surface. Entre 1994 et 1996, les apports totaux de C sur les demi-tunnels 2S et 3S ont été de 5,4 et 19 t MO ha⁻¹ (*tableau 1*), soit une différence de 13,6 t MO (ou 17 t de matière sèche, MS, venant essentiellement de Végethumus®). A partir des résultats du *tableau 2* on calcule, pour la couche 0-20 cm, une différence de stock de C (0-20 cm) de 5,18 t de C ((10,58+8,52)-(6,90+7,01)) soit 9 t MO (37% de la différence des apports). On peut alors calculer un "coefficient isohumique" (K_1 = rapport de la MO stable, après 3 ans, sur la quantité de MS apportée). Celui-ci (0,53) est inférieur à celui déterminé par le Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes de Carquefou (K_1 = ~0,6) à partir d'une étude expérimentale sur l'amendement Végethumus® dans un sol très sableux, en plein champ et sous climat atlantique. La différence entre ces deux valeurs peut provenir (i) du fait que, ici, la valeur de 0,53 inclue aussi bien l'amendement Végethumus® qu'un engrais organique Guanor® à taux de minéralisation élevé, (ii) que les conditions de minéralisation sous abri sont nettement plus élevées qu'en plein champ par suite des températures du sol plus fortes.

Cet effet de la fertilisation organique sur les teneurs en MO du sol s'accompagne d'une augmentation du C potentiellement minéralisable C_0 du sol (170 mg C kg⁻¹ pour 1S et 200 mg C kg⁻¹ pour 3S), soit une différence de 18%. Cette différence est toutefois nettement plus faible que la différence observée dans les teneurs en C total (41 %), ce qui est bien en accord avec une dynamique de stockage du C dans le sol dans les tunnels T3 et T4. Les constantes de vitesse de minéralisation k sont analogues pour les deux sols (elles ne diffèrent que de 5,5%). Elles sont plus élevées que celles décrites par Ajwa et Tabatabai (1994) pour des sols plus riches en C et en argile. Le coefficient de minéralisation du C (C_M) varie de 3,4 pour 1S à 2,5% pour 3S. Ils sont de l'ordre de ceux décrits pour d'autres sols sableux (-2,2%) par Hassink (1994).

L'effet de la fertilisation organique se traduit aussi par une diminution de la Da en surface, donc par une augmentation de la porosité, ce qui peut favoriser l'enracinement et le rendement d'une culture maraîchère de laitue sous abri (de Tourdonnet, 1998). L'apport de MO peut en effet augmenter la porosité en favorisant, par exemple, la stabilité de l'agrégation (Dalal et Bridge, 1996; N'Dayegamiye et Angers, 1996) mais d'autres

facteurs tels que la teneur en éléments fins ou le taux de refus > 2mm peuvent aussi être envisagés. Il s'avère qu'ici, les variations de porosité sont essentiellement dues à celles des teneurs en C pour les couches 0-10 et 10-20 cm ($r = -0,754$ et $-0,879$) et à celles du taux de refus >2mm ($r = 0,841$) pour la couche 20-40 cm.

A l'opposé, la solarisation n'induit pas de variations de teneurs en C, mais semble entraîner des diminutions de teneurs en N. Cette observation est en accord avec un effet connu de la solarisation sur la production de nitrates dans le sol (Chen et Katan, 1980; Chen *et al.*, 1991; Katan, 1981; Katan *et al.*, 1987) par suite de l'augmentation de fortes activités minéralisatrices liées à l'élévation de la température. Il faut toutefois noter que les différences absolues en teneur en N total entre ces situations solarisées ou non restent faibles.

Toutes situations confondues, on a pu mettre en évidence pour ce type de sol des relations étroites entre les teneurs en C et un certain nombre de propriétés édaphiques (Da, CEC, cations échangeables, P total, point de flétrissement permanent), ce qui est bien connu par ailleurs (de Boissezon, 1977; Moreau, 1983; Wilczynski *et al.*, 1993; Feller, 1994). La relation négative existant entre la teneur en C et le phosphore assimilable peut s'expliquer par l'application de fertilisation phosphatée minérale (donc P facilement disponible) sur les situations recevant peu d'amendements organiques (T1, T2) et pauvres en carbone. Sous l'effet de la fertilisation organique, l'ensemble des propriétés édaphiques paraît tendre vers une situation favorable pour les productions végétales. Même si les effets de ces modifications sur les rendements sont peu perceptibles à court terme, on peut penser qu'ils pourraient se cumuler à plus long terme.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Agriphyto Méditerranée et le CivamBio Languedoc Roussillon, ainsi que Messieurs Yvon Dumas et Louis-Marie Rivière pour leurs critiques et propositions constructives. Les travaux présentés ont été partiellement soutenus financièrement par une convention CIFRE entre l'Association Nationale de la Recherche Technique et la société Phalippou-Frayssinet S.A.

BIBLIOGRAPHIE

- Ajwa H. A. and Tabatabai M. A. (1994) - Decomposition of different organic materials in soils. *Biol Fert Soils* 18, 3, 175-182.
- Albuzio A., Dell'Agnola G., Dibona D., Concheri G., Nardi S. (1993) - Humic constituents of forest soils as plant growth regulating substances. pp 15-25. In *Soil biota, nutrient cycling, and farming systems*. Paoletti M.G., Foissner W., Coleman D. Edit. Lewis Publ. Boca Raton.
- Anonyme (1994) - Biophyto. In 'Rapport d'activité annuel d'Agriphyto', 12 p.
- Anonyme (1995) - Biophyto. In 'Rapport d'activité annuel d'Agriphyto', 39 p. + annexes.
- Anonyme (1996) - Biophyto. In 'Rapport d'activité annuel d'Agriphyto', 27 p. + annexes.
- Anonyme (1997) - Biophyto. In 'Rapport d'activité annuel d'Agriphyto', 25 p. + annexes.
- Anonyme (1998) - Biophyto. In 'Rapport d'activité annuel d'Agriphyto', 29 p. + annexes.
- Arrufat A., Dubois M., Marcotte P. and Martin C. (1998) - Désinfection alternative des sols et coûts de production Biophyto. *Culture Légumière*, H.S. Octobre, 22-26.
- Boissezon (de) P. (1977) - Essai de détermination du rôle des matières organiques dans la capacité d'échange des sols ferrallitiques. *Science du Sol* 2, 61-68.
- Bruand A., Duval O., Gaillard H., Darhout R., Jamagne M. (1996) - Variabilité des propriétés de rétention en eau des sols: importance de la densité apparente. *Etude et Gestion des sols* 3 (1), 27-40.
- Chellemi D.O., Olson S.M., Mitchell D.J., Secker I., McSorley R. (1997) - Adaptation of soil solarization to the integrated management of soilborne pests of tomato under humid conditions. *Phytopathology* 87: 250-258.
- Chen Y., Gamliel A., Stapleton J.J., Aviad T. (1991) - Chemical, physical, and microbial changes related to plant growth on disinfested soils. pp 103-129. In *Soil solarization*. J. Katan, J.E. De Vay Edit., CRC Press Publ., Boca Raton, FL, USA.
- Chen Y., Katan J. (1980) - Effect of solar-heating of soils by transparent polyethylene mulching on their chemical properties. *Soil Science*. 130 (5) : 271-277.
- Dabin B. (1967) - Méthode Olsen modifiée. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.* 5-3.
- Dalal R.C., Bridge B.J. (1996) - Aggregation and organic matter storage in sub-humid and semi-arid soils. pp 263-307. In *Structure and organic matter storage in agricultural soils*. Advances in Soil Science. Carter M.R., Stewart B.A. Edit. Lewis Publ., Boca Raton, FL, USA.
- Dommergues Y. (1960) - La notion de coefficient de minéralisation du carbone dans les sols. *L'agronomie tropicale* XV, 1, 54-60.
- Eilert B. H., Bettany J.R. (1995) - Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. *Can. J. Soil Sci.* 75: 529-538
- FAO-UNESCO-ISRIC (1988) - FAO-UNESCO soil map of the world: revised legend. *World soil resources report*, FAO, Rome, Italy, 119 pp.
- Feller C. (1994) - La matière organique dans les sols tropicaux à argile 1:1 : recherche de compartiments organiques fonctionnels. Une approche granulométrique. Thèse de doctorat, Univ. Strasbourg (ULP).
- Gamliel, A., Stapleton J. J. (1997) - Improvement of soil solarization with volatile compounds generated from organic amendments. *Phytoparasitica* 25: S31-S38.
- Gerzabek M. H., Pichimayer F., Kirchmann H., Haberhauer G. (1997) - The response of soil organic matter to manure amendments in a long-term experiment at Ultuna, Sweden. *Eur. J. Soil Sci.* 48, 2, 273-282.
- Gracia-Garza J. A., Reeleder R. D., Paulitz T. C. (1997) - Degradation of sclerotia of *Sclerotinia sclerotiorum* by fungus gnats (*Bradysia coprophila*) and the biocontrol fungi *Trichoderma* spp. *Soil Biol. Biochem* 29, 2, 123-129.
- Gullino M. L., Minuto A., Garibaldi A. (1998) - Improved method of bench solarization for the control of soilborne diseases in basil. *Crop Protection* 17, 6, 497-501.
- Hassink J. (1994) - Effects of soil texture and grassland management on soil organic C and N and rates of C and N mineralization. *Soil Biol. Biochem* 26, 9, 1221-1231.
- Katan J. (1981) - Solar-heating (solarisation) of soil for control of soil-borne pests. *Ann. Rev. Phytopathol.* 19: 211-236.
- Katan J. (1996) - Soilborne pathogens and concepts related to their control. pp

- 250-278. In Principles and practices of managing soilborne pathogens, 342 pp. Chap 12 Soil solarization: integrated control aspects. R. Hall Edit., APS Press Publ., St Paul, MA, USA.
- Katan J., Grinstein A., Greenberger A., Yarden O., De Vay J.E. (1987) - The first decade (1976-1986) of soil solarisation (solar-heating): a chronological bibliography. *Phytoparasitica*. 15 (3): 229-255.
- Kemper W.D., Rosenau R.C. (1986) - Aggregate stability and size distribution. pp 425-441. In *Methods of soil analysis. Part 1, 2nd ed.* Agron. Monogr. 9. Klute A. Edit. ASA and SSSA. Madison, WI, USA.
- Kouakoua E., Sala G.-H., Barthès B., Larré-Larrouy M.-C., Albrecht A., Feiler C. (1997) - La matière organique soluble à l'eau chaude et la stabilité de l'agrégation. Aspects méthodologiques et application à des sols ferrallitiques du Congo. *Eur. J. Soil Sci.* 48: 239-247.
- Martin C., Thicoïpé J.-P. (1994) - La solarisation. Une désinfection des sols alternative ou complémentaire des fumigants chimiques? *Phytoma. La défense des végétaux*. 464, 34-36.
- Moreau R. (1983) - Evolution des sols sous différents modes de mise en culture en Côte d'Ivoire forestière et préforestière. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.* 20, 4, 311-325.
- Muscolo A., Cutrupi S., Nardi S. (1998) - IAA detection in humic substances. *Soil Biol. Biochem.* 30 (8-9): 1199-1201.
- N'Dayegamiye A., Angers D.A. (1990) - Effets de l'apport prolongé de fumier de bovins sur quelques propriétés physiques et biologiques d'un loam limoneux Neutrois sous culture de maïs. *Can. J. Soil Sci.* 70: 259-262.
- Nardi S., Panuccio M.R., Abenavoli M.R., Muscolo A. (1994) - Auxin-like effect of humic substances extracted from faeces of *Allolobophora caliginosa* and *A. rosea*. *Soil Biol. Biochem.* 26 (10): 1341-1346.
- Persson J., Kirchmann H. (1994) - Carbon and nitrogen in arable soils as affected by supply of N fertilizers and organic manures. *Agric. Ecosyst. Environ.* 51, 1-2, 249-255.
- Richards L. A. (1947) - A pressure membrane apparatus construction and use. *Agric. Eng.* 28: 451-454.
- Rouiller J., Souchier B., Bruckert S., Feiler C., Toutain F., Vedy J.C. (1994) - Méthodes d'analyses des sols. pp 619-652. In *Constituants et propriétés du sol. Pédologie.2.* Bonneau M. et Souchier B. Edit. Masson, Paris, France.
- Servat E., Callot G., (1966) - Notice explicative de la carte des sols du Roussillon, 68 pp. INRA Service d'étude des sols, ENSA Montpellier, France.
- Thuriès L., Larré-Larrouy M.-C., Pansu M. (2000) - Evaluation of three incubation designs for mineralization kinetics of organic materials in soil. (sous presse dans *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*).
- Tourdonnet (de) S. (1998) - Maîtrise de la qualité et de la pollution nitrique en production de laitues sous abri plastique : diagnostic et modélisation des effets des systèmes de culture. Thèse de doctorat INA-Paris Grignon, France.
- Wander M. M., Traina S. J., Stinner B. R. and Peters S. E. (1994) - Organic and conventional management effects on biologically active soil organic matter pools. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58, 4, 1130-1139.
- Wilczynski A. W., Renger M., Jozefaciuk G., Hajnos M. and Sokolowska Z. (1993) - Surface area and CEC as related to qualitative and quantitative changes of forest soil organic matter after liming. *Z Pflanz Bodenk* 156, 3, 235-238.

