

Gestion des apports organiques en systèmes de culture maraîchers

(Abri en conversion à l'agriculture biologique)

2002-2010
Rapport final

F.Bressoud, L.Parès



OBJECTIF DE L'ESSAI

L'agriculture biologique repose sur des apports fréquents de matière organique pour maintenir un bon fonctionnement du sol. Ces apports sont particulièrement importants en cas de reconversion de sol en maraîchage, les sols étant dans ce cas généralement appauvris en matière organique. Avec la raréfaction des ressources en fumier, les composts du commerce sont les plus fréquemment utilisés, ainsi que depuis quelques années les composts de déchets verts, économiquement très intéressants mais de composition mal connue.

Tout apport organique contient une fraction minéralisable, variable selon le produit et les caractéristiques pédoclimatiques et culturales, qui pourra participer en arrière effet à la nutrition des microorganismes puis des plantes, et une fraction stable qui en s'intégrant à la matrice du sol pourra modifier ses propriétés physico-chimiques.

L'expérimentation conduite vise à mieux connaître l'évolution des 2 types de compost les plus fréquents sur du moyen terme (8 années) en système maraîcher sous abri, afin d'optimiser les pratiques dans un double objectif : améliorer les états du sol et prendre en compte la minéralisation azotée pour mieux alimenter les plantes, notamment les cultures longues d'été pour lesquelles les engrais organiques usuels ne permettent pas une alimentation tardive correcte.

INRA Domaine horticole du Mas Blanc 66200 Alénia
tél 04 68 37 74 00 - fax 04 68 37 74 10
bressoud@supagro.inra.fr, pares@supagro.inra.fr

MATERIEL ET METHODES	3
Traitements expérimentaux	3
Mesures expérimentales.....	3
RESULTATS.....	5
Conduite des cultures.....	5
Successions de culture	5
Climat de l'abri	7
Conduite des irrigations	7
Conduite de fertilisation	8
Caractérisation initiale du sol et des produits organiques :.....	9
Caractérisation des produits organiques	9
Compositions physico-chimiques.....	9
Indices de stabilité organique.....	10
Dynamique de minéralisation.....	10
Etat organique initial du sol.....	11
Conséquence sur le sol après 9 années d'apport	12
Influence des amendements sur les propriétés chimiques du sol	12
Gain de matière organique.....	12
Evolution de la composition minérale du sol.....	14
Conclusion.....	15
Influence des amendements sur les propriétés biologiques du sol.....	16
Dynamiques de minéralisation	16
Biomasse microbienne	17
Conclusion.....	17
Influence des amendements sur les propriétés physiques du sol.....	18
Profils culturaux.....	18
Profils racinaires.....	18
Densité apparente	19
Pénétrométrie.....	19
Infiltrométrie.....	20
Conclusion.....	20
Incidences sur les cultures	20
Nutrition des cultures	20
Dynamique pour l'alimentation azotée	20
Contribution pour la nutrition en éléments majeurs	22
Résultats commerciaux.....	23
Conclusion	25
CONCLUSION GENERALE	25

MATERIEL ET METHODES

Traitements expérimentaux

L'expérimentation est conduite dans le cadre d'une conversion sur sol sablo-limoneux peu structuré, pauvre en matière organique (1.3%²), avec comparaison sur 9 ans de différentes stratégies d'apport de matière organique amendantes (produit, dose).

Dans une bi-chapelle de 450m², on réalise 4 traitements correspondant aux apports annuels suivants :

DV24	compost de déchets verts ³	24t/ha/an	dose usuelle
VG13	compost commercial végéthumus	13t/ha/an ⁴	dose correspondant à un apport de matière organique proche de celui du traitement précédent
VG4	compost commercial végéthumus ⁵	4t/ha/an ⁶	dose usuelle
T	témoin sans apport		

Sur l'ensemble de l'abri, les apports de terreaux par les plantations correspondent à environ 3.5T de matière sèche par ha et par an.

La rotation culturale couvre 2 années, avec une succession salade-tomate-salade-salade (et désinfection solaire le 2^{ème} été avant de reprendre un nouveau cycle).

Mesures expérimentales

La structure d'un abri génère de très grandes hétérogénéités climatiques, auxquelles se rajoute ici des variations spatiales pédologiques et techniques (géométrie des irrigations, historique de la parcelle,...). Les mesures ont donc été localisées dans la zone centrale la plus homogène climatiquement de l'abri, et chaque traitement correspond à ¼ de l'abri, avec 3 parcelles de mesure⁷ successives de 3m² constituant une maille élémentaire de distribution de l'eau par l'irrigation (Annexe 2 : Dispositif expérimental). Face au manque de surface, ce regroupement des parcelles permet ainsi d'éviter une dissémination progressive des épandages d'un traitement à l'autre par le travail du sol au cours du temps, sachant qu'aucun autre dispositif n'aurait pu permettre de contrôler statistiquement les nombreux facteurs d'hétérogénéités recensés.

On ne dispose donc pas sur cette expérimentation de véritables répétitions par traitement. Pour remédier à cela, on essaiera de coupler comparaison synchronique avec le témoin non amendé et évolution diachronique de chacun des traitements, afin de pouvoir discuter de l'influence des facteurs du milieu.

Sur ces 12 placettes sont mesurés tout au long de l'expérimentation (Annexe 3):

- Les tensions en eau à 20 et 30 cm (2 fois/par semaine) pour l'ajustement des irrigations
- L'humidité et la richesse du sol en nitrates par prélèvements sur 0-30cm et 30-50cm⁸ (en encadrement des changements d'occupation du sol)
- Les rendements des cultures, les calibres, le taux et la notation des causes de déchets
- La production en matière sèche ainsi que les teneurs en d'azote d'un échantillon représentatif de plantes à la récolte⁹ de chaque culture, ainsi qu'en phosphore, potasse et magnésie sur certaines cultures seulement.

² Mesure du carbone par méthode Anne

³ Broyat de déchets verts (bois de taille, élagage, débroussaillage, tonte de pelouse) compostés 6 mois (plate-forme de Saint Cyprien)

⁴ dose estimée correspondre à des apports de matière organique stable équivalents à ceux de compost de déchets verts

⁵ chiquettes de mouton (10%), tourteaux de café (5.5%), fumier de bergerie composté (30%) (Phalippou-Frayssinet)

⁶ dose préconisée

⁷ correspondant à 42 laitues ou 6 plants de tomate

⁸ moyenne de 4 prélèvements aux 4 coins de la placette (correspondants à une variabilité maximum structurée par la distance aux asperseurs)

Les températures d'air en milieu d'abri et de sol aux 4 extrémités de la zone de l'essai sont enregistrées journalièrement.

En milieu (2006) et fin (2010) d'expérimentation sont également effectués :

- des cinétiques d'incubation des sols, afin de mesurer les dégagements de C et N.
- des profils de sol sont réalisés derrière laitue pour caractériser la structure, mesurer les densités apparentes et étudier la répartition des racines en profondeur
- Des fractionnements granulométriques¹⁰ des sols, afin de mieux comprendre l'évolution de la matière organique endogène et exogène du sol. Cette mesure a pour objectif de suivre les évolutions granulométriques de nos apports organiques au sein du sol, sachant que l'humification correspond à un fractionnement croissant jusqu'à la matière organique liée aux argiles, qui confère aux sols des propriétés physico-chimiques stables intéressantes.

Le principe est de séparer les différentes fractions sableuses, limoneuses et argileuses du sol pour quantifier et caractériser (concentration en C et N) la matière organique qui leur est liée. Pour chaque traitement, on a prélevé en 2001, 2006 et 2010 dans des profils de sol à 3 profondeurs différentes (7, 17 et 35 cm) avec 3 répétitions, ainsi que des carottages sur 0-30 cm dans l'ensemble des placettes en 2010.

Un point initial a également été réalisé en 2001 pour ces 2 dernières mesures

Enfin en 2010, le bilan final intègre sur l'ensemble des placettes des mesures supplémentaires pour évaluer les changements éventuels induits après 9 années d'apport d'amendement :

- infiltrométrie avec méthode simplifiée biercan , permettant d'apprécier la macroporosité du sol
- biomasse microbienne sur des échantillons de sol de l'horizon 0-30 cm
- pénétrométrie

Les amendements organiques ont été décomposés en 5 fractions (solubles, hémicellulose, cellulose, lignine et cutine et minéral inerte) à partir desquelles sont calculé les indicateurs ISB et Tr.

En 2002, des incubations longues (130 jours à 30°C) ont été réalisées sur les 2 produits Vg et DV, permettant de connaître leurs cinétiques de minéralisation du carbone et de l'azote . De ces résultats ont pu être extrait la quantité de carbone minéralisé à 3 jours pour calculer l'indicateur ISMO, nouvelle référence AFNOR pour évaluer la valeur amendante d'un produit organique.

Des analyses chimiques ont également été réalisés sur les produits épandus en 2002, 2006, 2008 et 2009.

⁹ tirage au sort de 6 plantes dans chaque parcelle, humidité individuelle et composition en azote du lot de 6

¹⁰ Laboratoire IRD (5 fractions) en 2006, laboratoire Célesta (3 fractions) en 2010

RESULTATS

Conduite des cultures

Successions de culture

Le système de culture consiste en une succession salade-tomate en 1ère année, puis 2 salades et désinfection solaire la 2ème année avant de reprendre un nouveau cycle.

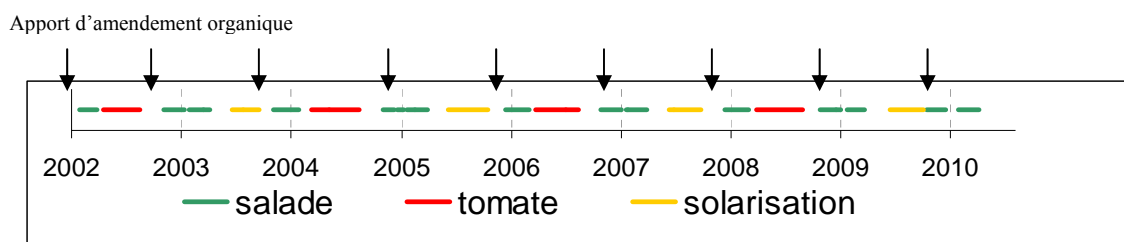
La durée d'expérimentation couvre 4 cycles culturels, avec 4 désinfections solaires, en alternance une année sur 2 avec 4 cultures de tomates, et au total 14 cultures de salades (plus une salade supplémentaire au printemps 2010).

campagne	culture	N° ordre	Début (plantation)	Fin (récolte)	Nombre de jours
2001-2002	Salade	1	25/01/2002	26/03/2002	60
	Tomate	1	16/04/2002	19/08/2002	125
2002-2003	Salade	2	06/11/2002	14/01/2003	69
	Salade	3	27/01/2003	08/04/2003	71
	Désinfection solaire	1	22/06/2003	17/09/2003	88
2003-2004	Salade	4	03/11/2003	26/01/2004	84
	Tomate	2	12/03/2004	15/08/2004	156
2004-2005	Salade	5	02/11/2004	12/01/2005	71
	Salade	6	19/01/2005	01/04/2005	72
	Désinfection solaire	2	10/06/2005	17/10/2005	129
2005-2006	Salade	7	15/12/2005	07/03/2006	82
	Tomate	3	24/03/2006	17/08/2006	146
2006-2007	Salade	8	31/10/2006	08/01/2007	69
	Salade	9	19/01/2007	02/04/2007	73
	Désinfection solaire	3	13/06/2007	27/09/2007	106
2007-2008	Salade	10	14/12/2007	04/03/2008	81
	Tomate	4	28/03/2008	29/08/2008	154
2008-2009	Salade	11	29/10/2008	05/01/2009	68
	Salade	12	27/01/2009	27/03/2009	59
	Désinfection solaire	4	17/06/2009	08/10/2009	113
2009-2010	Salade	13	16/10/2009	18/12/2009	63
	Salade	14	03/02/2010	08/04/2010	64

Tableau 1: Calendrier des cultures

L'épandage d'amendement a lieu à chaque début de campagne, vers la mi novembre, soit à 9 reprises en cours d'expérimentation.

Figure 1 : Représentation de l'occupation du sol

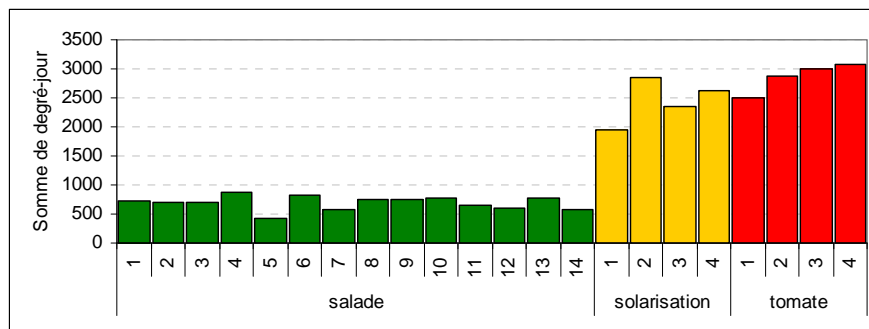


6

Climat de l'abri

Les enregistrements horaires des températures 50 cm au centre de l'abri permettent de calculer la somme des degrés-jour¹¹.

Figure 2 : Somme des degrés-jours pour les différentes occupations du sol



Aux écarts de durée correspondent pour la tomate et surtout pour la solarisation des cumuls de température différents, qui pourront créer des différences d'un cycle de culture à l'autre.

Les températures de sol à -20 cm varient elles assez peu selon les cycles, et se différencient fortement selon l'occupation du sol. Les moyennes à 20 cm de profondeur durant les cultures sont de 13 à 15°C selon les salades, et autour de 22°C pour les tomates. Lors d'une solarisation, elles s'établissent autour de 36°C de moyenne durant l'été, avec des maxima journaliers variables, autour de 41 °C mais atteignant 44°C les années les plus chaudes (2003).

Ces températures rendent compte de différences thermiques au sein de l'abri, avec près de 1°C d'écart au sein de l'abri.

Conduite des irrigations

Sur ce système de culture, on utilise alternativement l'aspersion sur laitue¹² et le goutte à goutte¹³ sur tomate. Les 2 chapelles de l'abri peuvent être gérées indépendamment en aspersion, ce qui permet d'arroser DV et VG4 différemment de VG13 et T, situées dans la chapelle la plus exposée à l'évaporation comme l'ont montré les différences de températures mesurées.

Les cultures sont irriguées en fonction de la tension du sol pour permettre le maintien d'un bon confort hydrique sans excès d'eau.

Tableau 2: Consommation théorique et irrigation des cultures

Culture	ordre	Irrigation (en l/m ²)	Besoin théorique	<i>Compensation du déficit théorique</i>
			Kc x ETP	
salade	1	95	114	83%
	2	134	176	76%
	3	74	141	53%
	4	68	131	52%

¹¹ cumul des températures moyenne journalières durant la période concernée par la culture ou l'opération culturale

¹² 2 rampes par chapelle, asperseurs Naan 2110 (12 l/m²/h)

¹³ 1 goutteur de 2l/h/plante (4l/m²/h).

	5	76	89	85%
	6	79	136	58%
	7	81	137	59%
	8	75	151	50%
	9	120	202	59%
	10	127	185	69%
	11	117	136	86%
	12	85	147	58%
	13	85	92	93%
	14	106	137	77%
Tomate	1	276	436	63%
	2	230	563	41%
	3	279	415	67%
	4	372	498	75%
Total en culture		2 479	3 886	64%
Total sur l'ensemble de la période		2698	4292	63%

Ceci conduit à des apports très modérés, inférieurs aux consommations estimées par le calcul à partir de l'ETP.

Les mesures d'humidité dans le sol confirment cependant que le confort hydrique est assuré pour les plantes.

Sur la durée total de l'essai, on apporte également près de 430 mm pour différents plein en eau.

Au total, en considérant la totalité des apports et en intégrant un assèchement théorique de 50% de l'ETP lors des périodes de sol nu, on atteindrait un déficit hydrique de près de 37%.

Conduite de fertilisation

La fertilisation est faite en fonction de résultats d'analyse de sol sur 0-30 cm :

- par redressement pour le phosphore et la potasse selon analyse complète tous les 3 ans (soit 444 kg K₂O/ha apporté sous forme de patentkali en mars 2006)
- La fertilisation azotée avec de la farine de plume hydrolysée est ajustée par test bandelette nitrate pour chaque culture et chaque traitement à des niveaux seuils faibles¹⁴, permettant le démarrage des cultures .

L'objectif est de créer des carences azotées pour pouvoir déceler sur les cultures une éventuelle contribution des composts à l'alimentation azotée des cultures.

Tableau 3: fertilisation azotée des cultures

Culture	ordre	Fertilisation (kgN/ha)			
		DV24	VG4	VG13	T
salade	1				
	2				
	3	14	14	14	14
	4				
	5				
	6	38	38		38
	7				
	8	44	44	33	48
	9				
	10	70	79	51	89

¹⁴ 40kgN/ha pour la salade d'automne, 50 kgN/ha pour la salade d'hiver, 80kgN/ha pour la tomate.

	11				
	12	60	60	60	60
	13				
	14				45
Tomate	1	16	16	16	16
	2				
	3	30	30	30	30
	4	70	70	70	70
Total en culture		342	351	274	410
Différence par rapport au témoin KgN/ha (%)		-68	-59	-136	-
		-17%	-14%	-33%	

Au total, les apports sur 8 années sont faibles, entre 270 et 410 KgN/Ha selon les traitements.

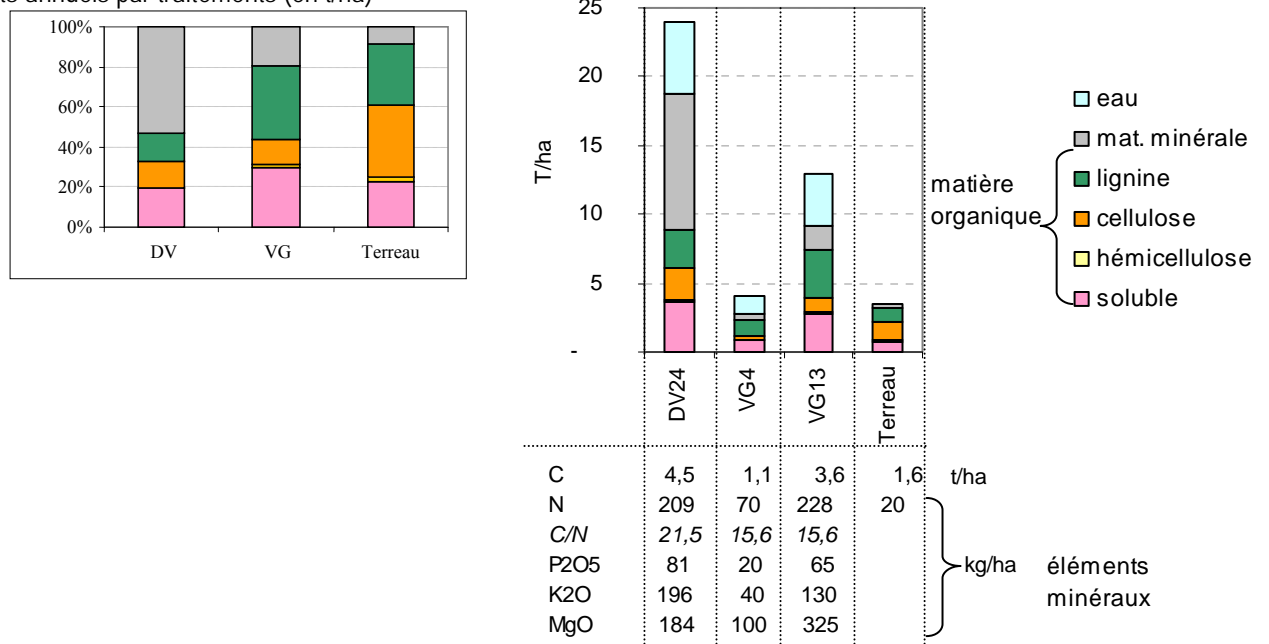
Caractérisation initiale du sol et des produits organiques :

Caractérisation des produits organiques

Compositions physico-chimiques

Un fractionnement granulométrique a été effectué pour caractériser les produits organiques utilisés.

Figure 3 : Fractionnement biochimique des produits organiques (en % de la matière sèche) et reconstitution des apports annuels par traitements (en t/ha)



L'apport involontaire au sol de terreau par les mottes de plantation est loin d'être négligeable, puisqu'il atteint 0,8 TC/ha/culture, soit avec le système de culture choisi une quantité de matière organique équivalente à celle de l'apport du compost commercial à la dose préconisée (VG4).

Les 3 types de produits ont des caractéristiques physico-chimiques différentes, qui pourront donc correspondre à des dynamiques de minéralisation et d'accumulation contrastées.

Indices de stabilité organique

A partir de la composition biochimique des produits, on peut calculer différents indicateurs d'évolution.

Tableau 4 : Principaux indicateurs d'évolution de la matière organique des produits apportés au sol

Produit	C/N	Taux résiduel % /MO	
		ISMO ¹⁵	ISB ¹⁶
Terreau	87.5	-	88.2
DV	21.6	87.8	42.7
VG	15.6	86.5	87.4

Le taux de matière organique résiduelle théorique correspond à la part humifère de la matière organique apportée, qui restera au sol après évolution du produit.

On remarque l'absence de correspondance entre ces taux et le C/N des produits utilisés.

L'indicateur ISMO permet théoriquement une meilleure prise en compte des évolutions sur le long terme de ce type de produits que l'ISB. D'après ces valeurs, la matière organique du compost VG, comme celui du terreau apporté par les mottes, enrichirait proportionnellement plus le sol que celle du DV. A taux d'apport identique, on devrait donc trouver une accumulation plus importante à terme dans le traitement VG13 que dans DV24.

Dynamique de minéralisation

Les 2 composts ont été mis en incubation après incorporation à du sol moyen, à raison de 0.5G pour 30g de sol sec, soit l'équivalent d'environ 80 t/ha.

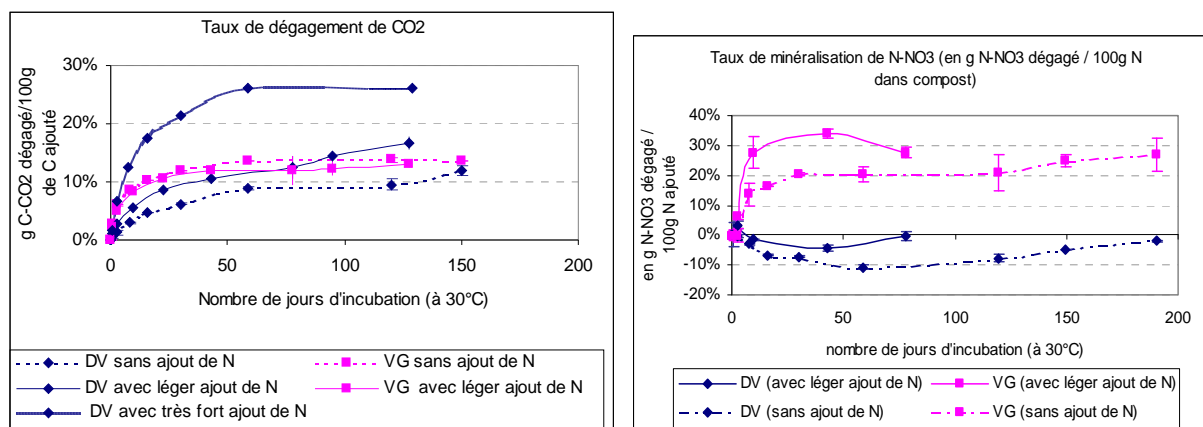
Plusieurs protocoles ont été testés :

- Composts seuls
- Compost DV24 avec ajout de fortes quantité d'azote (équivalent à 1000kgN/ha)
- Composts avec ajout de faible quantité de d'azote (100mgNO₃/kg sol sec, soit l'équivalent de 95kgN/ha)¹⁷ effectués en 2004

} Effectué en 2001

Les dégagements de carbone et de nitrates sont présentés dans les 2 figures ci-dessous, en pourcentage des éléments contenus dans les 2 produits.

Figure 4 : Dégagement de carbone et de nitrates des 2 composts (en %)



¹⁵ ISMO Indice de Stabilité de la MO (exprimé en pourcentage du carbone organique des composts) se calcule selon :

$ISMO = 44.5 + 0.5 SOL - 0.2 CEL + 0.7 LIC - 2.3 MinC3$ avec SOL, CEL et LIC les fractions biochimiques soluble, cellulose et lignine du fractionnement Van Soest (en pourcentage de la matière organique) et MinC3 la proportion du C organique des composts minéralisée après 3 jours d'incubation (XPU 44-162, AFNOR, sous presse ; Lashermes et al., 2009)

¹⁶ Indice de stabilité biologique ISB = $0.3221SOL - 0.7155HEM + 1.8919LIC + 0.0271MIN$

¹⁷ prototype de protocole BNSCAO 2000

Les 2 composts présentent des cinétiques de minéralisation très différentes.

En l'absence d'ajout d'azote, le dégagement de CO₂, indicateur de l'activité biologique liée à la dégradation de la matière organique, est tout d'abord plus faible pour DV que pour VG, avant de le rattraper en fin d'incubation, quand l'azote ne devient plus limitant. Avec un fort enrichissement en azote, le compost de déchet vert montre une activité cette fois bien supérieure. On peut donc avoir un blocage par manque d'azote des évolutions du produit DV. Ceci était prévisible du fait de son C/N un peu élevé, signe d'un produit probablement insuffisamment mature. Le protocole de préparation des échantillons équivalant à un épandage bien plus important que celui réellement effectué au champ (79t/ha au lieu de 24t/ha dans un même sol), il est probable que ce phénomène est très fortement exagéré dans cette incubation.

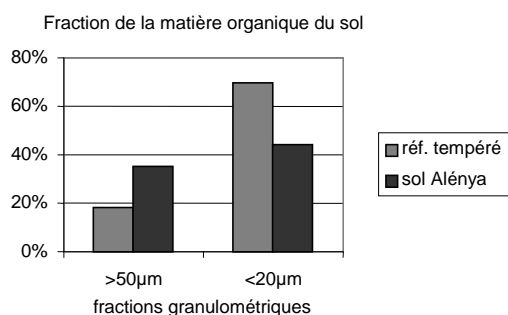
En ce qui concerne l'azote, on a pour VG une libération rapide de nitrates qui atteint dès 60 jours un plateau autour de 30% de l'azote contenu dans le produit, soit 1.8kgN/t. cette minéralisation importante, atypique pour un compost, correspond probablement à une fraction organique, sans doute d'origine animale, qui se comporte indépendamment du reste du produit à la façon d'un engrais. Pour le DV, on a en revanche une immobilisation d'azote, plus ou moins longue selon la disponibilité de l'azote dans le sol. Pour 24 t/ha de compost, il suffirait d'avoir environ 50kgN-NO₃/ha pour obtenir la courbe correspondant au léger ajout de N, pour laquelle l'azote immobilisé commence à être restitué au bout de 80 jours d'incubation. C'est cette courbe que l'on considérera donc comme la plus probable.

Etat organique initial du sol

Avec sur 0-30 cm en moyenne 7g/kg¹⁸ de sol sec, soit autour de 52 t/ha de matière organique, nos données correspondent bien aux valeurs d'un sol méditerranéen conduit en maraîchage sous abri¹⁹, et sont inférieures à celle de sol de climat tempéré (autour de 50 à 70 t C/ha).

Le graphique suivant présente la répartition moyenne du C total du sol selon 2 classes de granulométrie en comparaison avec un sol moyen de région tempérée.

Figure 5: Fractions fines et grossières de matière organique dans le sol



Par rapport au sol moyen, le sol d'Alénya montre :

- beaucoup de formes grossières supérieures à 50µm, peu évoluées (38% du total au lieu de 15%), avec un C/N de 21 très élevé
- peu de formes stables inférieures à 20µm (44% au lieu de 70%), avec un assez faible complexe argilo-humique (13gC/kg argile contre 40)

Il est probable que les pratiques culturales maraîchères²⁰ en culture conventionnelle expliquent ces tendances : forte dynamique de minéralisation (travail du sol fréquent et avec des outils très agressifs,

¹⁸ moyenne de 12 mesures et 2 profondeurs

¹⁹ cf L.Thuriès., in Biol Fertili Soils, nov 99

²⁰ parcelle en vigne jusqu'en 1968, puis en maraîchage (20 ans en plein champ, depuis 15 ans sous abri)

microclimat chaud et humide) qui tend à détruire les formes stables, et peu d'apports organiques, hormis le terreau des mottes de plantation, peu dégradable.

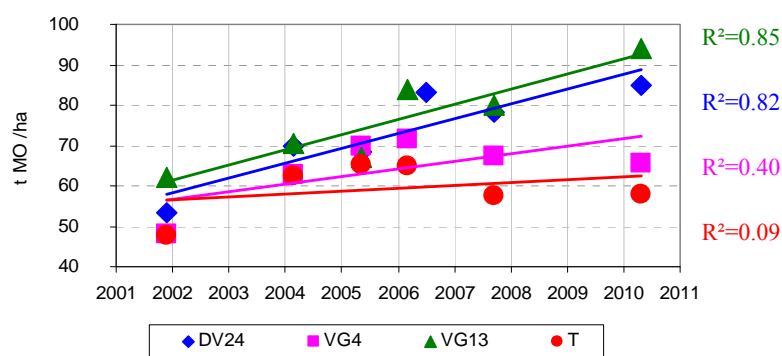
Conséquence sur le sol après 9 années d'apport

Influence des amendements sur les propriétés chimiques du sol

Gain de matière organique

Le carbone contenu dans les horizon 0-30 cm est régulièrement analysés au fil de l'expérimentation, et convertie en quantité de carbone (coefficient de 1,72).

Figure 6 : Evolution du stock de matière organique dans le sol au cours selon les traitements (par analyse du carbone méthode Anne)

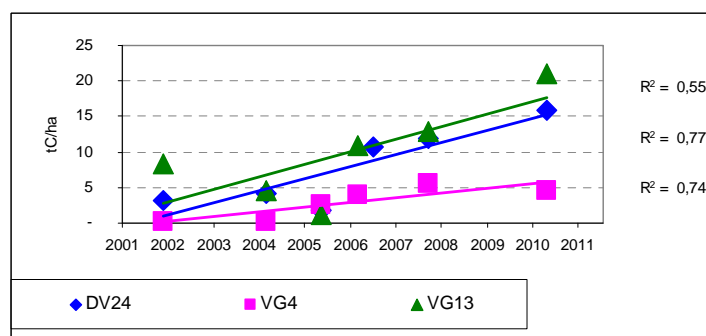


Les apports réguliers de fortes doses de matières organiques (DV24 et VG13) entraînent une augmentation nette des valeurs mesurées, alors qu'un faible apport (VG4) ne semble pas se différencier du traitement sans apport (T).

Le témoin sans apport s'enrichit légèrement au cours du temps. L'évolution normale d'un sol étant de perdre chaque année de 2 à 3% de matière organique par la minéralisation, cette augmentation s'explique par le seul apport que représente le terreau apporté à chaque culture par les mottes de plantation.

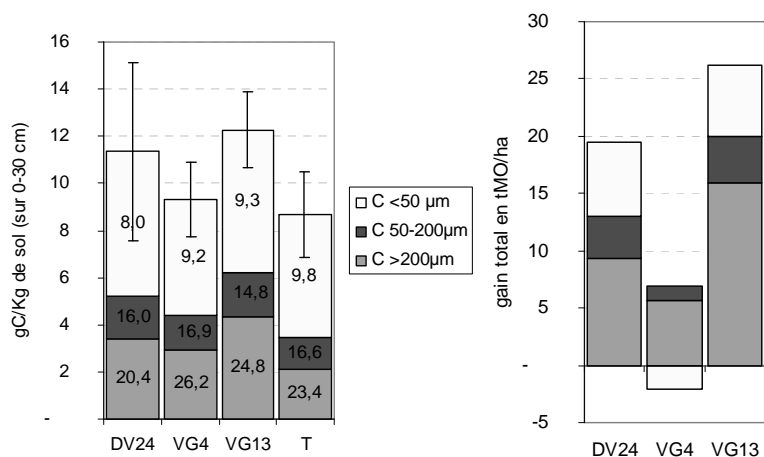
Le gain net de carbone dans le sol lié aux différents amendements et selon leur dose est obtenu par différence avec le témoin. Il serait d'une quinzaine de tonnes de carbone pour les 2 apports à fortes doses DV24 et VG13, et d'environ 5tC/ha pour VG4, soit à peu près de 35% à 45% du carbone apporté pour chacun d'eux. Ces chiffres sont inférieurs à ceux prédit par l'indice ISMO, plus proche de 80%. Ceci pourrait s'expliquer en partie du fait de l'accumulation de fractions supérieures à 2 mm, non prises en compte dans l'analyse, dont la présence est flagrante en ce qui concerne le traitement avec le déchet vert.

Figure 7: Gain de carbone organique dans le sol par rapport au témoin (bilan 2010)



En fin d'expérimentation, des prélèvements représentatif des horizons travaillé (0-30 cm) des placettes de suivi a été fractionné en laboratoire (Célesta).

Figure 8 : Fractions et C/N de la matière organique du sol selon les traitements après 9 années d'apport



On retrouve bien au total le même ordre de valeurs pour chaque traitement qu'avec l'analyse globale précédente.

En ce qui concerne le témoin sans apport, l'enrichissement constaté est confirmé par rapport aux point initial, avec une proportion relativement semblable de fractions fines et grossières, de même équilibre en C/N. Cette analyse n'indique donc pas de différences notables en 9 années d'apport, sur il est vrai un total de près de 25 ans de conduite assez similaire.

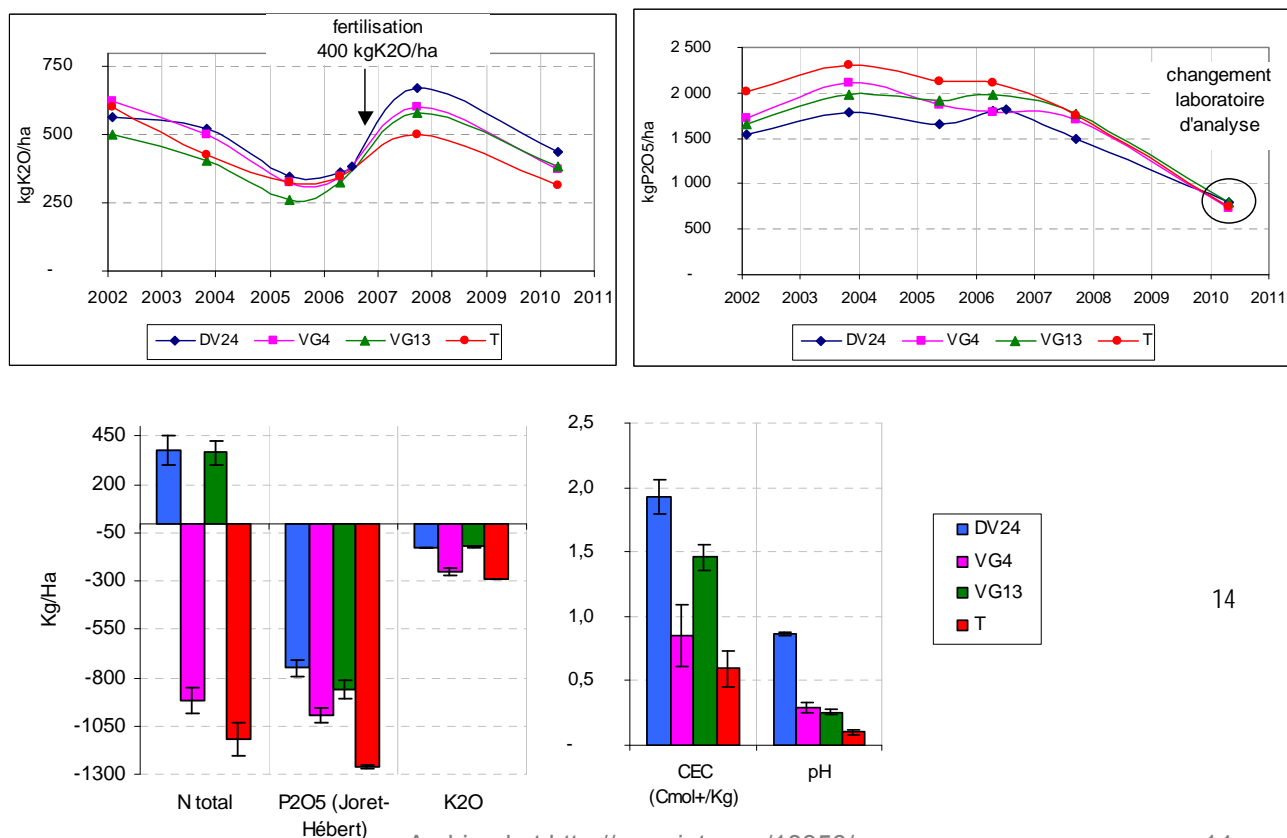
On obtient par ailleurs avec les 2 traitements à fortes doses DV24 et VG13 le même enrichissement en fraction fine stable, ce dernier augmentant également d'avantage la fraction grossière 200-2000µm. Il faut cependant noter que des fractions supérieures à 2mm, non prises en compte dans cette analyse, sont importantes en proportion dans le déchet vert et visiblement accumulées de manière conséquentes dans le profil pour DV24.

Le traitement DV24 permet également de baisser le rapport C/N de l'ensemble des fractions. Ces différences pourraient tendre à terme à une minéralisation différée plus importante pour le déchet vert.

Evolution de la composition minérale du sol

Les résultats présentés Figure 9 montrent les différences mesurées entre 2010 et 2002, avec outre les apports de composts des redressements de 450 kg/Ha de potasse en 2006 sous forme de patentkali.

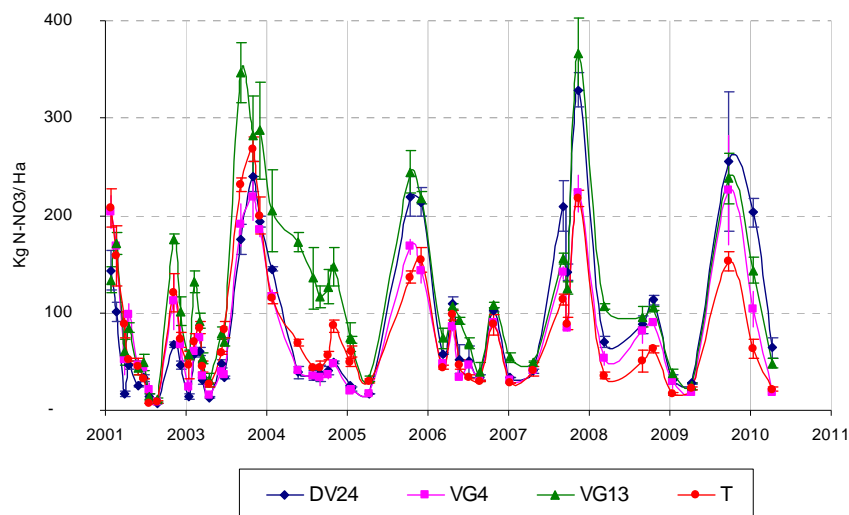
Figure 9 : Evolution des caractéristiques chimiques du sol selon les traitements (entre 2010 et 2002)



Les éléments minéraux contenus dans les composts limitent l'appauvrissement du sol, mais à hauteur de seulement 20% à 30% des apports pour le phosphore et la potasse, le solde après 8 années de culture restant négatif. Pour l'azote, un gain existe avec les fortes doses de compost, et représente autour de 60% des apports. L'amélioration de la capacité d'échange cationique (CEC) est notable, particulièrement par le compost de déchet vert, en relation avec une élévation de presque 1 point du pH.

Les nitrates ont été suivis plus régulièrement grâce à un dosage par colorimétrie²¹ dans les horizons 0-30 cm et 30-50 cm.

Figure 10 : Nitrates sur 0-50 cm (en kg N-NO₃/Ha)



Les valeurs augmentent cycliquement l'été, particulièrement les années avec solarisation mais également quoique avec moins d'ampleur lorsqu'il y a une culture de tomate. Les valeurs sont fréquemment plus importantes pour VG13 et DV24 à partir de la 4^{ème} année, et inférieures dans le sol témoin T. Le traitement VG4 ne se distingue du témoin qu'après la 7^{ème} année d'apport.

Conclusion

Avec ces systèmes de culture, il n'y a pas d'appauvrissement apparent de la matière organique du sol, malgré des conditions favorables à sa dégradation, du fait du terreau amené par les mottes de plantation. Ceci explique probablement que l'on retrouve dans de tels sols une fraction grossière assez importante, à C/N élevé.

Les forts apports de compost entraînent une accumulation régulière et sensible de matière organique dans le sol, peu décelable pour les apports plus limités (VG4). Ces accumulations de matière organique ne sont pas très bien simulées pour les 2 composts par les indicateurs existants, ISMO ou

²¹ bandelette Merck et réflectomètre RQFlex

ISB, qui laisserait présager des teneurs résiduelles plus élevées. Ils enrichissent de manière égale la fraction fine, mais le compost du commerce apporte également un peu plus de matière organique grossière, mais probablement peu évolutive du fait de son C/N élevé.

D'autres modifications de la composition chimique du sol sont mesurables avec les forts apports des 2 composts, comme un enrichissement en azote, un déficit un peu moins marqué en phosphore et potasse, un gain de capacité d'échange et pour le déchet vert une augmentation du pH.

Influence des amendements sur les propriétés biologiques du sol

Un des premiers indices de modifications des fonctionnements biologique de sol est donné par les dynamiques de minéralisation, qui peuvent s'apprécier de différentes manières.

Dynamiques de minéralisation

En utilisant les formules des bilans simplifiés, on calcule pour chaque placette de mesure la minéralisation azotée du sol :

$$M \text{ (kgN/ha)} = \Delta S_{F-I} - A + L + C$$

- avec :
- M minéralisation nette
 - ΔS_{F-I} différence de stock en N-NO₃ (final – initial)
 - A apport de fertilisant organique (hors compost)
 - L lixiviation de nitrates
 - C consommation des cultures (estimée égale aux exportations des parties aériennes²²)

On néglige la dénitrification²³

Par ailleurs, on calcule :

$$L \text{ (kgN/ha)} = L \text{ (l/m}^2\text{)} \times \text{moyenne}([\text{NO}_3]_{\text{sol}} / (100 \times 4.43 \times H_p))^{24}$$

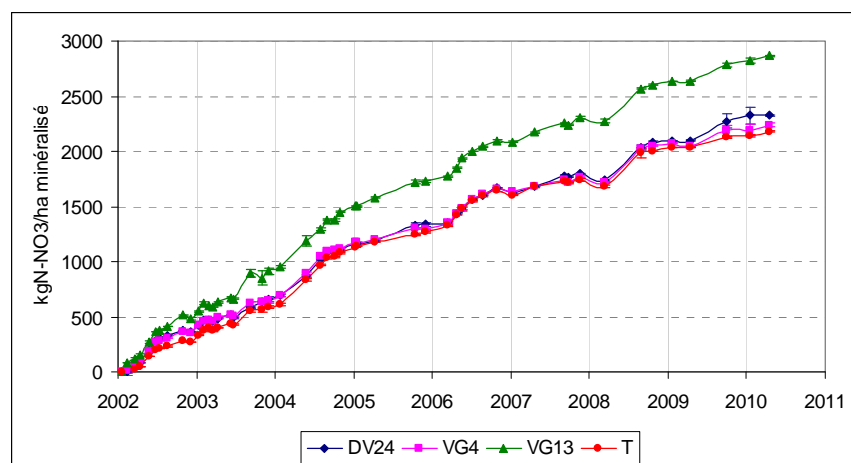
- avec [NO₃]_{sol} concentration en nitrate du sol (en mgNO₃/kg)
H_p humidité pondérale du sol (en %)

$$L \text{ (en l/m}^2\text{)} = \Delta S_{F-I} + I - Kc \text{ ETP}$$

- avec : L lessivage
 ΔS_{F-I} différence de stock en eau (final – initial)
Kc ETP évapotranspiration de la culture

On néglige le ruissellement (parcelle nivelée)

Figure 11 : Estimation des dynamiques de nitrification selon les traitements



²² on néglige le système racinaire, qui représenterait entre 10 et 15% des besoins

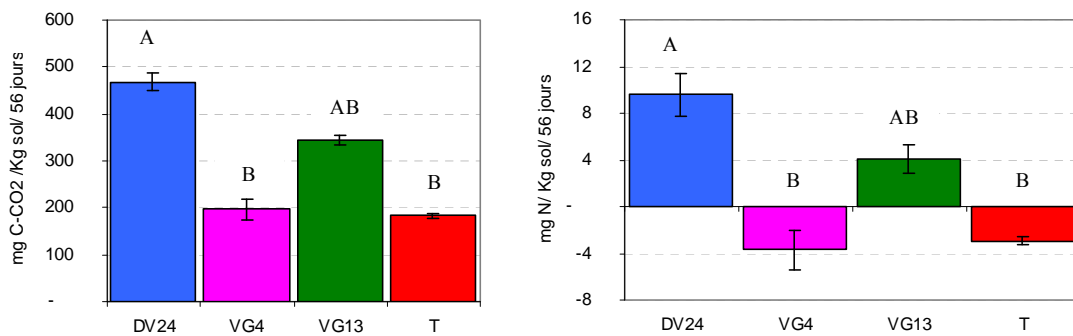
²³ conformément aux mesures expérimentales INRA Avignon (non publié)

²⁴ Nitrates lixiviés correspondent à la quantité d'eau lessivé au delà de la profondeur considérée x concentration moyenne de l'eau du sol à cette profondeur (effet chasse d'eau)

A cette échelle de temps, on remarque une nitrification qui semble relativement régulière pour le sol témoin, avec juste une légère inflexion à partir de 2007, soit après 5 années sans apports. Sa minéralisation est de l'ordre de 300 kgN-NO₃/Ha/an, ce qui est une valeur assez importante qui témoigne de la dynamique particulière des conditions chaudes et humides de la serre.

Il semble que seul l'apport à forte dose du compost commercial ait une minéralisation suffisante pour générer une réelle différence vis à vis de la libération de nitrates, qui correspondrait à environ 80 kgN-NO₃/Ha/an en plus. On remarque cependant une tendance à l'accroissement de la minéralisation pour le traitement DV24 en fin d'expérimentation, qui dénote d'une augmentation sur le long terme de la minéralisation qui se retrouve effectivement dans les incubations de sol réalisées sur des prélèvements effectués en avril 2010.

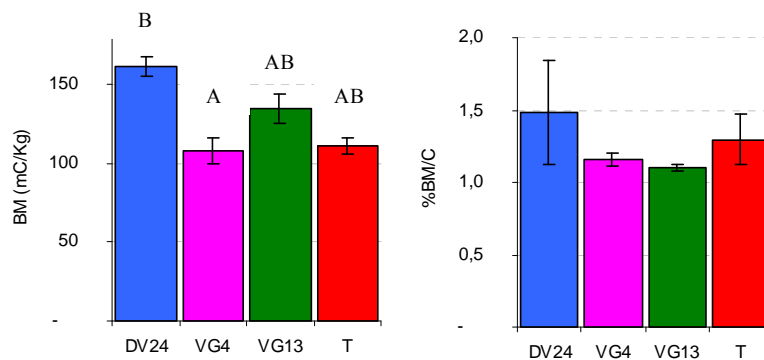
Figure 12 : Incubation finale d'échantillons de sol selon les traitements après 9 années d'apports



Biomasse microbienne

On constate corrélativement sur ces échantillons en fin d'expérimentation une augmentation de la biomasse totale pour les traitements avec forts apports de composts. Elle est significative pour le traitement DV24, pour lequel on trouve également proportionnellement plus de microorganismes par unité de carbone dans le sol.

Figure 13 : Mesure finale de biomasse dans le sol selon les traitements après 9 années d'apports



Conclusion

En condition de maraîchage intensif sous abri, le sol montre une minéralisation importante, qui décroît tout de même légèrement au fil des années en l'absence d'apport organique.

Seuls les forts apports de composts (DV24, VG13) modifient le fonctionnement biologique du sol, en augmentant sa biomasse et son taux de minéralisation. Ce sont les apports de déchets verts qui montrent l'évolution la plus importante, avec un effet cumulatif marqué. En effet, il semble que ce soit

seulement 4 à 5 ans après les 1^{ers} apports que l'on commence à voir une augmentation de la minéralisation, à la différence du compost du commerce qui montre une minéralisation annuelle régulière d'environ 35% de son azote.

Influence des amendements sur les propriétés physiques du sol

Une série de mesures différentes ont été réalisées au fil du temps, afin de disposer de données complémentaires sur une éventuelle évolution structurale du sol.

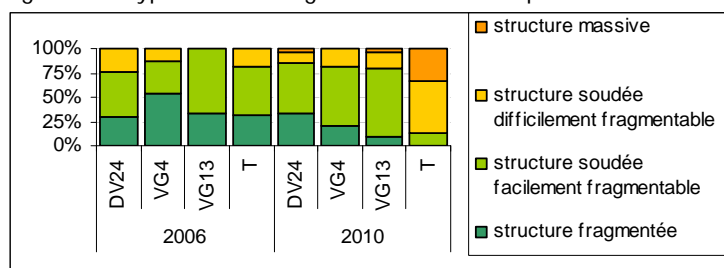
Profils culturaux

Des profils ont été réalisés en 2002, avant tout début d'apports différenciés, puis en 2003, 2006 et 2010 après la dernière culture de salade. Ils ont été creusés en des emplacements différents de l'abri (Annexe 2), mais toujours situés entre 2 asperseurs, à cheval sur un passage de roue de tracteur, et couvrant 4 salades.

De part sa texture sablo-limoneuse, on obtient après travail du sol avec les outils utilisés (cultivateurs à dent puis herse rotative) beaucoup de terre fine, qui a tendance à se tasser sous les passages de roues et à se prendre en masse durant les phases assez fortement irriguées de croissance de la salade. En fond de travail, le sol est massif et assez faiblement poreux.

On ne remarque pas de différence sensible dans la structuration du sol jusqu'en 2006, puis en fin d'expérimentation en 2010, on observe une dégradation plus importante dans la parcelle témoin, les autres traitements restants assez similaires. Au terme de ces 9 années sans apports de matière organique, le profil structural se montrerait assez tassé, et plus défavorable à l'infiltration et à la prospection racinaire que dans les 3 autres traitements. De même, le fond de travail semble présenter une moindre porosité.

Figure 14 : Type d'assemblage observé dans les profils structuraux en 2006 et 2010 sur 0-30 cm :



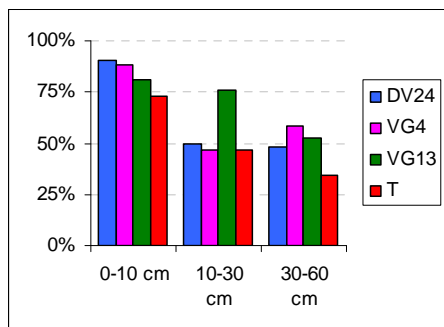
Dans le détail, on trouve une présence importante de débris organiques assez grossiers dans le traitement avec forts apports de déchets verts, avec une assez forte imprégnation du profil et des traces d'entraînements en profondeur. Ceci est moins visible dans les autres traitements, surtout celui à faible niveau d'apports.

Profils racinaires

Les profils racinaires sont relevés pour 4 salades au sein de chaque profil par notation de présence à l'aide d'une maille de 2 cm².

On remarque une très forte présence de racine sur les 10 premiers centimètres, avec une prospection totale qui atteint les 60 cm. En 2010, on trouve un système racinaire plus dense en zone travaillée pour le compost commercial à fortes doses (75% de la surface prospectée), les 3 autres traitements étant relativement équivalents (autour de 50%). Au delà de la zone travaillée (30-60 cm), on trouve moins de racines dans le traitement témoin sans apport, avec seulement 35% de la surface prospectée. Le système racinaire ne dépasse les 50 cm qu'à l'occasion de fissurations antérieures (anciennes traces de sous solage, de prélèvements de sol à la tarière).

Figure 15: Densité moyenne d'occupation du sol par les racines dans le profil en 2010



Après 9 années d'expérimentation, il semble que la prospection racinaire des salades répondent à des facteurs liés aux traitements pratiqués. Ainsi, elle est supérieure en zone travaillée pour les forts apports de composts commerciaux dont nous avons vu qu'ils enrichissent le sol en éléments assimilables, particulièrement en azote, que l'on sait source de tropisme.

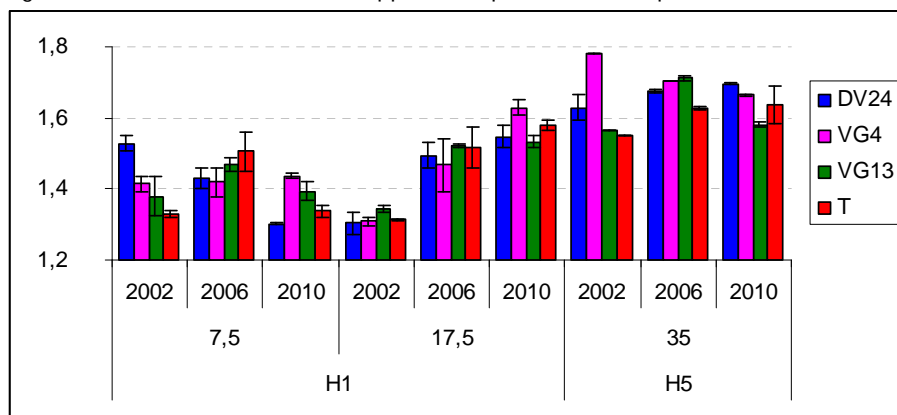
Par ailleurs, en l'absence d'apport, on remarque un épuisement de la prospection racinaire profonde, que l'on peut attribuer à une difficulté d'implantation dans un sol plus compact et moins aéré comme on l'a vu lors de l'observation du profil.

Pour ces 2 mesures, on ne dispose pas de répétitions qui permettent de confirmer ces observations.

Densité apparente

Les échantillons de sols ont été prélevés au sein des différents profils en 2002 (avant mise en culture), 2006 et 2010 (en fin de culture de salade) pour mesure des densités apparentes.

Figure 16: Evolution des densités apparentes par horizons et par traitements



Les densités apparentes sont aux alentours de 1.3 à 1.4 sur l'horizon 0-20 cm travaillé à la herse rotative, beaucoup plus dense dans l'horizon labouré au canadien non repris (H2, jusqu'à 30 cm), entre 1.5 et 1.6, et encore plus compact en dessous (H5). Les différences ne sont pas significatives entre les traitements, et les évolutions peu interprétables.

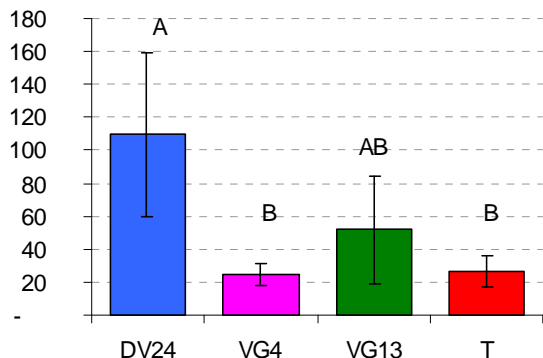
Pénétrométrie

Des mesures réalisées en 2006 puis 2010, avec 6 répétitions par placettes soit 18 par traitements, n'ont montré aucune différence significative quant à la résistance du sol à la pénétration d'un cône de 1 cm².

Infiltrométrie

En 2010, en fin de culture de salade, des test d'infiltrométrie à charge nulle (méthode « beerkan ») ont été réalisé en 4 emplacements sur 2 placettes par traitement, soit 8 répétitions. Les courbes obtenues ont permis de calculer la pente correspondant à l'infiltration à saturation, converti en débit d'infiltration.

Figure 17 : Débit d'infiltration à saturation selon les traitements (l/m²/mn)



Il y a une différence entre les traitements, significative pour l'apport de compost de déchet vert qui arrive en moyenne à drainer 110 l/m²/h, contre environ 20 l/m²/h pour le témoin ou le traitement VG4. Ces valeurs correspondent à des pluviométries importantes, mais toutefois assez proche pour les traitements les moins infiltrants de celle du système d'arrosage qui est de 12 l/m²/h, qui se retrouve en plus de fait amplifiée augmenté par la barrière du paillage qui concentre les infiltrations sur 5% de la surface. On ne constate cependant aucune différence de flaquage lors des séquences d'irrigation. Ceci indique un gain de porosité grossière avec les forts apports de compost, particulièrement celui à base de déchets verts, peut être en relation avec la granulométrie élevée du produit.

Conclusion

Si aucun effet ne se décèle les 1ères années sur les propriétés physiques du sol, il semble que l'absence d'entretien organique dans le témoin aboutisse tout de même au bout de 8 ans à une prise en masse plus importante du sol en cours de culture et à une perte de porosité, qui si elle n'est pas décelable par la mesure des densités apparentes, se traduit tout de même par une limitation de la prospection racinaire. Les autres traitements maintiennent un état plus favorable, même si la structuration de ce sol sablo-limoneux reste faible. Dans le cas du traitement à base de déchets verts, on constate de plus une bien meilleure infiltration de l'eau, qui pourrait être liée aux résidus végétaux grossiers présents dans le profil.

Incidences sur les cultures

Le système de culture a permis la succession de 14 laitues et 4 tomates en 8 années d'expérimentation. Un ensemble de mesures sur ces cultures permettent d'étudier les effets potentiels des apports de composts, soit directs du fait de leur fourniture d'éléments nutritifs aux plantes, soit indirects par les modifications du milieu qui ont été décrites dans les parties précédentes.

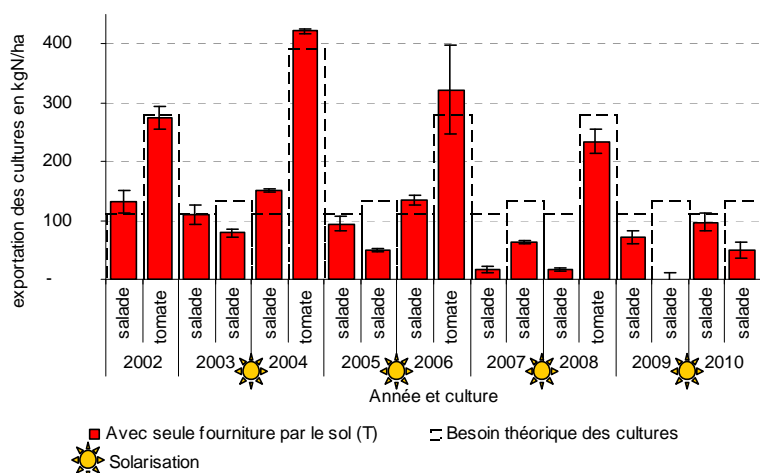
Nutrition des cultures

Dynamique pour l'alimentation azotée

Pour chaque culture, on a mesuré l'azote contenu dans les parties aériennes qui sont exportées de la parcelle.

Nous allons dans un premier temps nous intéresser à l'évolution de cette composition en l'absence de tout apport de compost, comme dans la parcelle témoin, afin voir la part d'alimentation azotée assurée par la minéralisation de la matière organique endogène du sol.

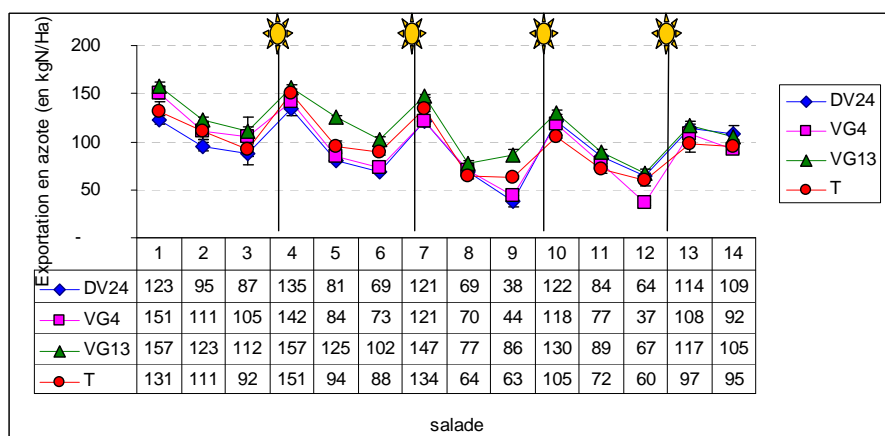
Figure 18 : Exportations d'azote suivant les cultures (en kg N/ha) pour le traitement témoin sans apport



Si le calcul des bilans indiquait une minéralisation en azote qui ne semblait s'infléchir un peu qu'à partir de 2007, on remarque dans les exportations des plantes une diminution dès 2005, avec systématiquement carence pour toutes les cultures après 2007. Ces données confirment que malgré le maintien apparent du taux de matière organique du sol, lié comme on l'a vu aux apports conséquents de terreau des mottes de plantation, on a une contribution du sol à l'alimentation azotée qui diminue progressivement. On peut toutefois remarquer que la présence d'une solarisation dans le cycle permet de reconstituer les stocks pour la salade d'automne suivante, qui bénéficie ainsi d'une meilleure alimentation en l'absence de tout apport.

La Figure 18 illustre l'évolution des exportations azotées au cours du temps selon les traitements. On retrouve bien le fonctionnement cyclique lié à la solarisation.

Figure 19 : Evolution des exportations en azote par les salades selon les traitements



On note par ailleurs peu de différences entre les traitements, sauf pour VG13 avec des prélèvements moyens supérieurs (115 kgN/ha au lieu de 95 pour les autres traitements), montrant une légère contribution à l'alimentation des cultures. Il semblerait toutefois qu'on ait eu au départ une situation de nutrition plus défavorable avec DV24, qui s'est inversée au fil du temps jusqu'à se rapprocher du niveau d'alimentation azotée du traitement VG13.

Pour la culture de tomate, il est possible d'utiliser l'indice de nutrition azotée (INN) pour juger de la satisfaction des besoins de la culture.

L'INN d'une culture est calculé comme le ratio entre sa concentration en azote et la concentration qu'aurait permis, pour le même niveau de biomasse, une croissance potentielle, c'est-à-dire une nutrition azotée de référence non limitante pour la croissance :

Pour la tomate, il se calcule comme suit :

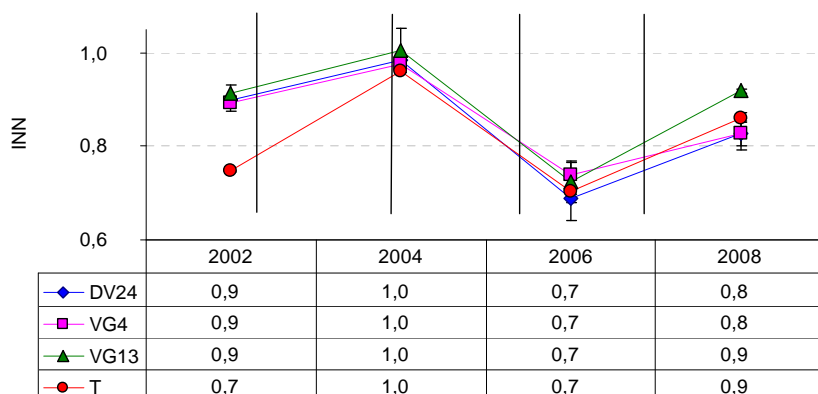
$$INN = QN/QNc \quad \text{avec} \quad QN = \text{quantité d'azote contenue dans les parties aériennes (en kgN/ha)}$$

$$QNc = (3.4 \times MS^{-0.12}) \times 10 \times MS$$

avec MS = matière sèche mesurée (en t/ha)

Proche de 1, l'INN indique une nutrition optimale, qui se dégrade pour des valeurs inférieures.

Figure 20 : Evolution de l' indice de nutrition azotée sur tomate selon les traitements

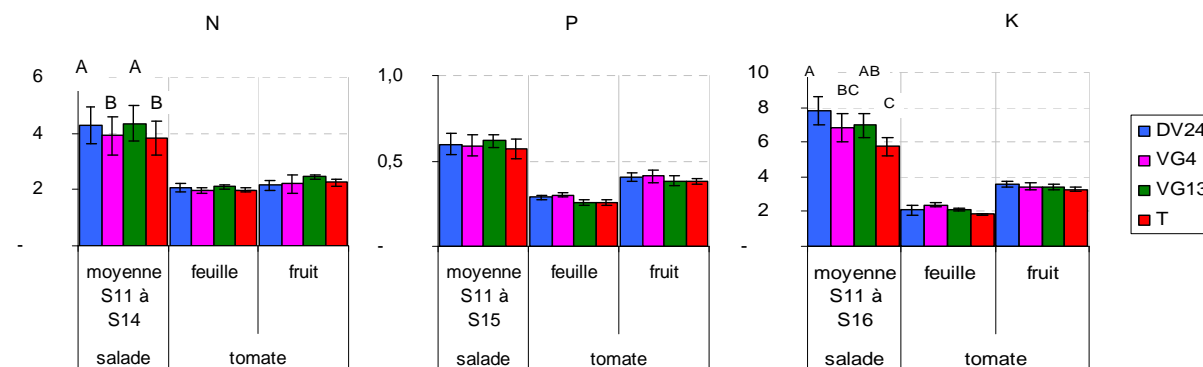


Pour les 4 cultures de tomate successives, on a peu d'écart entre les traitements, sauf en début d'expérimentation pour des raisons mal identifiées au vu des importants stocks de nitrates mesurés lors de cette culture. Les valeurs des INN fluctuent selon les années et sont un peu faibles, mais à la différence de ce qui a été vu sur les salades on ne note pas de dégradation nette de la nutrition azotée des tomates au fil du temps. Il semble que pour cette culture, la dynamique de minéralisation estivale et la remobilisation de stocks en profondeur grâce à un système racinaire puissant (à plus de 1.20 m) permettent de maintenir plus longtemps le niveau de nutrition azoté.

Contribution pour la nutrition en éléments majeurs

Les compositions moyennes en éléments majeurs des cultures des 2 dernières années confirment les observations précédentes pour l'azote. Elles tendent à montrer un enrichissement sur salade pour l'azote et le potassium avec les apports de composts à fortes doses, mais dans des proportions faibles, et aucune différence significative sur la culture de tomate.

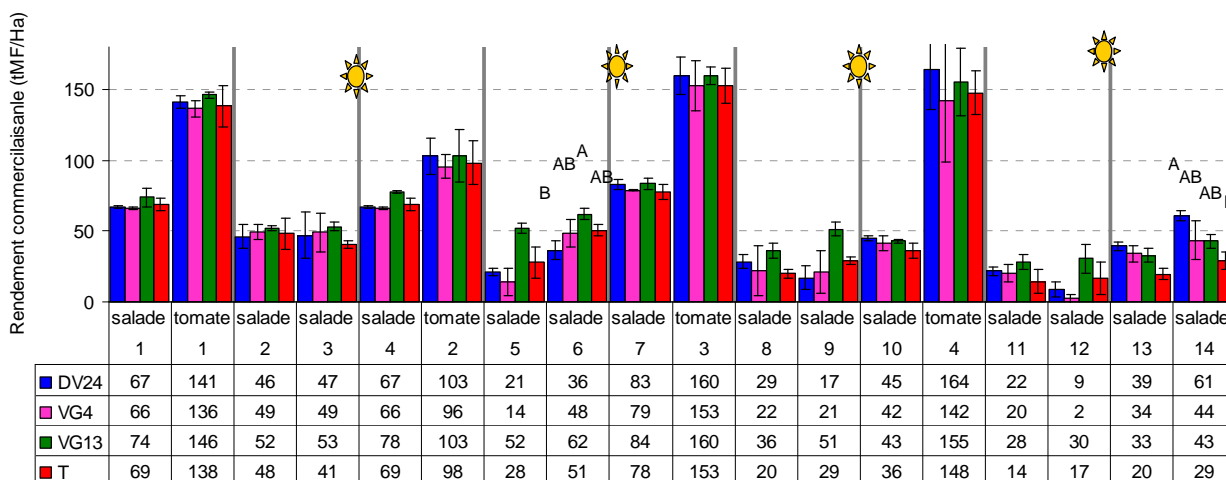
Figure 21: Composition moyenne des cultures en N, P et K en fin d'expérimentation (en%/MS)



Résultats commerciaux

Pour chaque culture, on mesure le rendement correspondant aux produits commercialisables (calibre suffisant²⁵, absence de défaut).

Figure 22 : Rendement commercial selon les traitements (en t MF/ ha)



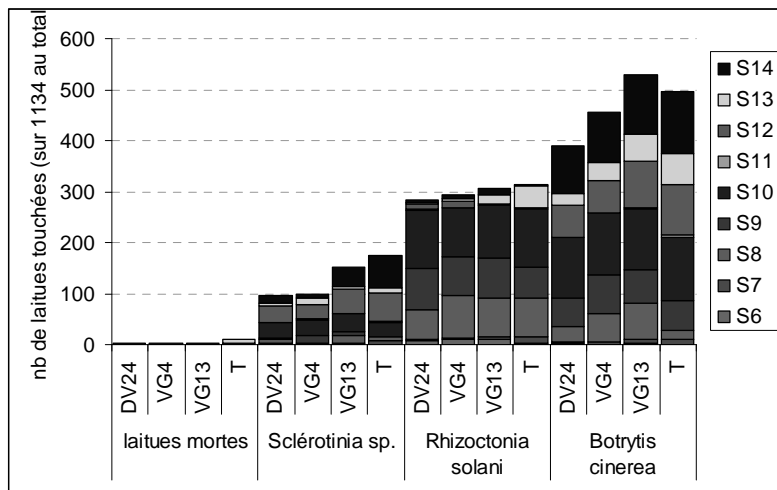
On constate une chute progressive des rendements, observable sur salade à partir de la 4^{ème} année, qui peut être imputée à la raréfaction de la fourniture du sol en azote. Quelles que soient les cultures, on observe peu de différences significatives entre les traitements (dont aucune avant la fin de la 4^{ème} année).

En tonnage total de l'ensemble des cultures, on a un gain de la production commercialisable avec le fort apport de compost commercial VG13 de 18%, et de seulement 7% pour le VG24. Pour les 2 dernières années, ces différences atteignent respectivement +27% et +29% par rapport à la production du témoin sans apport, confirmant l'intérêt longue durée d'un entretien organique du sol avec les fortes doses de composts.

A la récolte, diverses maladies telluriques sur salades (*Sclerotinia sp.*, *Rhizoctonia solani* et *Botrytis cinerea*) limitent le rendement commercialisable soit par pertes de plantes, soit par pertes de poids des plantes atteintes enlevés lors du parage. La pesée de ces dernières montrent qu'on a en moyenne 12% de déchets pour le traitement DV24, contre 17% pour les autres et même 21% pour le témoin. Ceci est à mettre notamment en rapport avec un nombre de plantes touchées légèrement inférieur pour *Sclerotinia sp.* et surtout *Botrytis cinerea*, comme le montrent les notations effectuées sur les 9 dernières cultures de laitues.

²⁵ supérieur à 320g après parage pour la salade

Figure 23: Cumul du nombre de salades touchées par les différentes maladies telluriques selon les traitements

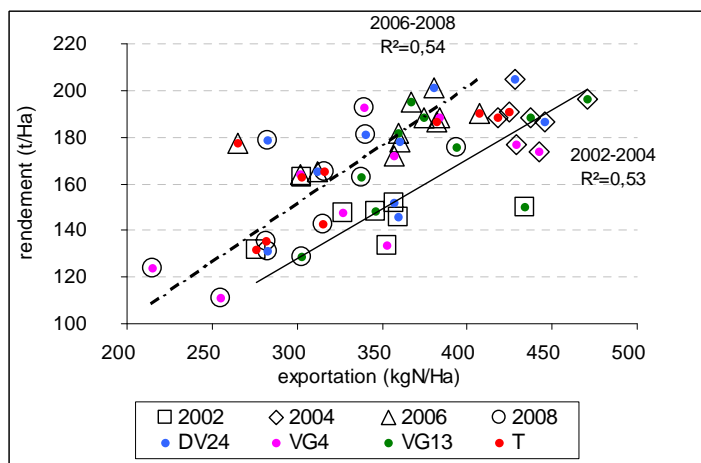


Il pourrait donc y avoir une légère limitation du potentiel infectieux du sol avec les forts apports de déchets verts, dont on a vu qu'ils dynamisaient la vie biologique du sol, source d'antagonismes potentiels.

En ce qui concerne la tomate, malgré une tendance en faveur des forts apports de composts DV24 et VG13, on ne trouve aucune différence significative sur le rendement des cultures entre traitements.

Or il existe en revanche une assez bonne relation entre rendement et exportation d'azote, mais qui a évolué au fil du temps (Figure 24). Ainsi, en début d'expérimentation, il fallait 2,4 KgN/Ha pour produire une tonne de fruit, puis seulement 2 kgN/Ha les dernières années. On a donc eu avec la raréfaction de l'azote une amélioration de son efficacité pour tous les traitements, sans perte de rendement.

Figure 24 : Relation entre exportation d'azote et rendement total sur tomate pour l'ensemble des mesures :



Le rendement des cultures des cultures de tomate reste bon, et ce malgré une fertilisation très faible, de seulement 70 kgN/Ha sous forme de farine de plume avant plantation. Sur la période estivale, la contribution du sol est et reste donc très importante au fil du temps, couvrant ici près de 75% des besoins. L'effet des composts reste non significatif, même si les meilleurs résultats coïncident chaque fois avec les fortes doses d'apports.

Conclusion

En fertilisation restreinte, on observe en l'absence de tout entretien organique une dégradation progressive de la nutrition azotée des cultures du fait de la diminution de la minéralisation du sol. Ceci conduit en quelques années à une limitation de croissance sur une culture hivernale comme la salade, tandis que la tomate arrivait encore au bout de 7 années à garder un niveau de rendement élevé avec une meilleure efficacité de l'azote.

Les forts apports de compost organique permettent d'améliorer un peu la nutrition des cultures, surtout en fin d'expérimentation. On observe des compositions significativement supérieures en N et K pour les salades au bout de 7 années, avec un gain de rendement d'environ 30%. Avec le compost du commerce à fortes doses, cet effet est plus précoce du fait d'une libération d'azote annuel, tandis que pour le compost de déchet vert il s'agit plus d'un effet retard, qui se combine en outre avec une amélioration de la situation sanitaire et donc une légère limitation des pertes. Malgré des tendances similaires, ceci ne se retrouve pas de manière significative pour la tomate.

CONCLUSION GENERALE

Les conditions culturales et pédoclimatiques des systèmes maraîchers sous abri sont originales à bien des égards, et notamment vis à vis de l'accumulation et de la dégradation de la matière organique.

Afin d'en éclairer les fonctionnements, notamment dans le but d'aider à l'entretien ou la reconstitution d'une fertilité des sols pour l'agriculture biologique, 3 modalités d'apports de compost et de doses ont été comparés avec un témoin sans entretien sur 8 années.

Ceci a permis de montrer qu'en l'absence d'apports, le terreau des mottes de plantation dans ce système masque totalement à l'analyse la perte de matière organique endogène, mais ne compense pas cette disparition. En effet, on assiste progressivement, après 5 à 6 ans, à une diminution de la minéralisation du sol et à une dégradation de sa structure, qui finit par entraver le système racinaire des cultures. En l'absence d'une fertilisation adaptée, des pertes de rendement apparaissent alors, mais dépendent du système de culture mis en œuvre. Pour les cultures estivales à forte prospection racinaire, ou derrière une période de solarisation qui permet de reconstituer les stocks du sol, elles peuvent être peu perceptibles sur le moyen terme.

Les faibles apports de matières organiques, de l'ordre de ce qui est couramment fait avec les composts commerciaux, ne suffisent pas à modifier ces tendances.

Ce n'est qu'avec de forts apports, de l'ordre de 4 à 5 tonnes de carbone organique par an, que l'on observe une amélioration sur l'ensemble des facteurs physiques, chimiques, biologiques et agronomiques étudiés.

Les 2 produits testés, aux caractéristiques physico-chimiques assez contrastées, montrent des comportements assez différents. Une partie du compost commercial se minéralise assez rapidement, et les fractions accumulées se montrent en revanche plus récalcitrantes à des évolutions secondaires que le déchet vert, qui semble avoir un arrière effet intéressant, par une minéralisation tardive après quelques années de cumul. Ces différences de comportement se traduisent par des conséquences un peu différentes sur le sol et les plantes.

Ces doses intéressantes ne sont économiquement supportables que pour le compost de déchets verts.

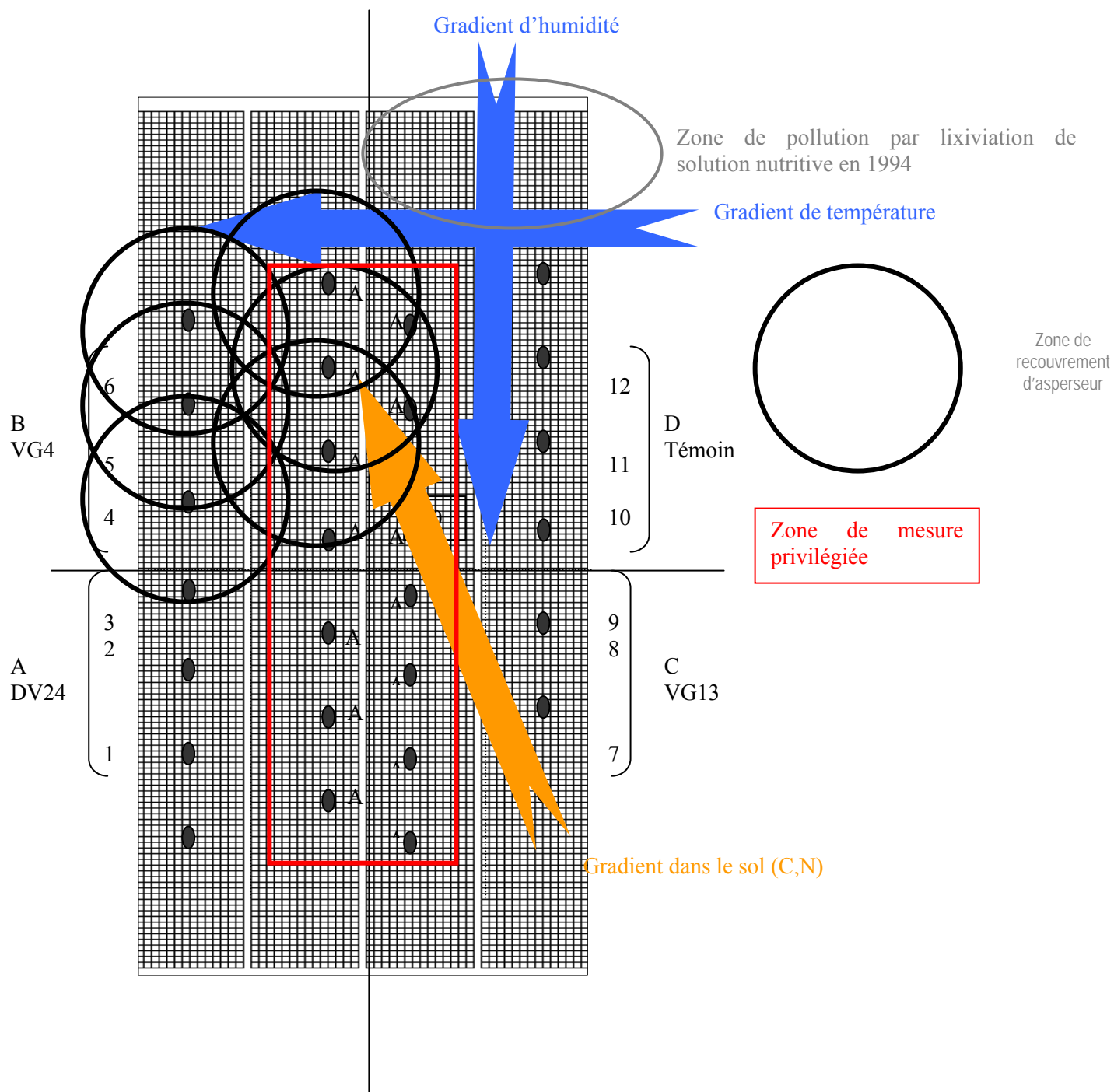
Avec 24t/Ha/an, il permet le maintien d'une structure de sol plus fragmentée, avec une meilleure porosité, et une amélioration substantielle des fertilités tant biologiques que chimiques. Le cumul des apports ne provoque pas d'effets dépressifs, et au bout de quelques années, ceci se traduit au contraire par une meilleure nutrition des cultures et des gains de rendements possibles en situation de restriction d'intrants.

TABLE DES ILLUSTRATIONS

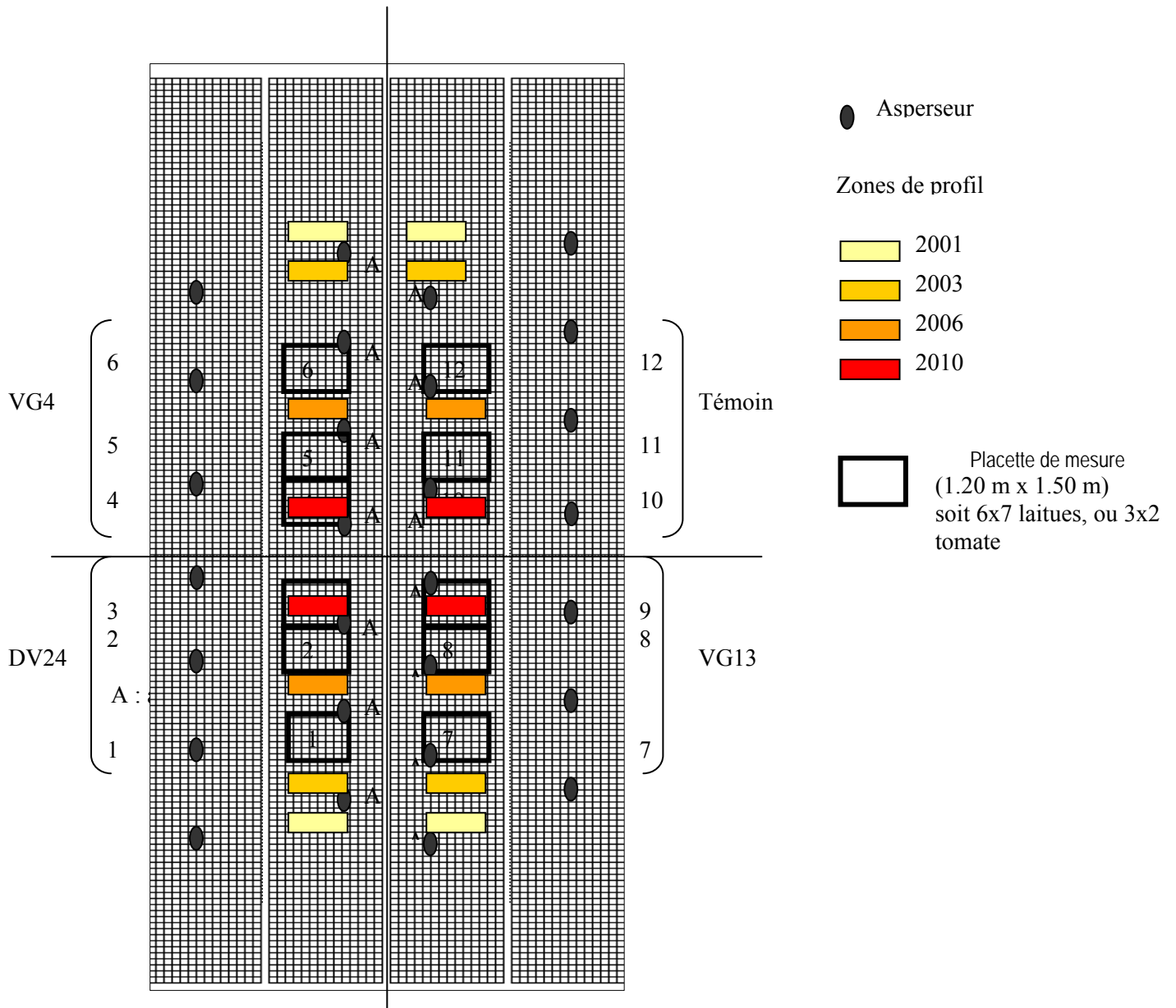
Tableau 1: Calendrier des cultures	6
Tableau 2: Consommation théorique et irrigation des cultures	7
Tableau 3: fertilisation azotée des cultures	8
Tableau 4 : Principaux indicateurs d'évolution de la matière organique des produits apportés au sol	10
Figure 1 : Représentation de l'occupation du sol	6
Figure 2 : Somme des degré-jours pour les différentes occupations du sol	7
Figure 3 : Fractionnement biochimique des produits organiques (en % de la matière sèche) et reconstitution des apports annuels par traitements (en t/ha).....	9
Figure 4 : Dégagement de carbone et de nitrates des 2 composts (en %)	10
Figure 5: Fractions fines et grossières de matière organique dans le sol	11
Figure 6 : Evolution du stock de matière organique dans le sol au cours selon les traitements (par analyse du carbone méthode Anne)	12
Figure 7: Gain de carbone organique dans le sol par rapport au témoin (bilan 2010)	12
Figure 8 : Fractions et C/N de la matière organique du sol selon les traitements après 9 années d'apport	14
Figure 9 : Evolution des caractéristiques chimiques du sol selon les traitements (entre 2010 et 2002)	14
Figure 10 : Nitrates sur 0-50 cm (en kg N-NO ₃ /Ha)	15
Figure 11 : Estimation des dynamiques de nitrification selon les traitements	16
Figure 12 : Incubation finale d'échantillons de sol selon les traitements après 9 années d'apports	17
Figure 13 : Mesure finale de biomasse dans le sol selon les traitements après 9 années d'apports.....	17
Figure 14 : Type d'assemblage observé dans les profils structuraux en 2006 et 2010 sur 0-30 cm :.....	18
Figure 15: Densité moyenne d'occupation du sol par les racines dans le profil en 2010.....	19
Figure 16: Evolution des densités apparentes par horizons et par traitements	19
Figure 17 : Débit d'infiltration à saturation selon les traitements (l/m ² /mn).....	20
Figure 18 : Exportations d'azote suivant les cultures (en kg N/ha) pour le traitement témoin sans apport.....	21
Figure 19 : Evolution des exportations en azote par les salades selon les traitements	21
Figure 20 : Evolution de l' indice de nutrition azotée sur tomate selon les traitements	22
Figure 21: Composition moyenne des cultures en N, P et K en fin d'expérimentation (en%/MS).....	22
Figure 22 : Rendement commercial selon les traitements (en t MF/ ha).....	23
Figure 23: Cumul du nombre de salades touchées par les différentes maladies telluriques selon les traitements	24
Figure 24 : Relation entre exportation d'azote et rendement total sur tomate pour l'ensemble des mesures :.....	24
Annexe 1 : Structuration des hétérogénéités au sein de l'abri	27
Annexe 2 : Dispositif expérimental	28
Annexe 3 : Récapitulatif des mesures et détail de leur localisation	29

Annexe 1 : Structuration des hétérogénéités au sein de l'abri

Conduite, sol et climat



Annexe 2 : Dispositif expérimental



Annexe 3 : Récapitulatif des mesures et détail de leur localisation

BILAN CULTURAL GLOBAL

Rendement commercial
Croissance totale
Incidence maladies et taux de déchet

BILAN CHIMIQUE

Analyse laboratoire (CEC, richesse en éléments majeurs + oligo, C,N organique,...) *(12 échantillons, laboratoire CIRAD Montpellier)*
Fractionnement sol (évolution méthodo L.Thuriès *(36 échantillons)* et bilan final *(12 échantillons, laboratoire Célesta (3 fractions))*)
Suivis de NO₃ (prélèvement 0-30 et 30-50 cm)
Exportations des cultures (N, P, K, Mg) *(12 échantillons, laboratoire CIRAD Montpellier)*

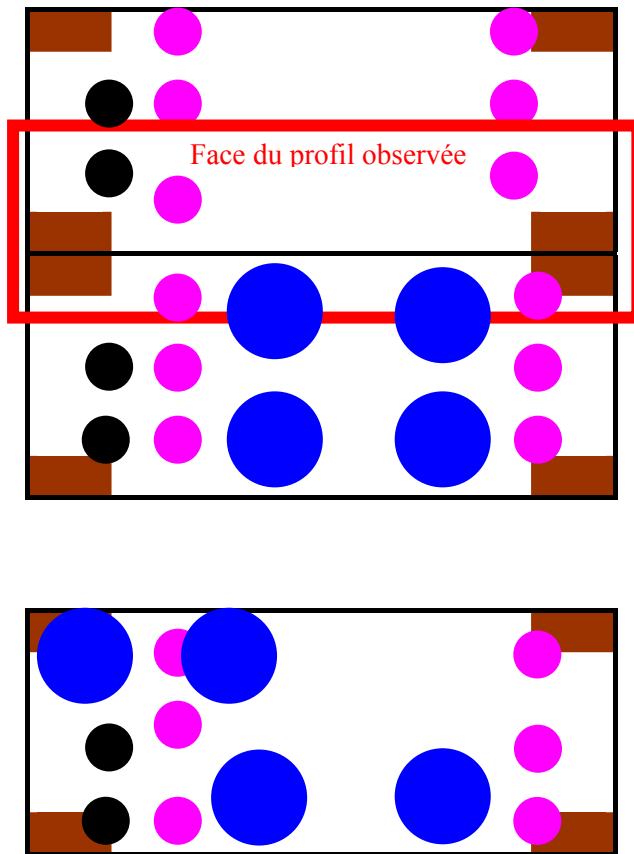
BILAN PHYSIQUE

Profils de sols
Densité apparente
Pénétrométrie en fin de cycle salade
Profils racinaires sur dernière culture de salade d'un cycle annuel
Infiltrométrie (bierkan simplifié) en fin de cycle salade

BILAN BIOLOGIQUE

Incubation de sol (C,N minéralisés pendant 49 jours) (12 échantillons, laboratoire Célesta)
Biomasse totale (12 échantillons, laboratoire Célesta)
Incidence maladies et taux de déchet

	Type de mesure	localisation	Répétition / traitement
	Bilan cultural	12 Placettes mesure	Laitues : pesées individuelles (carré de 6 x 7 plantes x 3 placettes) Tomates : pesées fruits récoltés 2 fois par semaine (6 plantes x 3 placettes)
	Exportation culture (analyse CIRAD N,P,K sur plantes)	12 Placettes mesure	Mélange de 6 ½ laitues tirées au sort /3 placettes Tomate : analyse des fruits à 2 dates de récolte + analyse (feuilles, tige, fruits restants) d'une plante entière par placette à l'arrachage de la culture
	Pénétrométrie en fin de cycle salade	12 Placettes mesure	Toutes les 2 laitues rg 2 et rg 7, soit 6 valeurs/ 3 placettes
	Prélèvements de sol : - NO3 0-30 et 30-50 cm - Analyse laboratoire CIRAD 0-30cm - Fractionnement sol, incubation de sol, biomasse totale Célesta, 0-30cm - Fractionnement sol bilan final 2010 sur 0-10, 10-30 et 30-50 cm	12 Placettes mesure	Mélange de plusieurs carottes de sol prélevées à chaque coin de la placette
	Infiltrométrie (bierkan simplifié)	8 Placettes de mesure	Entre laitue en coin, rg 3-4 et rg 5-6/ placettes, soit 4 valeurs x 2 placettes
	Profil structural et racinaire - Prélèvements pour densité apparente et fractionnement sol (2006)	Voir plan annexe 1	- 3 répétitions aux profondeurs 7.5, 17.5 et 35 cm



● tensiomètre
 □ Emplacement
 lecture

