

Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES DE BORDEAUX AQUITAINE
1, cours du Général de Gaulle – CS 40201 - 33175 GRADIGNAN cedex

M E M O I R E de fin d'études

pour l'obtention du titre

D'INGENIEUR DE BORDEAUX SCIENCES AGRO

**UTILISATION DE COMPOST DE MARC DE RAISIN COMME
ENGRAIS ET AMENDEMENT EN CEREALES A PAILLE
BIOLOGIQUES EN LANGUEDOC-ROUSSILLON**

Heitz Clémentine

Spécialisation : AGROGER

Etude réalisée à : INRA – UMR MOISA – 2 place Pierre Viala – 34000 Montpellier

- 2 0 1 5 -

Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES DE BORDEAUX AQUITAINE
1, cours du Général de Gaulle – CS 40201 - 33175 GRADIGNAN cedex

M E M O I R E de fin d'études

pour l'obtention du titre

D'INGENIEUR DE BORDEAUX SCIENCES AGRO

**UTILISATION DE COMPOST DE MARC DE RAISIN COMME
ENGRAIS ET AMENDEMENT EN CEREALES A PAILLE
BIOLOGIQUES EN LANGUEDOC-ROUSSILLON**

-

*Use of composted grape marc as fertilizer and soil amendment on
organic bread wheat and barley in Languedoc-Roussillon*

Heitz Clémentine

Maître de stage : Razès Maylis

Spécialisation : AGROGER

Etude réalisée à : INRA – UMR MOISA – 2 place Pierre Viala – 34000 Montpellier

- 2015 -

Remerciements

Le bal des remerciements s'ouvre avec ma maîtresse de stage Maylis Razès, de l'UMR MOISA. Maylis, je te remercie de m'avoir guidée au long de ce stage, tout en me laissant beaucoup de liberté. La bonne humeur avec laquelle tu m'as accueillie dès le premier jour a largement contribué à mon épanouissement dans ce projet.

Je tiens ensuite à remercier Max Haeffliger (BioCivam de l'Aude), Blaise Leclerc (ITAB), Bruno Lorentz (UE DiaScope) et Bruno Taupier-Létage (ITAB) pour leurs présences, leurs aides, conseils, et relectures.

A tous les cinq, je vous dis un grand « Merci ! » pour m'avoir fait entièrement confiance dès le début de ce stage. J'ai beaucoup appris à vos côtés sur le terrain et lors des réunions. Merci de m'avoir fait partager vos connaissances sur l'agriculture.

Pour leurs aides ponctuelles et leurs précieux conseils, je remercie grandement Marie Gosme (INRA) et Jean-Pierre Da Costa (Bordeaux Sciences Agro) pour les statistiques, Xavier Salducci (Celesta Lab) pour les analyses de sol, ainsi que Nicolas Kuznik (Grap'Sud) pour les informations sur les distilleries. Merci également à Florence Meunier et Pascal Sartre (tous deux à l'UE Diascope) pour leurs coups de mains sur les tensios et le SPAD.

Un grand, très grand « Merci », enfin, à tous les agriculteurs ayant accepté de nous prêter un bout de parcelle pour les expérimentations.

Sommaire

1	Introduction : contexte, problématique, synthèse bibliographique	1
1.1	Contexte : 3 constats en Languedoc-Roussillon.....	1
1.1.1	Constat n° 1 : déficit en matières organiques des sols céréaliers.....	1
1.1.2	Constat n°2 : difficultés d’approvisionnement azoté en blé biologique	2
1.1.3	Constat n°3 : disponibilité du compost de marc de raisin.....	2
1.2	Présentation du projet ILLIAD.....	3
1.2.1	Origine, objectifs et évolution.....	3
1.2.2	Intérêts d’un essai multi-sites.....	5
1.3	Problématique et questions soulevées	5
1.4	Eléments de bibliographie	6
1.4.1	Rapide point sur les filières blé tendre et orge en France et leurs enjeux.....	6
1.4.2	Physiologie et fertilisation de l’orge et du blé	6
1.4.3	Méthodes classiques d’évaluation agronomique des produits organiques ...	8
1.4.4	Connaissances actuelles sur le compost de marc de raisin	13
2	Objectifs du stage.....	15
3	Matériel et méthodes.....	16
3.1	Présentation des parcelles et du dispositif expérimental	16
3.1.1	Les sites d’essai.....	16
3.1.2	L’unité expérimentale DiaScope.....	17
3.1.3	Dispositif expérimental	18
3.2	Matériel de base.....	18
3.2.1	Compost de marc de raisin.....	18
3.2.2	Traitements	20
3.2.3	Orge et blé.....	20

3.3	Mesures effectuées	20
3.3.1	Impacts sur la culture	20
3.3.2	Impacts sur le sol	23
3.4	Analyses statistiques mobilisées.....	25
4	Résultats.....	26
4.1	Impacts sur la culture.....	26
4.1.1	Développement de la culture.....	26
4.1.2	Rendement et ses composantes.....	28
4.1.3	Nutrition azotée de la culture.....	32
4.2	Impacts sur le sol	36
4.2.1	Teneur en N.....	36
4.2.2	Teneur en MO et fractionnement granulométrique.....	37
4.2.3	Test pelle-bêche de Joseph Görding	38
4.2.4	Statut hydrique du sol	40
4.2.5	Température du sol	41
5	Discussion	42
5.1	Analyse des résultats obtenus	42
5.1.1	Variations inter-sites	42
5.1.2	Intérêt agronomique de l'épandage de CMR	42
5.1.3	Dynamique de minéralisation de l'N organique du CMR	46
5.1.4	Le cas particulier du site A6	47
5.1.5	Influence de l'origine du compost	48
5.1.6	Extrapolabilité des résultats au blé	49
5.2	Discussion des protocoles.....	49
5.3	Pertinence de l'utilisation de CMR pour répondre aux problématiques soulevées.....	51

6	Conclusion	53
	Bibliographie	54
	Annexes	59

Liste des illustrations

Figure 1 : Evolution de l'absorption de l'N par l'orge et le blé au cours du [...]	7
Figure 2: Localisation des sites d'essai : agriculteurs (A) et domaine de Melgueil (M). 16	
Figure 3: Données climatiques de la campagne 2014/2015 [...].....	17
Figure 4: Vue aérienne du dispositif expérimental sur un site d'essai	18
Figure 5: Cinétique de minéralisation de l'N organique des différents composts [...]... 19	
Figure 6: Le SPAD-502Plus de Konica Minolta	22
Figure 7: Nombre moyen de levées par m ² par site [...]	26
Figure 8: Nombre moyen d'épis par m ² par site [...]	28
Figure 9: Nombre moyen de grains par épi par site [...].....	29
Figure 10: Poids moyen de mille grains par site, en grammes. [...].....	30
Figure 11: Rendements moyens par site, en quintaux / hectare. [...].....	31
Figure 12 : Reliquats azotés de sortie d'hiver [...]	33
Figure 13: Evolution temporelle des valeurs SPAD [...]	34
Figure 14: Teneur en protéines moyenne par site, en % [...]	35
Figure 15: Teneur en N totale du sol dans les 20 premiers centimètres [...].....	36
Figure 16 : Teneurs en MO du sol dans les 20 premiers centimètres [...]	37
Figure 17: Répartition relative des différentes fractions granulométriques [...].....	38
Figure 18: Photographies de bêchées de sol lors du test pelle-bêche [...].....	39
Figure 19: Evolutions temporelles moyennes des potentiels matriciels des sols [...]... 40	
Figure 20: Comparaison des nombres de levées des parcelles "témoin" de Melgueil....	44

Liste des tableaux

Tableau 1: Compositions moyennes des composts utilisés [...].....	19
Tableau 2: Composantes du rendement étudiées et méthodes de détermination.....	21
Tableau 3: Rapport du pouvoir couvrant [...]	27
Tableau 4: Estimation des fournitures en N minéral pour les différents CMR [...].....	46

Liste des abréviations

AB : Agriculture biologique

CEC : Capacité d'échanges cationiques

CMR : Compost de marc de raisin

ETM : Eléments traces métalliques

INN : Indice de nutrition azotée

ISMO : Indice de stabilité de la matière organique

MO : Matière organique

MS : Matière sèche

N min : Azote minéral

N org : Azote organique

N tot : Teneur en azote totale du sol

PB : Produit brut

PMG : Poids de mille grains

SAU : Surface agricole utile

1 Introduction : contexte, problématique, synthèse bibliographique

1.1 Contexte : 3 constats en Languedoc-Roussillon

1.1.1 Constat n° 1 : déficit en matières organiques des sols céréaliers

De par sa fonction de production de denrées exportées, l'agriculture a tendance à ouvrir les cycles des éléments à l'échelle de la parcelle. Ainsi, la mise en culture d'un sol forestier ou prairial entraîne souvent une baisse de sa teneur en matières organiques¹ (MO) (Plénet, Lubet, et Juste, 1993 ; Arrouays et al., 1994), d'une part via l'augmentation de sa minéralisation (Balesdent, 1996a), et d'autre part via la diminution des restitutions carbonées au sol. D'après une étude de Roussel, Bourmeau et Walter en 2001, entre 30 et 40 % des sols cultivés français seraient déficitaires en MO (définis comme ayant une teneur en-deçà de 2%, bien que ce seuil dépende fortement de la texture du sol). En céréales, ce phénomène est accru par le développement des exploitations sans élevages depuis la fin du XXème siècle, en agriculture conventionnelle comme en agriculture biologique (David, 2004) : l'élevage et les cultures ont perdu la proximité géographique qui permettait un retour au sol des effluents animaux.

Aujourd'hui il est couramment reconnu que les MO du sol assurent des rôles fondamentaux dans la fertilité physique, chimique et biologique des sols (stabilité structurale, capacité de rétention d'eau, source d'éléments nutritifs, porosité...) (Balesdent, 1996a ; Le Bissonais et Le Souder, 1995 ; Masciandaro et Ceccanti, 1999 ; Le Villio et al., 2001), et leur conservation est un enjeu non seulement agronomique, mais également environnemental (érosion des sols, inondations...) (Roussel, Bourmeau, et Walter, 2001).

Selon la Chambre d'Agriculture du Languedoc-Roussillon (2011a), cette région présente des sols parmi les plus pauvres en MO en France. Cela s'explique en partie par un climat méditerranéen favorable à la minéralisation des MO, mais également par la prédominance de la viticulture et des grandes cultures sur ce territoire. La faible disponibilité d'effluents d'élevage dans ce bassin de production viticole et céréalier conduit à ce que les

¹ La matière organique d'un sol peut se définir comme « l'ensemble des constituants organiques morts ou vivants, d'origine végétale, animale ou microbienne, transformés ou non, présents dans le sol. » (Chambre d'Agriculture du Languedoc-Roussillon, 2011b)

apports d'amendements organiques soient rarement pratiqués par les agriculteurs (Vignaud, 2006).

1.1.2 Constat n°2 : difficultés d'approvisionnement azoté en blé biologique

Pour ces mêmes raisons, les céréaliers biologiques de la région peinent à répondre aux besoins en azote (N) des cultures puisque la labellisation « Agriculture Biologique » (AB) proscrit tout recours aux fertilisants de synthèse. L'apport d'N peut donc uniquement se faire par insertion de légumineuses dans la rotation et par apport de matières fertilisantes exogènes (engrais organiques, fumiers, composts...).

Bien qu'en AB le blé tendre soit habituellement placé derrière une légumineuse (Arvalis-Institut du végétal, 2013a), cela ne suffit généralement pas à satisfaire les besoins de la culture, et l'apport de fertilisants est indispensable pour répondre aux critères de teneurs en protéines exigés par l'aval de la filière.

Or en Languedoc-Roussillon, comme expliqué au paragraphe précédent, l'apport d'effluents d'élevage n'est pas envisageable à l'échelle de la région, et les engrais organiques du commerce, en plus d'être onéreux, sont rarement bien connus quant à leur dynamique de minéralisation (David, 2004). Leur valorisation dépend fortement des conditions climatiques (notamment humidité du sol) et leur efficacité se trouve donc souvent limitée.

Ainsi, en 2011, les rendements nationaux en blé tendre biologique étaient encore de plus de 50 % inférieurs aux rendements conventionnels (Météyé et Bova, 2012), avec d'importantes variations de rendements dans une même région. Une nutrition azotée insuffisante en est l'une des principales causes, rapportées par David en 2004, avec la concurrence des adventices. De même, les teneurs en protéines des blés tendres biologiques atteignent rarement le seuil minimal de 10,5% exigés par les meuneries, ce qui entraîne alors un déclassement de la récolte et une importante baisse de rémunération à l'agriculteur (Arvalis-Institut du végétal, 2013a).

1.1.3 Constat n°3 : disponibilité du compost de marc de raisin

Parallèlement à sa production céréalière, le Languedoc-Roussillon voue un tiers de sa surface agricole utile (SAU) à la viticulture. Sur ces 236 500 ha de vignes, plus de 99 % sont dédiés à la production de vin (Pailler et al., 2011), ce qui génère chaque année plus de 110

000 tonnes de marc de raisin ² (Vignaud, 2006). Après passage en distillerie afin d'en extraire l'alcool, le marc de raisin désalcoolisé trouve plusieurs débouchés (Vignaud, 2006 ; Kuznik, 2015) :

- après séchage, la pulpe peut servir à l'alimentation animale ou rentrer dans la composition de bouchons d'engrais organiques

- retour du marc non composté aux terres agricoles Bien que celui-ci soit mis gratuitement à disposition des viticulteurs adhérents, sa forte humidité entraîne des transports d'eau superflus et les tanins peuvent rendre difficile la décomposition dans le sol (Kuznik, 2015). Actuellement, le marc non composté est épandu par habitude « culturelle » sur les parcelles de vignes, en très grandes quantités (jusque 100 t/ha) mais outre la clôture des cycles des nutriments, son intérêt agronomique n'est pas clairement connu. Cet épandage a surtout une vocation d'écoulement des surplus (Vignaud, 2006).

- retour aux terres agricoles après compostage. Le compostage du marc permet aux distilleries d'en faciliter le transport (perte de 50% du volume), le stockage et le respect de la réglementation. Le marc de raisin composté est un produit, vendu environ 17 €/tonne livrée. Vignaud estime sa disponibilité à environ 12 000 t/an sur tout le Languedoc-Roussillon (2006). L'épandage de compost de marc de raisin (CMR) est actuellement peu répandu en viticulture (par rapport à l'épandage de marc non composté), et est inexistant en grandes cultures.

Nous sommes donc dans une situation avec d'une part une difficulté de la part des céréaliers Languedociens à s'approvisionner en amendements et engrais organiques, et d'autre part un gisement de compost de marc de raisin, essentiellement utilisé en vigne et dont les intérêts agronomiques sont mal connus.

1.2 Présentation du projet ILLIAD

1.2.1 Origine, objectifs et évolution

C'est dans ce cadre qu'est né en 2012 le volet « blé tendre » du projet ILLIAD (Initiatives Locales ou Localisées, Innovantes pour une Alimentation Durable), financé par

² Le terme « marc de raisin » dénomme la pulpe résiduelle des raisins après pressage des grappes.

l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) via le programme ANR Systèmes Alimentaires Durables (ALID).

Ce projet s'intéresse à la durabilité au sens large (économique, écologique et sociale) des systèmes alimentaires, en relation avec leur organisation. Ainsi, il vise à proposer des innovations dans les filières pêches et abricots, riz, et blé tendre biologique. Il est porté par l'unité mixte de recherche MOISA (Marchés, Organisations, Institutions et Stratégies d'Acteurs) constituée du CIRAD³, de l'INRA⁴, de Montpellier SupAgro et du Ciheam-IAMM⁵.

L'équipe « blé tendre » est complétée par l'ITAB⁶ et le BioCivam⁷ de l'Aude (11). Son objectif particulier est de contribuer à apporter une solution au problème d'approvisionnement en matière organique du blé tendre en Languedoc-Roussillon. Elle se divise pour ce faire en deux volets : une partie agronomique et une partie socio-économique.

Une première étude agro-socio-économique sur la région ayant écarté la possibilité d'échanges fumier/paille entre éleveurs et céréaliers en raison notamment de leur éloignement géographique (Domergue et Costa, 2013), la partie agronomique s'est dirigée vers l'utilisation de marc de raisin composté.

Ainsi en 2013, plusieurs sites d'expérimentation ont été mis en place chez des producteurs de blé biologique ainsi que sur l'unité expérimentale (UE) DiaScope appartenant à l'INRA (également appelée « domaine de Melgueil »).

Lors de la campagne 2013/2014 le blé tendre a été fortement impacté par la présence de carie. Cette maladie du blé, provoquée par le champignon *Tilletia caries*, entraîne de fortes pertes de rendement et donc économiques, souvent répétées d'une année sur l'autre du fait de la persistance du champignon dans le sol. Le seul traitement autorisé en agriculture biologique présentant une efficacité irrégulière (Arvalis-Institut du végétal, 2015) et n'étant pas à la portée de tous les agriculteurs participants, le choix a été fait de mener la campagne 2014/2015 sur de l'orge, plante physiologiquement proche du blé et insensible à la carie.

³ CIRAD : Centre international de recherche agronomique pour le développement

⁴ INRA : Institut national de la recherche agronomique

⁵ Ciheam-IAMM : Centre international des hautes études agronomiques méditerranéennes – Institut agronomique méditerranéen de Montpellier

⁶ ITAB : Institut technique de l'agriculture biologique

⁷ Civam : Centre d'initiatives pour valoriser l'agriculture et le milieu rural

1.2.2 Intérêts d'un essai multi-sites

Le fait de travailler sur plusieurs sites répartis en Languedoc-Roussillon permet d'appréhender une grande diversité des conditions de croissance des cultures au sein de la région. En effet, comme le précisent Johnstone, Lowther et Keoghan (1993), les résultats obtenus dans des conditions pédoclimatiques et des itinéraires techniques particuliers sont difficilement extrapolables à d'autres situations.

Les essais multi-sites balayant une large diversité de conditions culturales permettent de mesurer la variabilité des réponses à la modification d'un facteur tout en répondant au souhait de bien représenter la région d'étude (Johnstone, Lowther, et Keoghan, 1993 ; Gosselin et al., 2014).

1.3 Problématique et questions soulevées

Le compost de marc de raisin est commercialisé en tant qu'« amendement organique » sous la norme Afnor NF U 44-051. L'hypothèse initiale du projet était donc de l'utiliser en tant que tel, c'est-à-dire uniquement dans le but de redresser la teneur en MO des sols. Cependant, les résultats de la première campagne d'étude montrent des rendements directement améliorés par l'épandage de ces composts. Se pose ainsi également la question de son utilisation en tant qu'engrais, c'est-à-dire en tant qu'apport nutritif à la culture.

Ainsi avant de préconiser l'épandage de compost de marc de raisin aux agriculteurs, il est nécessaire de **s'assurer de sa valeur agronomique, en tant qu'engrais N et/ou en tant qu'amendement :**

→ Permet-t-il d'améliorer la quantité et/ou la qualité des grains récoltés ? Si oui, comment ?

→ Permet-t-il d'améliorer la teneur en MO des sols et par conséquent leurs propriétés physiques (statut hydrique, structure) ?

En France, les « engrais organiques » et les « amendements organiques » sont mis sur le marché principalement en référence respectivement aux normes NF U 44-095 et NF U 44-051. Dans ce mémoire, ces termes seront plutôt employés selon la définition de Calvet, Chenu et Houot (chap. 4 page 277, 2015): « Un engrais est utilisé pour améliorer la nutrition minérale des cultures, alors qu'un amendement vise à améliorer les propriétés du sol, dont sa teneur en carbone organique. » .

1.4 Eléments de bibliographie

1.4.1 Rapide point sur les filières blé tendre et orge en France et leurs enjeux

Le blé tendre représente 52 % de la SAU céréalière française. Son principal débouché est la transformation en farine pour la production de pain ce qui exige, d'après l'aval, une certaine qualité technologique, dont une teneur en protéines du grain d'au moins 10,5 %.

L'orge représente 18 % de cette SAU. Elle est principalement fourragère (et donc aucune exigence en protéines), mais un tiers de la production est brassicole. Dans ce dernier cas, l'aval exige une teneur en protéines supérieure à 9,5 %, mais ne dépassant pas les 11,5 %.

Pour ces deux céréales, si les exigences qualitatives ne sont pas respectées, la récolte est souvent déclassée et son prix d'achat revu à la baisse. Notons que la teneur en protéines dépendant étroitement de la variété, le couple variété-teneur en protéines ainsi que la force boulangère (W) restent les principaux critères impactant la valeur boulangère d'un blé (Taupier-Létage et al., 2007).

1.4.2 Physiologie et fertilisation de l'orge et du blé

D'après la synthèse de Meynard et Sebillote (1994), nombre de chercheurs ont montré à plusieurs reprises la similarité de l'élaboration des rendements de plusieurs espèces de graminées à talles. Ainsi le blé, céréale dont la physiologie est amplement explorée, est souvent employé comme « plante-type » pour l'étude d'autres espèces, dont l'orge. Teulat-Merah et al. (2001) précisent en outre que l'orge peut être considérée comme modèle biologique notamment pour les études de réponse aux stress environnementaux

Vis-à-vis des besoins en phosphore (P) et potassium (K), le blé et l'orge sont considérés par le COMIFER⁸ comme des cultures peu exigeantes. Bien que rare, une carence en P ou K entrainera tout de même une limitation des rendements (David, 2004), notamment par une réduction du nombre de grains.

L'azote (N) cependant, est le principal élément nutritif limitant dans la production de ces céréales (ITCF, 2002a). Il joue notamment un rôle primordial dans l'élaboration des rendements et de la teneur en protéines des grains (Meynard et Sebillote, 1994 ; ITCF, 2002b ; David, 2004). L'orge est toutefois moins exigeante en N (2,5 kg N/quintal) que le blé

⁸ COMIFER : Comité d'étude et de développement de la fertilisation raisonnée

tendre (3 kg N/quintal). Cela s'explique par les caractéristiques de l'orge suivantes (ITCF, 2002b) :

- une biomasse aérienne à la floraison plus faible
- un rendement plus dépendant du PMG et du nombre d'épis, composantes peu conditionnées par l'alimentation azotée
- une absorption de l'N plus précoce (cf. Figure 1), qui entraîne notamment des teneurs en protéines plus faibles dans les grains d'orges que dans les grains de blé.

Les stress nutritifs, selon le stade cultural auquel ils surviennent, impactent la mise en place de différentes composantes du rendement (cf. Figure 1). Plus ils sont intenses et longs, plus l'impact sur la culture sera visible.

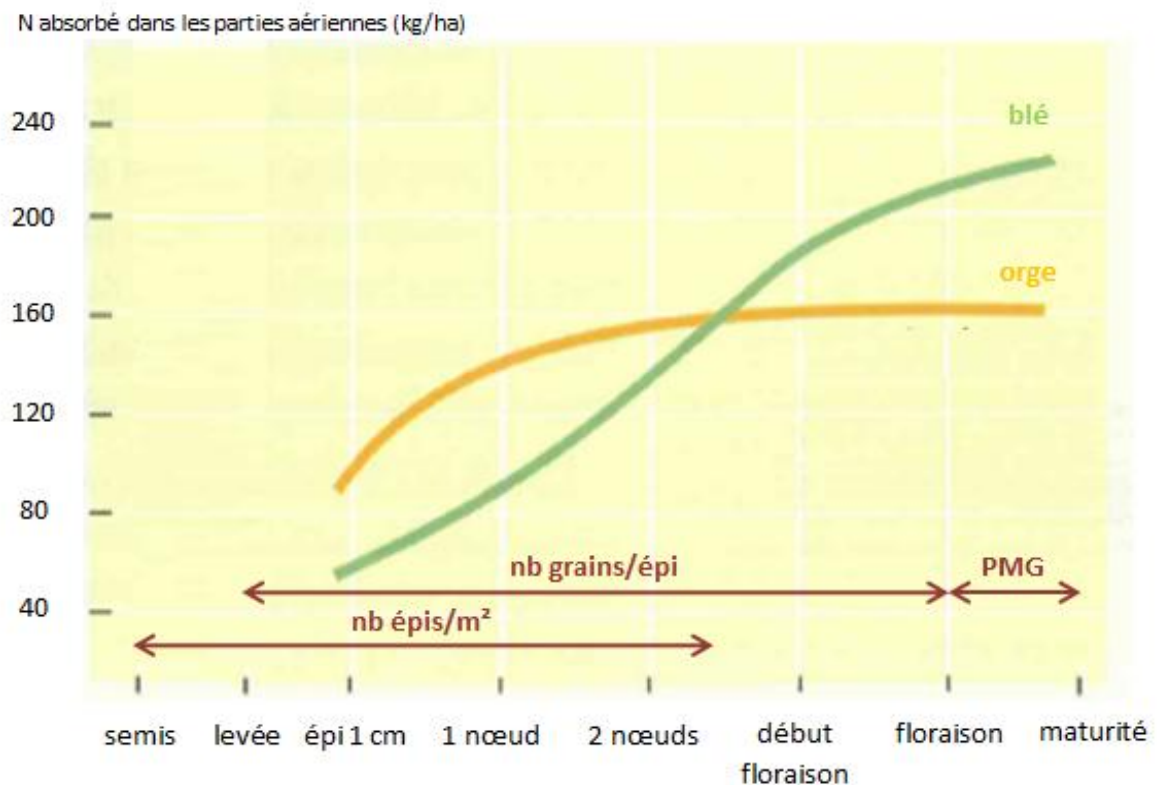


Figure 1 : Evolution de l'absorption de l'N par l'orge et le blé au cours du développement de la culture (courbes) (Source : ITCF 2002b) et phases de formation des différentes composantes du rendement du blé d'hiver, plante modèle de l'orge (flèches) (Source : Meynard et Sebillote 1994)

Ainsi, il est largement reconnu dans la littérature scientifique qu'une carence azotée avant la floraison aura un fort impact négatif sur le nombre de grains par m² (Fisher, 1985 ; Jeuffroy et Bouchard, 1999 ; ITCF, 2002a ; ITCF, 2002b ; David, 2004). Au début de la montaison, le nombre d'épis par m² pourra également être affecté. D'après Gate (1995), le

PMG n'est que peu affecté par la disponibilité de l'N au stade remplissage des grains, car à ce stade c'est l'N de la plante (et surtout des plus jeunes feuilles) qui est remobilisé dans les grains. Pour le blé cependant, on note une absorption d'N post-floraison bien présente (cf. Figure 1), qui va davantage influencer sur la teneur en protéines (Casagrande, 2008).

L'évolution temporelle des différents stades phénologiques est surtout conditionnée par la variété et les conditions climatiques, et, sauf conditions extrêmes, ne semble pas dépendante des conditions de nutrition (Masle, 1981).

Malgré les similarités précitées entre l'élaboration des rendements de l'orge et du blé, les différences de besoins et d'objectifs entre ces cultures conduisent à des gestions de la fertilisation azotée différentes.

Les rendements moyens de ces deux cultures tournent tous deux autour de 65 qx/ha (Données FAOSTAT), s'abaissant à 30 qx/ha en AB (Météyé et Bova, 2012). Le blé tendre a une fertilisation optimale de 220-250 uN/ha fractionnées entre 2 et 4 apports (ITCF, 2002a), le dernier apport, tardif, permettant de jouer sur la teneur en protéines. L'orge brassicole quant à elle, a une fertilisation optimale de 130-150 kg N/ha, sans apport tardif (ITCF, 2002b). Ces différences de pratiques s'expliquent par des objectifs de récolte et des efficacités d'utilisation de l'N différents.

En AB, l'apport d'N par matières organiques exogènes rend délicate la corrélation entre la disponibilité d'N minéral dans le sol et les besoins de la plante.

1.4.3 Méthodes classiques d'évaluation agronomique des produits organiques

1.4.3.1 Caractérisation in vitro du produit

Les effets d'un apport organique sur le sol et la culture dépendent profondément de sa composition chimique, l'analyse de cette dernière constitue la première étape pour la caractérisation agronomique d'un produit organique (Chaussod et Nouaïm, 2004). Elle est en effet indispensable pour déterminer les doses de matière à apporter en champ (en fonction de la concentration en éléments nutritifs et de leur disponibilité, de la présence de contaminants...) et définir le cadre législatif dans lequel il s'inscrit.

Les principaux paramètres à analyser sont les teneurs en matières sèche (MS) et organique (MO) ainsi que les concentrations en éléments nutritifs (N principalement mais aussi P, K, Mg et Ca) (Chambre d'Agriculture du Languedoc-Roussillon, 2011c).

Au-delà d'une analyse de composition stricte, qui informe de l'état du compost avant apport, l'évolution du compost en conditions contrôlées de dégradation permet d'appréhender les dynamiques de minéralisation du carbone et de l'azote.

L'indice de stabilité de la matière organique (ISMO) (Lashermes et al., 2009), calculé à partir du fractionnement biochimique de la MO (proportions de lignine, cellulose, hémicellulose, matières minérales et composés solubles) et de la minéralisation du carbone à 3 jours, indique le pourcentage d'humus stable que peut fournir le compost au sol (= potentiel humigène). Il remplace l'indice de stabilité biochimique (ISB) (Linères et Djakovitch, 1993) et la caractérisation biochimique de la matière organique (CBM-Tr) (Robin, 1997), qui déduisent la dégradabilité de la MO à partir de sa composition sans étude directe de la cinétique de minéralisation du carbone (Chambre d'Agriculture du Languedoc-Roussillon, 2011c ; Calvet, Chenu, et Houot, 2015).

La minéralisation de l'azote organique est étudiée par incubation du produit en conditions contrôlées. La mesure régulière des teneurs en NO_3^- et NH_4^+ durant 91 jours permet d'obtenir la cinétique de minéralisation de l'N organique, et d'identifier un éventuel risque de « faim d'azote » par immobilisation de l'N minéral du sol. De manière simplifiée, l'évolution de la minéralisation sur ces 91 jours donne une idée de l'évolution de la minéralisation en champs sur une année (Bouthier et Trochard, 2009).

Enfin l'innocuité du produit doit être vérifiée par mesure des teneurs en contaminants tels que les éléments traces métalliques (ETM) (arsenic, cadmium, cuivre, zinc...), les composés traces organiques (CTO) (hydrocarbures aromatiques polycycliques...) ou encore les organismes pathogènes.

La caractérisation biochimique sert certes de base à l'évaluation d'un produit organique, mais ne peut constituer une preuve suffisante de son intérêt agronomique. La finalité d'un épandage étant, la plupart du temps, d'améliorer la fertilité du sol et/ou la récolte, des observations en plein champs sont fortement recommandées (Abubaker, 2012). Elles

permettront notamment d'appréhender l'intérêt du produit d'un point de vue économique (gains en rendement, coût de l'épandage...).

1.4.3.2 Etude de son comportement in situ

Ces observations en champs permettent de passer des hypothèses d'impact élaborées suite à l'analyse du produit, à des résultats réels sur le sol et la culture dépendants du contexte pédoclimatique et de l'itinéraire technique appliqué à la parcelle. Notons, en raison de l'hétérogénéité pédoclimatique intrinsèque à une parcelle agricole, la nécessité de répétitions.

Ces études reposent sur la comparaison de micro-parcelles amendées avec des micro-parcelles témoin qui sont non amendées (Elherradi, Souli, et Elkacemi, 2003 ; Gil et al., 2008 ; Dragon et Icard, 2010 ; Deland et Painchaud, 2013) et/ou amendées avec un produit de référence (Chalhoub, 2010 ; Doan et al., 2015).

La détermination de la dose de produit se fait en fonction des quantités d'un élément choisi (azote, carbone...) que l'on souhaite apporter au sol. Elle est ensuite raisonnée selon l'objectif de l'étude. Si ce dernier est de comparer la valeur d'un produit à un autre produit de référence, la dose est calculée de manière à ce que les produits testés et le témoin apportent la même quantité de cet élément. Si le but est d'atteindre un résultat prédéfini (augmentation ou stabilisation de la MO par exemple), un bilan est nécessaire pour calculer les exportations et importations d'éléments à l'échelle de la parcelle. Lorsque l'on s'intéresse à la MO, on distingue les doses de redressement, calculées de manière à rehausser la teneur en MO à un certain niveau, des doses d'entretien, ayant pour but de compenser les exportations.

Selon les objectifs de l'étude, une alternative aux essais en champs est la croissance de cultures en pot (Abubaker, 2012). Cela présente l'avantage d'essais moins encombrants, tout en appliquant les conditions pédoclimatiques souhaitées (supports de culture aux caractéristiques différentes notamment). Cette méthode ne renseigne cependant pas sur les aspects plus « techniques » de l'épandage des composts (contraintes agriculteurs, impact économique, réalités climatiques...).

1.4.3.2.1 Evaluation de la valeur amendante

La fertilité d'un sol dépend de ses propriétés physique, chimique et biologique, et la modification de l'une de ces propriétés conduit inévitablement à modifier les deux autres (Doran, 2002). Pour être complète, l'évaluation d'un apport organique devrait donc étudier

ces trois aspects. Dans la pratique, cela s'avère complexe et onéreux. Des indicateurs de fertilité sont donc choisis selon les objectifs de l'étude.

La teneur en MO du sol est l'un des indicateurs les plus amplement utilisés dans la littérature scientifique du fait de son implication reconnue dans la fertilité des sols (cf. 1.1.1). En plus de la quantité de MO présente dans un sol, un intérêt particulier peut être porté à la nature de cette MO : selon leur taille, les fractions de MO n'ont pas le même comportement.

En effet plus la taille des fractions est grande, plus le turn-over de la MO a lieu (Balesdent, 1996b). On distingue ainsi les MO « libres », de taille supérieure à 50 μm des MO « liées », inférieures à 50 μm (LCA, 2014 ; Salducci, 2014). Les MO libres sont les plus facilement dégradées. Elles représentent la principale source énergétique du sol et sont le support de son activité biologique. Elles se divisent elles-mêmes en MO libres/lentes (entre 50 et 200 μm) et en MO libres/rapides (entre 200 μm et 2 mm). Les MO liées sont plus stables dans le temps. Elles impactent la stabilité physique du sol, assurent les réserves organiques à plus long terme et augmentent la capacité d'échange cationique (CEC).

Le pH du sol a également une grande influence sur la disponibilité des nutriments (Abubaker, 2012), notamment par son impact sur l'activité biologique et la solubilisation des éléments.

D'un point de vue physique, la fertilité d'un sol est principalement appréhendée par sa structure (et donc sa porosité) et la stabilité de cette structure (Védie, 2003).

La structure d'un sol est définie par son organisation spatiale, la forme et la taille des agrégats. Un sol poreux, peu dense et grumeleux, est plus propice à l'enracinement et à la circulation des fluides, et donc à l'infiltration de l'eau. Aussi, la circulation de l'air favorise la minéralisation de la matière organique. La stabilité structurale traduit sa résistance au compactage et aux érosions éoliennes et hydriques. La structure d'un sol s'appréhende couramment par une observation sur le terrain (test pelle bêche de Joseph Görding, profil pédologique).

Dans l'idéal, l'évaluation de la valeur agronomique d'un produit organique se fait sur le long terme (minimum 5 ans d'après Leclerc (2014)) en raison de sa dégradation lente dans le sol. En pratique, cependant, ce type d'essai dure en moyenne entre 2 et 5 ans (Bell et al., 2013). Chaussod et Nouaïm (2004) précisent l'importance d'effectuer de premières analyses

de sol avant le début des essais, ce qui permettra d'ajouter une étude diachronique à la comparaison amendé/témoin.

1.4.3.2.2 Evaluation de la valeur fertilisante azotée

L'évaluation sur parcelle cultivée de la fourniture en N d'un produit organique est délicate, du fait de l'absorption de l'N par la culture simultanément à la minéralisation du produit. Ainsi le suivi de l'N dans le sol ou dans la plante uniquement ne peut suffire à connaître la dynamique du produit *in situ*. Pour ce faire, il est nécessaire de suivre l'azote dans un sol amendé nu, en comparaison avec un sol nu non amendé (Bouthier et al., 2009). Cela permet par la suite de caractériser le produit avec son coefficient apparent d'utilisation (CAU : N absorbé par la culture / N fourni par le produit) et son coefficient d'équivalence engrais (Kéq : quantité de produit nécessaire pour apporter l'équivalent d'un kilogramme d'N minéral pour une certaine situation).

Cependant l'intérêt agronomique d'un produit peut se mesurer directement à l'impact que ce dernier a sur la culture. Ainsi certaines études se contentent de comparer les récoltes des parcelles amendées et témoin, d'un point de vue quantitatif et éventuellement qualitatif (Scott, 1978). Le suivi régulier de la culture au cours de sa croissance permet en outre de mieux comprendre comment le compost impacte la récolte.

Le suivi de la nutrition azotée, facteur explicatif à la fois des rendements et de la teneur en protéines (Casagrande, 2008), peut se faire de plusieurs manières : mesure directe de la concentration en azote dans le végétal par le test de Kjeldahl puis calcul de l'indice de nutrition azotée (INN) ou estimation indirecte de la teneur en azote des feuilles via la mesure de leur teneur en chlorophylle.

L'INN, ayant pour vocation primaire d'aider les agriculteurs dans leur gestion de la fertilisation, se définit comme le rapport entre la concentration en N effective de la tige, et la concentration en N de la tige au-delà de laquelle un apport d'N n'augmentera plus la croissance de la plante (Debaeke, Rouet, et Justes, 2006). Un INN inférieur à 1 indique une déficience de fertilisation, à l'inverse un INN supérieur à 1 traduit une sur-fertilisation.

La concentration en N de la plante peut-être approchée par une mesure non destructive et moins coûteuse : la mesure de la teneur en chlorophylle des feuilles par chlorophylle-mètre (SPAD). Il existe en effet une corrélation linéaire entre la mesure SPAD et la concentration en N foliaire (Peltonen, Virtanen, et Haggrèn, 1995 ; Chapman et Barreto, 1997 ; Wienhold et

Krupinsky, 1999). Cependant, cette corrélation variant énormément avec la variété, l'état hydrique et les stades phénologiques de la plante (Chapman et Barreto, 1997 ; Martinez et Guiamet, 2004 ; Debaeke, Rouet, et Justes, 2006 ; Houlès, Guérif, et Mary, 2007), Debaeke, Rouet et Justes (2006) ont mis en évidence l'intérêt de calculer un indice SPAD basé sur le rapport entre la parcelle observée et une parcelle fertilisée à l'optimum. Cet indice est fidèlement corrélé à l'INN (Debaeke, Rouet, et Justes, 2006) mais nécessite cependant la mise en place de parcelles supplémentaires.

En considérant que les éléments nutritifs libérés par le compost sont absorbés par la culture tant que celle-ci en a besoin, l'estimation approximative des apports azotés du compost peut se faire via la mesure de l'N contenu dans la plante. Notons alors l'importance du suivi de la disponibilité en eau du sol pour s'assurer que les éléments minéraux délivrés par le compost sont bien aptes à être assimilés par la culture.

1.4.4 Connaissances actuelles sur le compost de marc de raisin

Le terme « marc de raisin » désigne le résidu solide après pressage des raisins et extraction du jus. C'est un sous-produit vinicole composé des pellicules, des pépins et des rafles des raisins (IFV, 2013). Jusqu'à l'année dernière, il devait, sauf dérogation, être livré à des distilleries pour désalcoolisation. Le décret n° 2014-903 du 18 août 2014 relatif à la distillation des sous-produits de la vinification donne désormais le choix aux viticulteurs de s'orienter vers la distillation, la méthanisation, le compostage, ou l'épandage direct sur terres agricoles.

Pour les distilleries néanmoins, le marc de raisin désalcoolisé reste un sous-produit dont elles n'ont plus l'usage (cf. 1.1.3). Sa valorisation par retour à la terre s'inscrit dans une logique de recyclage de la MO et se fait actuellement uniquement en viticulture.

Pour être mis sur le marché, une matière fertilisante doit répondre à des critères d'efficacité par rapport à l'usage prévu, d'innocuité et de stabilité et doivent faire référence à un document technique officiel (Chauvin, 2004). Ces critères sont d'autant plus faciles à respecter lorsque le marc de raisin est composté (Kuznik, 2015).

En effet son compostage présente de nombreux avantages, dont l'homogénéisation et la stabilisation du produit, la réduction du volume à stocker et transporter et donc la concentration des minéraux et de la matière sèche ainsi que l'assainissement du produit vis-à-vis des phytopathogènes et des résidus phytosanitaires (Leclerc, 2001).

La composition du CMR varie en fonction de la région, de la récolte viticole, du traitement de la distillerie etc. Sa caractérisation biochimique est cependant bien documentée en Languedoc-Roussillon (Chambre d'Agriculture du Languedoc-Roussillon, 2011d). En général, le CMR répond aux critères de définition d'un amendement organique selon la NFU 44-051 (Chambre d'Agriculture du Languedoc-Roussillon, 2011d ; Gazeau, 2012), à savoir une teneur en matière sèche (MS) au moins égale à 30 % du produit brut (PB); des teneurs en P_2O_5 , N et K_2O inférieures à 3 % chacune et dont la somme est inférieure à 7% . Les composts végétaux doivent en outre avoir une teneur en MO minimale de 20 %.

Les CMR, plutôt riches en MO et avec un ISMO élevé (supérieur à 70 %), peuvent s'avérer intéressant pour redresser et entretenir le taux de MO stable d'un sol (Chambre d'Agriculture du Languedoc-Roussillon, 2011d ; Gazeau, 2012). D'un point de vue fertilisant, c'est un produit qui a une contribution faible voire nulle à la nutrition azotée de la culture l'année de l'apport, du fait de sa minéralisation très lente. Il peut cependant s'avérer être une source intéressant de K.

Le CMR est utilisé en tant qu'amendement de masse en viticulture, c'est-à-dire épandu en grandes quantités. L'étude de son comportement au champ cependant, reste très marginale (Morisset, 2014) et est inexistante en grandes cultures.

2 Objectifs du stage

L'objectif de ce stage est d'évaluer l'intérêt de l'épandage de compost de marc de raisin pour répondre aux problématiques de déficit en MO des sols et en nutrition azotée du blé tendre biologique, à travers son impact sur la culture d'orge.

Les moyens mis en œuvre sont le suivi d'essais au champ sur 9 sites différents répartis en Languedoc-Roussillon, puis la comparaison qualitative et quantitative des récoltes 2015 des parcelles amendées et non amendées, ainsi qu'une comparaison de l'état des sols de ces parcelles à l'issue des deux années d'essai.

Le suivi instrumenté et approfondi des essais au domaine de Melgueil permet, pour cette deuxième campagne d'essai, de comprendre plus en détail le fonctionnement du système CMR-sol-plante.

3 Matériel et méthodes

3.1 Présentation des parcelles et du dispositif expérimental

3.1.1 Les sites d'essai

Les essais sont menés sur 7 parcelles d'agriculteurs Languedociens (5 dans l'Aude et 2 dans le Gard ; sites A1 à A7) et au domaine de Melgueil (M) (cf. Figure 2). Les agriculteurs et leur parcelle ont été sélectionnés au sein des réseaux Civam en fonction de différents critères

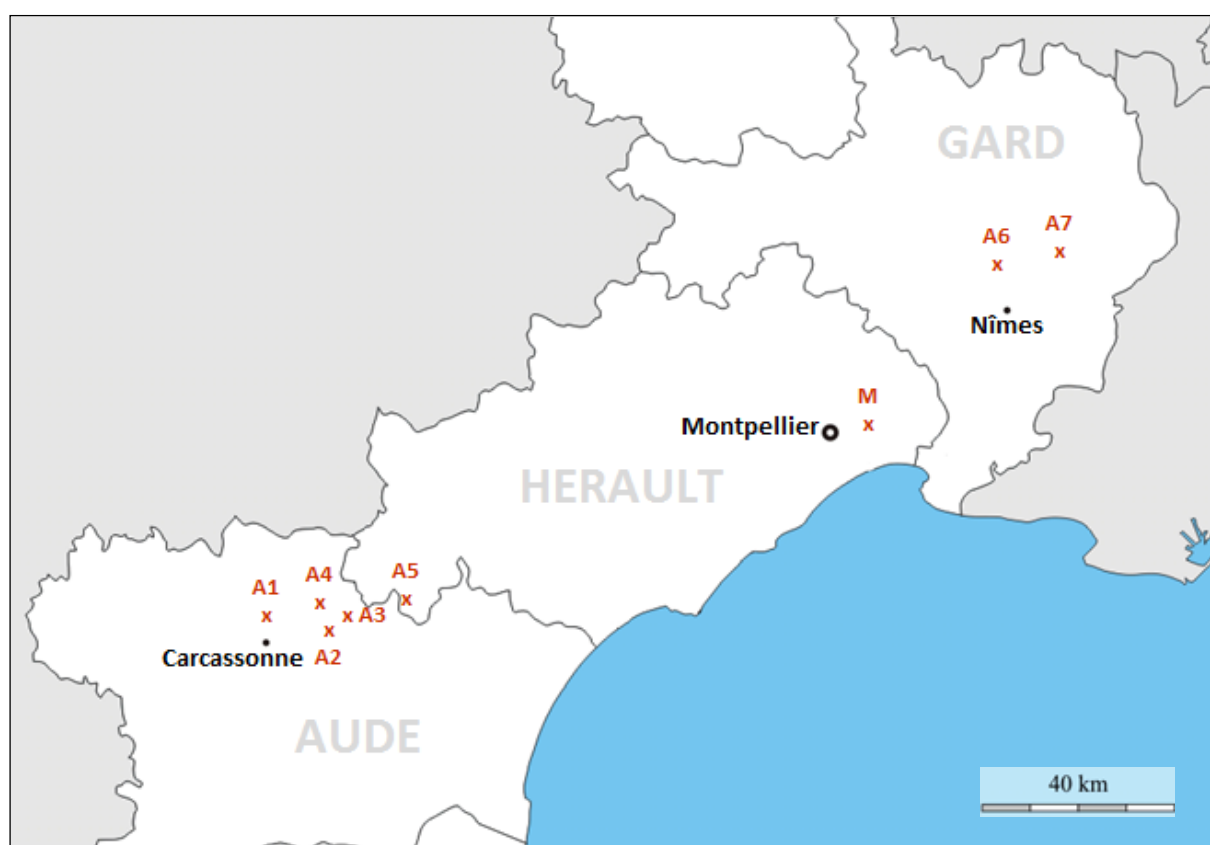


Figure 2: Localisation des sites d'essai : agriculteurs (A) et domaine de Melgueil (M)

Source fond de carte : ©d-maps.com

(historique de la parcelle, accessibilité, intérêt porté par l'agriculteur...).

Tous les sites sont certifiés en agriculture biologique. La météo enregistrée par les stations les plus proches des essais est disponible en Figure 3 (à Rieux-Minervois pour l'Aude, à St-Mamert-du-Gard pour le Gard, et directement au domaine de Melgueil).

En plus des 8 essais implantés en orge, un essai est implanté en blé au domaine de Melgueil (site Mb).

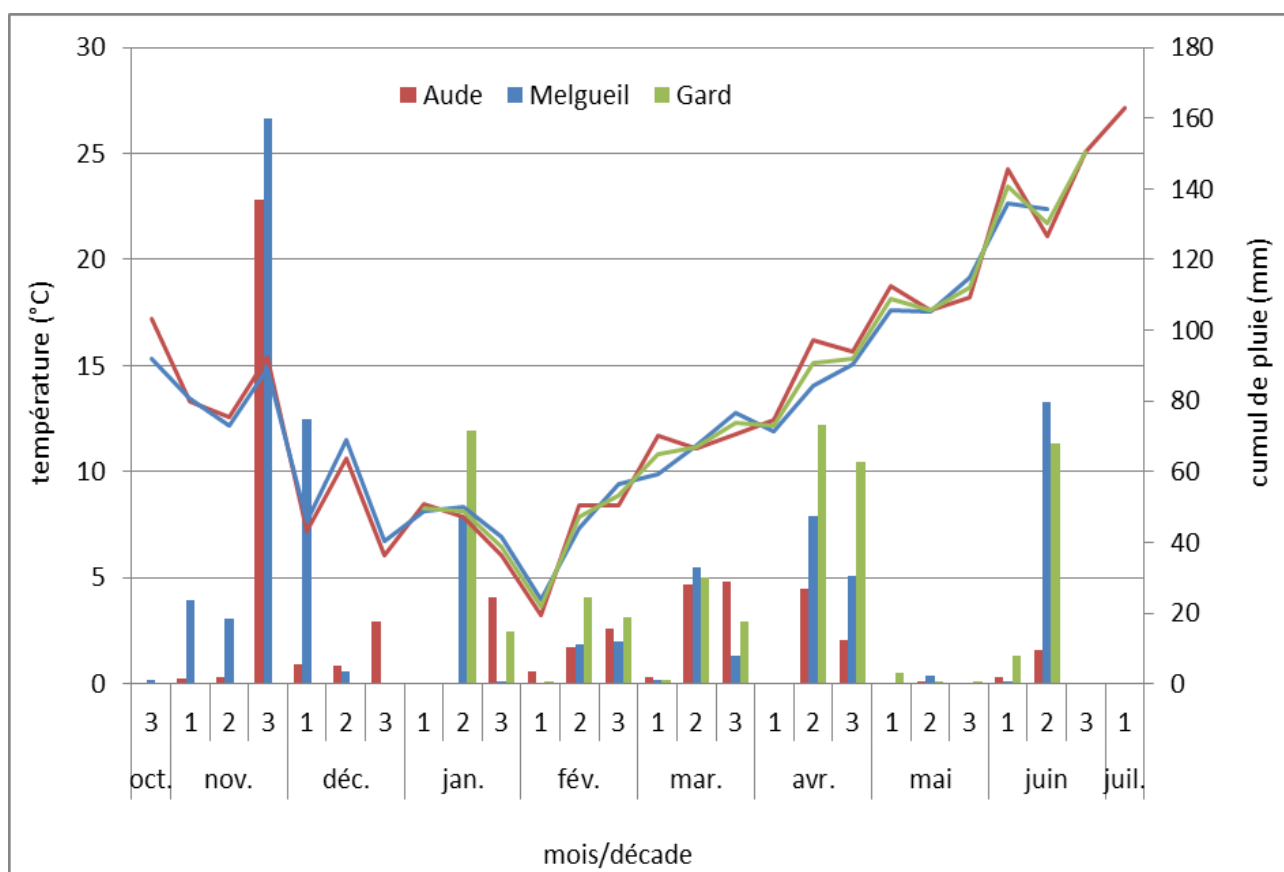


Figure 3: Données climatiques de la campagne 2014/2015, pour l'Aude, le Gard, et le domaine de Melgueil. Les courbes représentent les températures moyennes en °C; les histogrammes le cumul de pluie en mm. Sources données: MétéoFrance (Aude) ; Association Climatologique de l'Hérault (Gard) ; UE Diascope (Melgueil). Pour le Gard, les données ne sont disponibles qu'à partir de la première décennie de janvier.

Les caractéristiques pédologiques de chaque site en début d'essai sont disponibles en annexe i.

3.1.2 L'unité expérimentale DiaScope

L'UE DiaScope est un domaine expérimental appartenant à l'INRA basé à Mauguio (15 km à l'est de Montpellier). Sa fonction est d'offrir un lieu d'expérimentations aux unités de recherche, principalement en grandes cultures et arboricultures. Les principaux domaines étudiés sont la génétique, l'écophysiologie et l'agronomie systémique. Cette UE s'étend sur 75 ha de champs – dont un tiers certifié en agriculture biologique - et 2500 m² de serres.

Les essais installés au domaine de Melgueil permettent un suivi plus régulier et instrumenté par rapport aux essais en milieu paysan.

3.1.3 Dispositif expérimental

Les essais reposent sur une approche factorielle : chaque site d'essai comporte 4 micro-parcelles « compost » (= amendées de CMR avant semis) et 4 micro-parcelles « témoin » (= aucun apport fertilisant ni amendement n'a été effectué sur ces parcelles depuis le début de l'essai). Au sein d'un même site, entre ces deux modalités, le seul facteur variant est l'apport ou non de CMR. Tous les autres paramètres (densité de semis, désherbage...) sont identiques.

Chaque micro-parcelle fait 18 m² (12 m² chez A7). Elles sont disposées selon le plan schématisé en Figure 4.

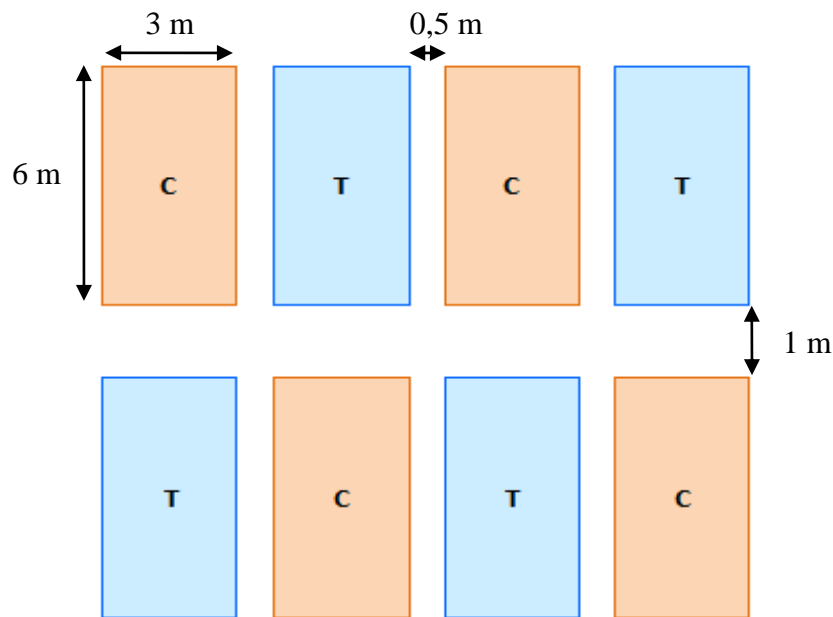


Figure 4: Vue aérienne du dispositif expérimental sur un site d'essai
T: parcelles "Témoin" - C: parcelles "Compost"

Précisons que deux sites accueillent une troisième modalité : la modalité « engrais ». Ce sont des micro-parcelles fertilisées avec un engrais organique commercial. Cette modalité étant implantée « à titre indicatif » (suivi moins approfondi), elle ne sera pas développée dans ce mémoire.

3.2 Matériel de base

3.2.1 Compost de marc de raisin

Les CMR testés sont issus de deux distilleries coopératives appartenant au groupe Grap'Sud : La Gardonnenque SCA (Cruivers-Lascours, 30) dans le Gard et Cap'Sud SCA

(Rieux-Minervoix, 11) dans l'Aude. Tous deux contiennent du marc de raisin désalcoolisé épépiné co-composté avec de la vinasse et quelques rafles.

La composition de ces composts varie inmanquablement en fonction de l'année et de la distillerie, car entièrement dépendante des récoltes des viticulteurs (quantités, qualité, proportions des cépages...) et des conditions de compostage. Néanmoins, sur les deux années d'essai les composts utilisés s'articulent autour des compositions moyennes suivantes (compositions détaillées disponibles en annexe ii):

Tableau 1: Compositions moyennes des composts utilisés sur les deux années d'essai. Données issues d'échantillons analysés par SAS Laboratoire

Origine compost	MS (% PB)	MO (% PB)	ISMO (% MO)	N org (kg/tPB)	N min (kg/tPB)	P2O5 (% PB)	K2O (% PB)	pH
Gard	74,2 ± 2,1	20,51 ± 0,55	83,5 ± 0,5	14,4 ± 0,4	0,6 ± 0,0	1,63 ± 0,16	2,27 ± 0,41	9,8 ± 0,2
Aude	63,1 ± 4,5	32,55 ± 1,34	91,5 ± 2,5	19,5 ± 1,3	0,7 ± 0,6	0,63 ± 0,02	2,22 ± 0,12	9,0 ± 0,6

L'incubation en conditions contrôlées donne les cinétiques de minéralisation de l'N organique suivantes (cf. Figure 5):

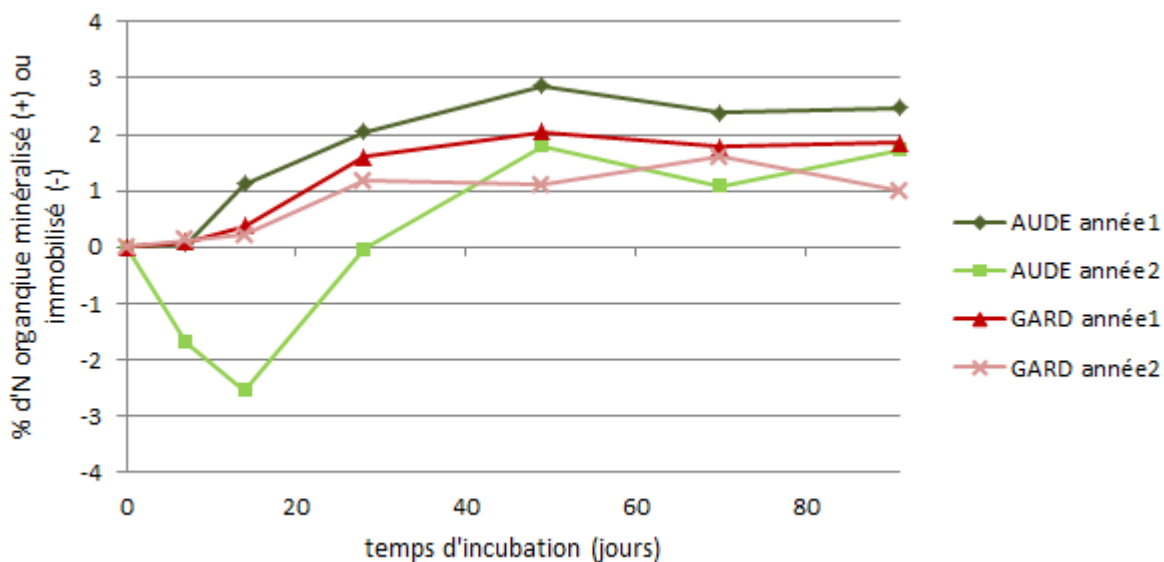


Figure 5: Cinétique de minéralisation de l'N organique des différents composts utilisés. Analyses réalisées par SAS Laboratoire selon la norme Afnor NF XP U 44 163.

Les sites du Gard et le domaine de Melgueil sont amendés avec le compost du Gard, les sites de l'Aude avec le compost de l'Aude.

3.2.2 Traitements

Le CMR est épandu manuellement à l'automne, juste avant le semis qui lui est réalisé par l'agriculteur à la densité de son choix.

Ayant reçu 30 t/ha de CMR lors de la première campagne, les parcelles « compost » ont cette année reçu 10 t/ha (traitement C10), y compris Mb. Ces doses correspondent respectivement aux doses de redressement et d'entretien préconisées par la chambre d'agriculture du Languedoc-Roussillon (2011d).

Les sites A2, A7 et M ayant été déplacés entre les deux campagnes pour raisons techniques, ils reçoivent cette année 30 t/ha (traitement C30).

Le traitement T désigne les micro-parcelles « témoin ».

3.2.3 Orge et blé

La variété Calypso est utilisée pour les essais, à l'exception des agriculteurs A1, A3, A4 et A5 qui ont souhaité utiliser d'autres variétés de leur choix.

Calypso est une orge à deux rangs de qualité brassicole, à potentiel de rendement élevé et potentiel protéique moyen. Les autres variétés sont toutes des orges à 6 rangs, de qualité brassicole, fourragère, ou indéterminée.

Les itinéraires techniques détaillés des différents sites sont disponibles en annexe iii.

La variété de blé tendre Nogal est implantée sur Mb. C'est une variété à potentiel de rendement moyen et potentiel protéique assez élevé.

3.3 Mesures effectuées

3.3.1 Impacts sur la culture

3.3.1.1 Réussite de la levée et pouvoir couvrant

Environ deux mois après le semis, lorsque la levée est estimée terminée et avant le début du tallage, le nombre de graines ayant levé est compté sur 2 m² de chaque micro-parcelle.

Par la suite, aux alentours du stade épi 1 cm, le pouvoir couvrant est évalué sur 2 m² par un pourcentage de couverture du sol par la culture.

3.3.1.2 Composantes du rendement

Sur chaque site, juste avant que l'agriculteur ne moissonne son champ, les épis sont récoltés manuellement sur 2 fois 1 m² de chaque micro-parcelle. Chaque échantillon est ensuite battu en station grâce à une batteuse mobile. Sont déterminées les composantes du rendement suivantes (cf. Tableau 2) :

Tableau 2: Composantes du rendement étudiées et méthodes de détermination.

Composante du rendement	Méthode de détermination
Nombre moyen d'épis par m ²	Comptage manuel
Poids de Mille Grains (PMG)	Pesée de 250 grains comptés par compte-grains, extrapolation
Nombre moyen de grains par épi	$= \frac{\text{Poids échantillon total} \times 1000}{\text{Nombre d'épis par m}^2 \times \text{PMG}}$

Le rendement en quintaux par hectare est obtenu par extrapolation du poids en grains récolté sur 2 m².

L'humidité des grains étant mesurée avec un humidimètre Chopin, les poids (rendements et PMG) sont ramenés à un taux d'humidité standard dans le grain de 15%.

3.3.1.3 Nutrition azotée de la culture

3.3.1.3.1 Reliquats de sortie d'hiver

L'azote minéral (forme nitrique NO₃⁻ et forme ammoniacale NH₄⁺) présent dans le sol en sortie d'hiver (RSH) est dosé pour les horizons 0-30 cm ; 30-60 cm et 60-90 cm. Les échantillons, prélevés à la tarière, sont regroupés par modalité et envoyés après congélation au laboratoire SAS Laboratoire pour dosage par extraction au KCl (méthodes NF X 31-120 et NF EN 13350 pour deux premiers horizons, méthodes NF ISO 14256-2 et NF ISO 11465 pour l'horizon le plus profond).

3.3.1.3.2 Teneur en chlorophylle des feuilles

Sur les essais de Melgueil (M et Mb), des mesures de teneur en chlorophylle des feuilles sont effectuées toutes les semaines. L'appareil utilisé est le chlorophylle-mètre SPAD-502Plus de Konica Minolta (cf. Figure 6). La moyenne de trois mesures effectuées au centre

de l'avant-dernière feuille entièrement déployée du brin maître est retenue, sur 20 plants par micro-parcelle.



Figure 6: Le SPAD-502Plus de Konica Minolta

Le SPAD-502Plus détermine la quantité de chlorophylle dans la feuille, en mesurant l'absorbance de la feuille à deux longueurs d'ondes :

- 650 nm (rouge), qui correspond au pic d'absorption de la chlorophylle. Gitelson, Gritz, et Merzlyak (2003) ont démontré une forte corrélation entre l'absorbance de la feuille à cette longueur d'onde et la teneur en chlorophylle.

- 940 nm (proche infra-rouge), longueur d'onde non absorbée par la chlorophylle, qui permet de s'affranchir de l'absorption faite par les autres constituants de la feuille à 650 nm.

Afin de s'affranchir des variations de valeur SPAD liées au stade phénologique de la culture, les valeurs des deux traitements sont toujours comparées entre elles pour une même date, et le rapport entre les valeurs SPAD des parcelles « témoin » et « compost » peut être calculé (R_{SPAD}). Ce rapport n'est certes pas comparable à l'indice SPAD de Debaeke, Rouet, et Justes (2006) et ne peut être rapproché de l'INN, mais permet de détecter une éventuelle différence de teneur en N des céréales « témoin » et « compost ».

3.3.1.3.3 Teneur en protéines du grain

Les teneurs en protéines de chaque échantillon sont mesurées sur grains entiers par un analyseur infrarouge, l'Infraneo de Chopin, avec une incertitude de 0,2 points protéiques.

3.3.2 Impacts sur le sol

3.3.2.1 Teneur en N totale

La teneur en N totale (N organique + N minéral) du sol est mesurée en début et en fin d'essai pour les parcelles « compost » et « témoin » selon la norme Afnor NF ISO 13878. La profondeur de prélèvement est de 20 cm. A raison de deux prélèvements par micro-parcelle, les échantillons sont regroupés par modalité et déposés pour analyse aux laboratoires SAS Laboratoire (analyses de début d'essai) et Celesta Lab (analyses de fin d'essai).

3.3.2.2 Teneur en MO

De même, la teneur en MO du sol est mesurée en début (MO_{Ei}) et en fin d'essai, pour les parcelles « compost » et « témoin » selon la norme Afnor NF ISO 14235. Il s'agit des mêmes prélèvements que ceux utilisés pour l'analyse d'N.

La teneur en MO mesurée des parcelles en fin d'essai est comparée à la teneur en MO attendue théoriquement en fin d'essai (MO_{att}), calculée comme suit :

Équation 1 : calcul de la teneur en MO attendue pour les parcelles amendées, inspiré de la méthode du bilan humique de Hénin-Dupuis (1945)

$$MO_{att} = MO_{Ei} \times \left[\frac{(100 - k_2)}{100} \right]^2 + \frac{\text{tonnes de CMR apportées/ha} \times MO_{stable} \text{ apportée/tonne de CMR}}{\text{masse de sol sur 20 cm/ha}}$$

Avec :

- k_2 : coefficient de minéralisation secondaire du modèle Hénin-Dupuis, fourni par les analyses de sol SAS Laboratoire

- *tonnes de CMR apportées/ha* : égale à 40 tonnes pour C10 (30 t lors de la première campagne + 10 t lors de la deuxième) et égale à 30 tonnes pour C30 (ce sont les parcelles déplacées, mises en places lors de la deuxième campagne avec 30 t)

- *MO stable apportée/tonne de CMR* : donnée obtenue par les analyses de compost de SAS Laboratoire, calculée à partir de l'ISMO (assimilable au coefficient isohumique k_1 de Hénin-Dupuis)

- *masse de sol sur 20 cm/ha* : donnée obtenue par les analyses de sol de Celesta Lab, calculée à partir de la texture du sol

Des analyses de fractionnement granulométrique de la MO sont effectués en fin d'essai pour les sites A5 et A6.

3.3.2.3 Structure du sol

Après la récolte, au domaine de Melgueil, une observation macroscopique de la structure du sol est réalisée via le test pelle-bêche de Joseph Görding. Le principe est de prélever une bêche de sol puis d'observer les racines, la tenue du bloc et de classer les mottes en fonction de leur état interne selon la classification de Manichon (1982) (Γ : poreuses et grumeleuses, surface rugueuse / Δ : très tassées, surfaces planes et arrêtes droites / Δ_0 : intermédiaire entre Γ et Δ).

3.3.2.4 Potentiel matriciel

Trois lots de sondes Watermark sont mis en place sur le site M sur trois micro-parcelles par modalité : un lot à 30, 60 et 90 cm ; un lot à 30 et 60 cm, et un lot à 30 cm. Ces tensiomètres mesurent le potentiel matriciel de l'eau du sol, c'est-à-dire l'énergie qui doit être fournie (par exemple par les racines d'une plante) pour extraire l'eau du sol. Ce potentiel est dû au fait que les molécules d'eau sont des molécules polaires, dont le pôle chargé négativement est attiré par le complexe argilo-humique chargé positivement. Ce potentiel varie donc avec la quantité d'eau présente dans le sol, mais également en fonction de la nature du sol (texture, taux de matière organique, porosité...). Les mesures de potentiel matriciel sont récoltées régulièrement par une centrale Agribase.

Ainsi les sondes permettent d'une part de renseigner sur la disponibilité en eau du sol et donc sur l'état hydrique de la plante et sa capacité d'assimilation de l'N, et d'autre part de comparer l'état hydrique des micro-parcelles « compost » et « témoin ».

3.3.2.5 Température du sol

Entre le semis et la levée, la température du sol à 5 cm de profondeur est suivie dans les parcelles « compost » et « témoin » au domaine de Melgueil afin d'être en mesure de déceler une éventuelle différence de température influant sur la levée.

3.4 Analyses statistiques mobilisées

Lorsque les données sont récoltées sur toutes les répétitions des huit sites d'étude, une analyse par modèles linéaires à effets mixtes est réalisée avec le package lme4 du logiciel R (script R en annexe iv).

Ces modèles visent à expliquer une variable quantitative en fonction de variables qualitatives et quantitatives, fixes et aléatoires⁹. Ils permettent de prendre en compte la variabilité de réponse à un traitement (ici C30, C10 ou T) liée aux individus (ici liée aux sites d'essai) (Gaudart et al., 2010).

Les facteurs aléatoires sont l'origine du compost, le site d'étude, et la variété, le facteur fixe est le traitement. Les interactions entre ces facteurs sont également testées.

Pour ce modèle statistique, chaque site constitue un bloc. Le dispositif est en blocs incomplets (chaque site possède le traitement T, plus C30 ou C10) et équilibré (chaque traitement représenté présente le même nombre de répétitions).

L'essai Mb n'est pas pris en compte dans ces analyses statistiques du fait qu'il soit implanté en blé.

Pour la comparaison des valeurs SPAD des parcelles « témoin » et « compost » de M et Mb séparément, une analyse de variance (ANOVA) est réalisée à chaque date de mesure.

⁹ Un facteur est aléatoire s'il représente un échantillon d'une sub-population à laquelle on souhaite extrapoler les résultats. Un facteur est fixe si les modalités étudiées sont les seules qui nous intéressent.

4 Résultats

4.1 Impacts sur la culture

4.1.1 Développement de la culture

4.1.1.1 Observations macroscopiques

Sur certains sites, des différences facilement visibles à l'œil nu ont été observées entre les parcelles amendées et non amendées. C'est le cas par exemple du site Mb, où les plants en modalité « compost » semblaient plus hauts que les « témoin ». De même, sur le site A6, le couvert végétal des parcelles amendées apparaissait nettement plus développé tout au long de la culture. Sur le site A1, il est possible que la présence de CMR ait favorisé le développement des adventices. Aucune remarque particulière pour les autres essais.

4.1.1.2 Nombre de levées

Les comptages à la levée n'ont pas été effectués sur les sites A1, A4 et A5 pour diverses raisons techniques (culture ayant déjà tallé, semis non linéaire, adventices graminées...).

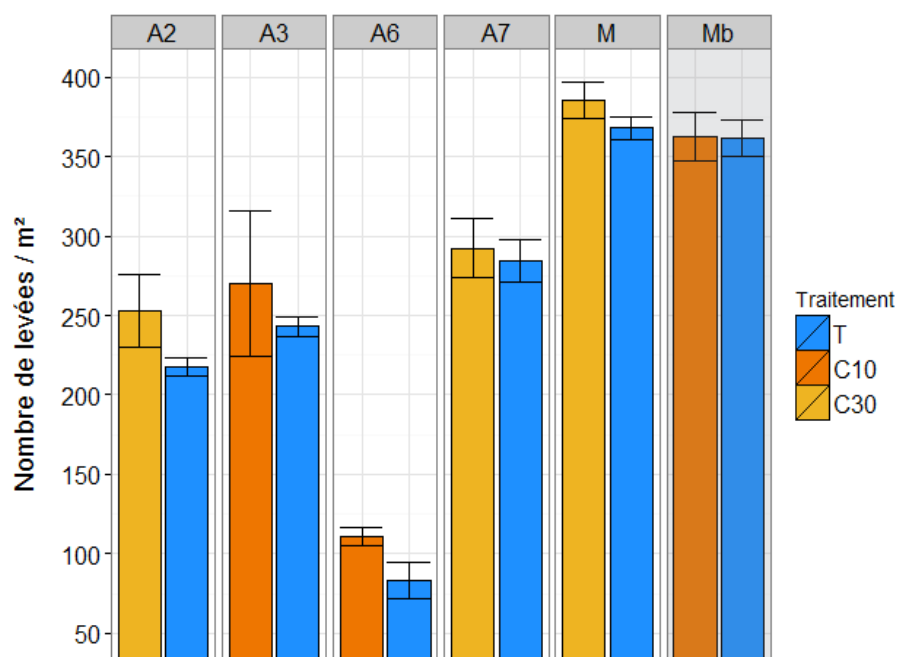


Figure 7: Nombre moyen de levées par m² par site. Les barres représentent les écarts-types.

D'après les résultats des autres sites (cf. Figure 7) un effet positif du CMR sur la levée de l'orge semble se dégager, malgré des variations intra-sites non négligeables. L'augmentation du nombre de levées est toutefois très variable, allant de + 2,7 % pour A7 à

+ 33,7 % pour A6. La comparaison des modèles mixtes confirme cet effet de manière significative (p-value = 0,001 et $\chi^2=13,50$), sans influence des facteurs « origine du compost » ni « variété ».

Sur blé cependant, aucun impact sur le nombre de levées n'est observé.

4.1.1.3 Pouvoir couvrant

En raison de nombreuses adventices sur la majorité des sites, le pouvoir couvrant de la culture a seulement été observé chez A2, A3, M et Mb.

Pour tous ces sites néanmoins, le pouvoir couvrant est en moyenne plus haut pour les parcelles amendées, malgré une variabilité inter-sites élevée (cf. Tableau 3).

Tableau 3: Rapport du pouvoir couvrant des parcelles amendées et celui des parcelles "témoin"

Sites	A2	A3	M	Mb
$\frac{\text{Pouvoir couvrant "amendé"}}{\text{Pouvoir couvrant "témoin"}}$	1,32	1,06	1,42	1,14

4.1.2 Rendement et ses composantes

4.1.2.1 Nombre d'épis par m²

Dans la plupart des cas on ne note aucun effet marqué du CMR sur le nombre d'épis / m² (cf. Figure 8). Les quelques différences de moyennes observées pour les sites A5, A7, M et Mb sont négligeables vis-à-vis de l'importance des écart-types. Notons le cas particulier du site A6, pour lequel on dénombre plus de 60 % d'épis en plus pour le traitement C10.

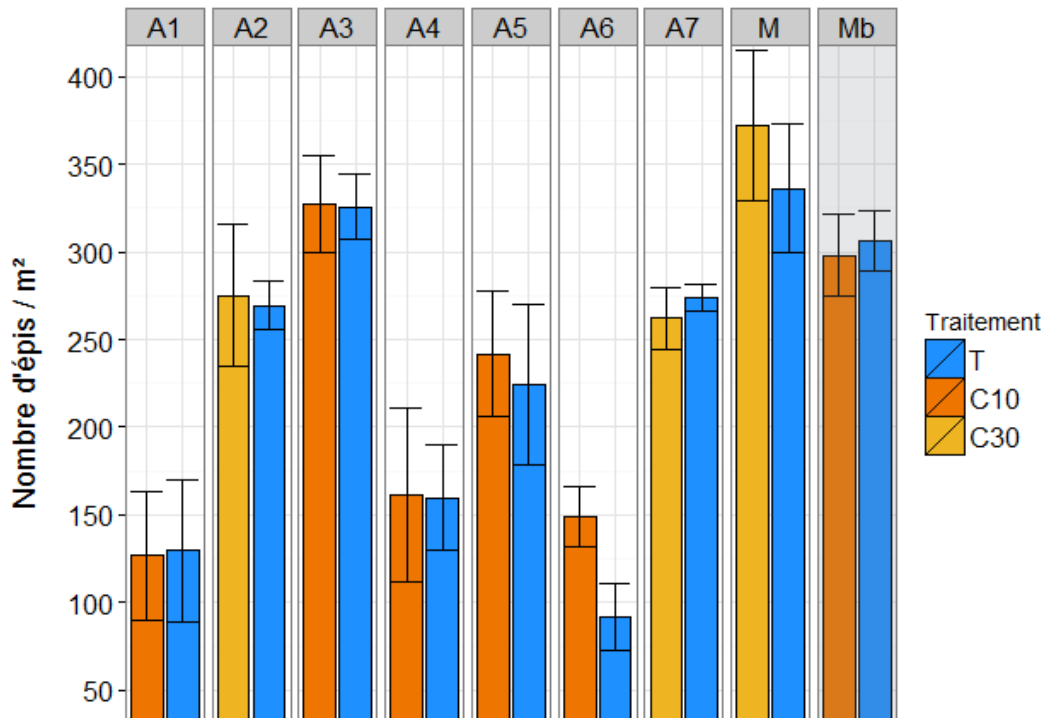


Figure 8: Nombre moyen d'épis par m² par site. Les barres représentent les écarts-types.

Sans surprise, l'analyse par modèle mixte ne conclut à aucun effet significatif du traitement sur le nombre d'épis par m². Le site est le facteur permettant à lui seul d'expliquer au mieux cette composante, sans intervention des facteurs « traitement », « variété » et « origine du compost ».

4.1.2.2 Nombre de grains par épi

Sur tous les sites d'essai, à l'exception d'A3 et A4, l'ajout de compost semble avoir un effet positif sur le nombre moyen de grains/épi même si les écart-types sont parfois importants (cf. Figure 9). Cela s'observe également pour l'essai en blé. Il semble que les parcelles ayant reçu 30 tonnes à l'automne 2014 se démarquent plus des parcelles « témoin » que les parcelles ayant reçu 10 tonnes.

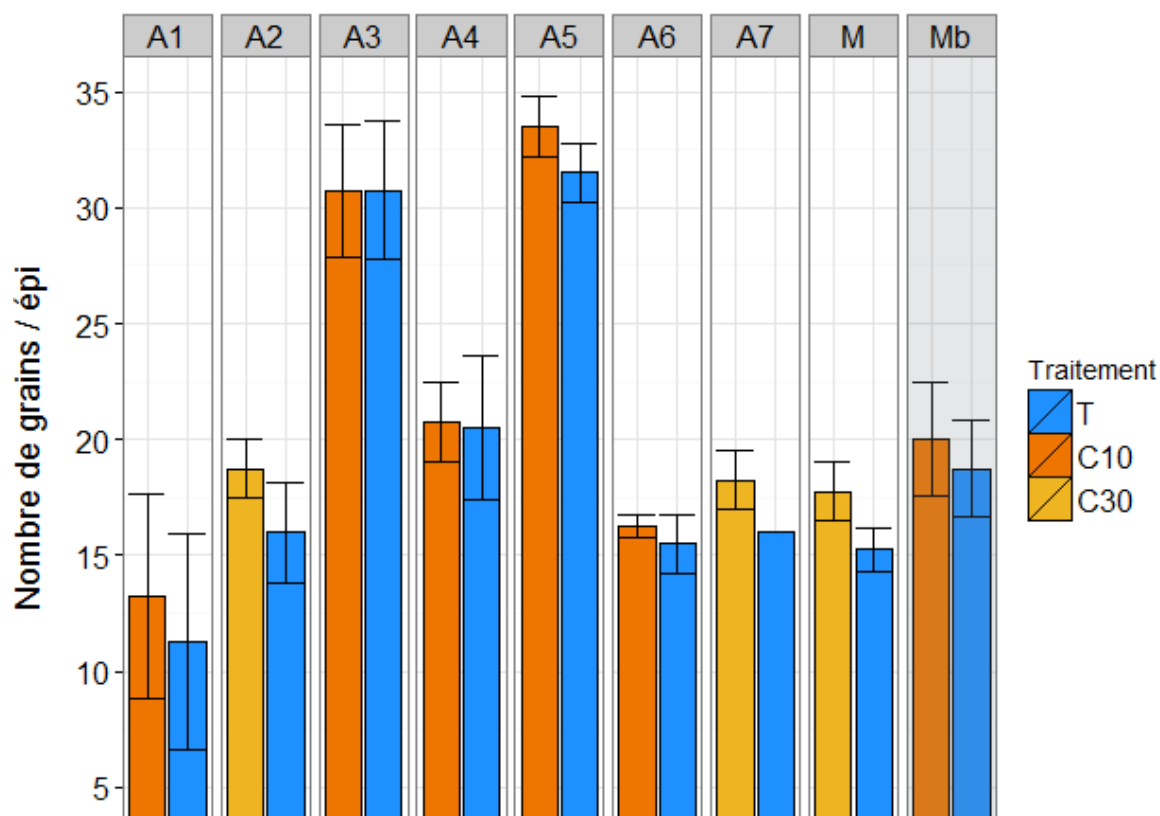


Figure 9: Nombre moyen de grains par épi par site. Les barres représentent les écarts-types.

Effectivement, d'après l'analyse des modèles mixtes, l'apport de compost augmente significativement le nombre de grains par épis (p -value = 0,005 et $\chi^2=10,69$). Cette augmentation est de l'ordre de $+ 6,9 \pm 3,8$ % pour C10 et de $+ 15,0 \pm 0,6$ % pour C30. On ne note pas d'effet « site » ou « origine du compost » sur cette composante, mais un effet « variété » non surprenant.

4.1.2.3 Poids de mille grains

Tout comme le nombre d'épis/m², le PMG réagit différemment au compost selon le site d'étude (cf. Figure 10). On note néanmoins une baisse particulièrement marquée pour A5, A7 et M.

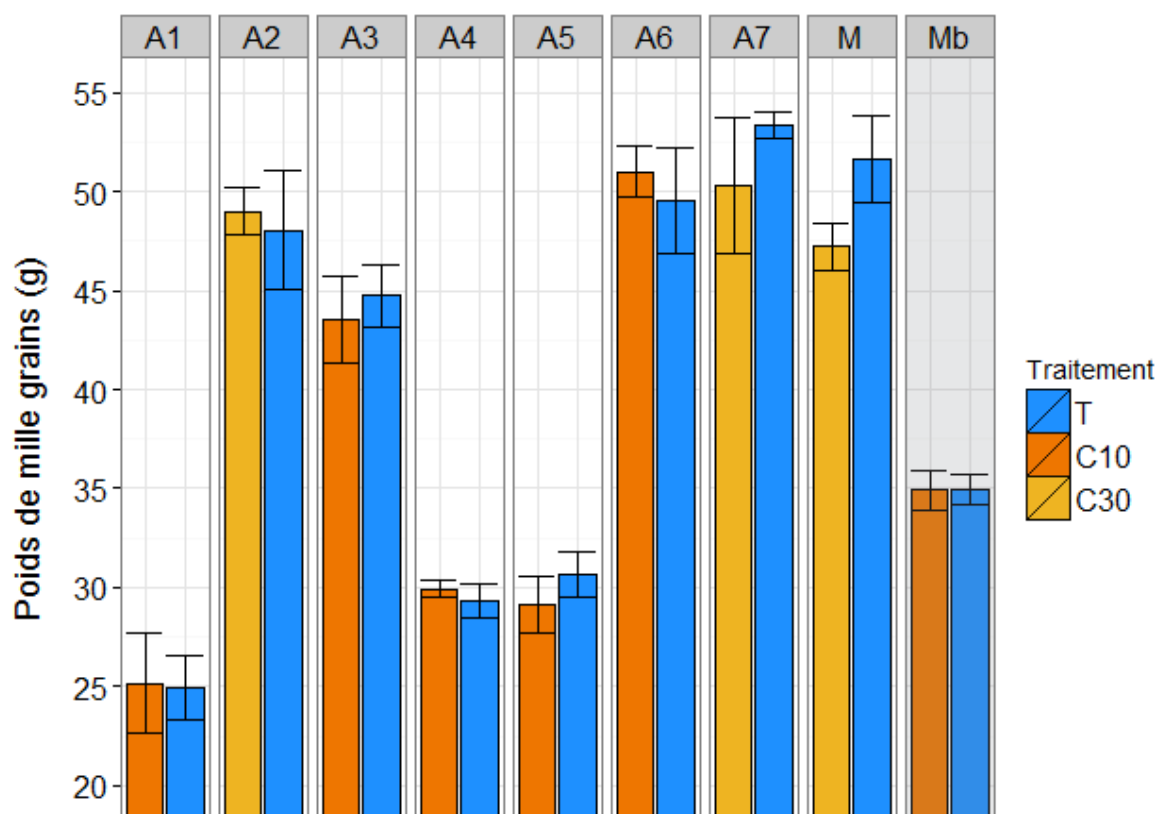


Figure 10: Poids moyen de mille grains par site, en grammes. Les barres représentent les écarts-types.

Les analyses statistiques révèlent un effet compost significatif sur le PMG (p -value = 0,036 et $\chi^2=6,65$), à tendance plutôt négative même si très variable: $-0,3 \pm 2,2\%$ pour C10 et $-4,1 \pm 4,1\%$ pour C30. Encore une fois, le facteur « origine du compost » n'influe pas sur cette composante, contrairement aux facteurs « site » et « variété ».

4.1.2.4 Rendements

Sur tous les sites d'étude (sauf A3), la moyenne des rendements des parcelles amendées est supérieure à celle des parcelles « témoin » (cf. Figure 11). Néanmoins cette différence est souvent minime, surtout par rapport aux écart-types au sein des sites. Pour trois sites (A2, A6 et M), l'augmentation des rendements est intéressante.

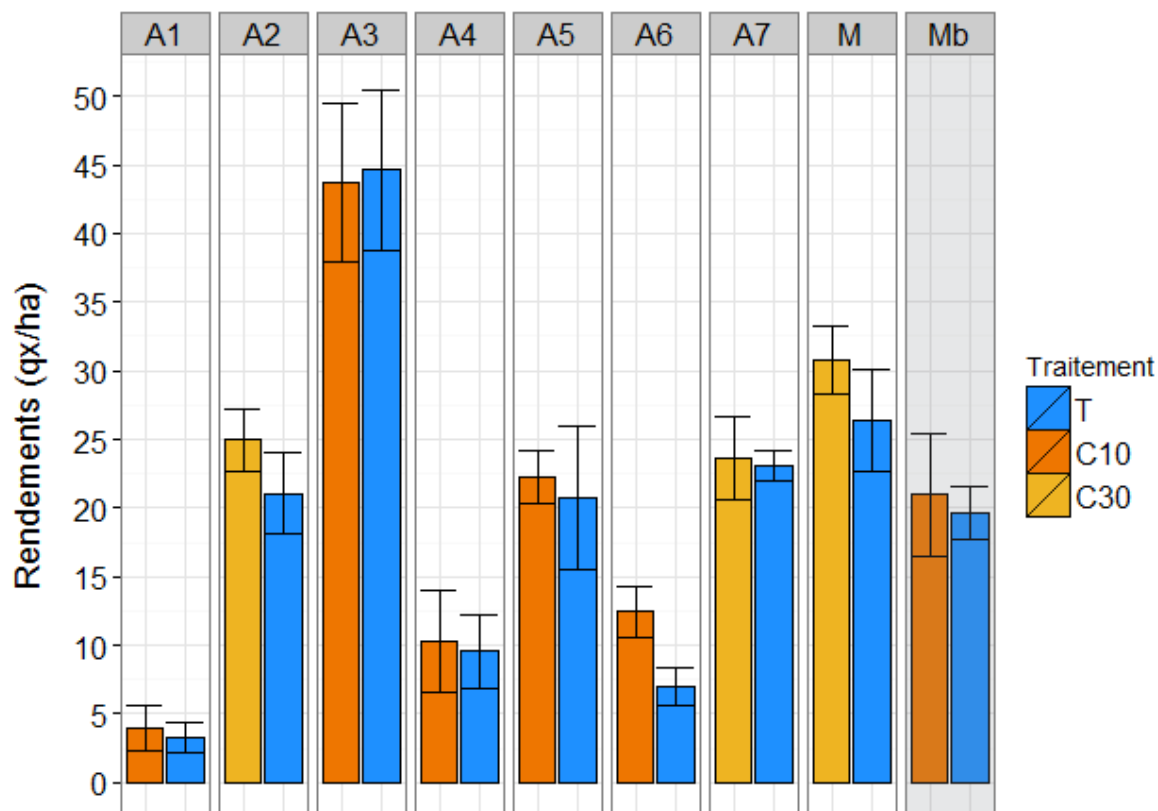


Figure 11: Rendements moyens par site, en quintaux / hectare. Les barres représentent les écarts-types.

La comparaison des modèles linéaires mixtes montre un effet significatif du traitement sur les rendements (p -value = 0,034 et $\chi^2=6,74$), mais confirme cette variabilité : + 19,7 ± 20,0 % pour C10 et + 12,5 ± 6,8% pour C30.

Le site est le facteur aléatoire contribuant le mieux à l'explication des résultats. On note également un effet « variété ».

4.1.3 Nutrition azotée de la culture

4.1.3.1 Reliquats de sortie d'hiver

Aucune tendance ne se dégage clairement des résultats de RSH quant à la différence entre parcelles amendées et non-amendées (cf. Figure 12).

Notons que les fortes teneurs en N-NH_4^+ (notamment pour les sites A2, A3, A4, A6 et A7) s'expliquent probablement par de forts évènements pluvieux quelques jours avant les prélèvements, pour deux raisons. D'une part la saturation en eau du sol bloque l'activité aérobie des bactéries assurant la nitrification, et d'autre part les NO_3^- sont plus facilement lessivés que les NH_4^+ car moins retenus par les colloïdes chargés négativement.

Généralement les teneurs en N sont plus hautes à faible profondeur (hormis A1 et A7), ce qui est cohérent avec une minéralisation de la MO plus active en conditions de surface.

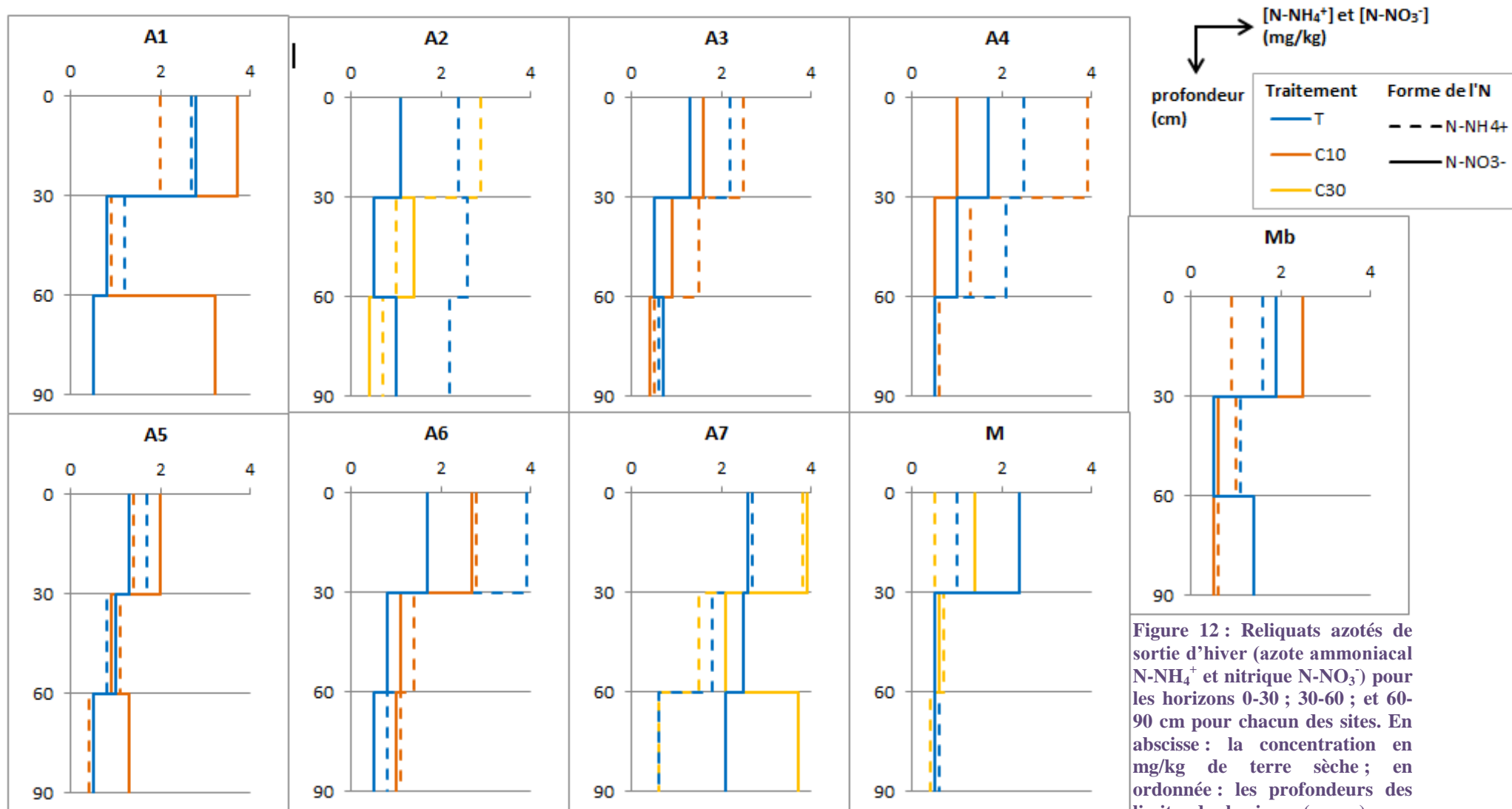


Figure 12 : Reliquats azotés de sortie d'hiver (azote ammoniacal $N-NH_4^+$ et nitrique $N-NO_3^-$) pour les horizons 0-30 ; 30-60 ; et 60-90 cm pour chacun des sites. En abscisse : la concentration en mg/kg de terre sèche ; en ordonnée : les profondeurs des limites des horizons (en cm).

4.1.3.2 Teneur en chlorophylle des feuilles

Les mesures SPAD ont commencé à Melgueil début avril, alors que le blé et l'orge étaient aux stades 3 nœuds et 2 nœuds respectivement.

On note pour l'orge comme pour le blé une teneur en chlorophylle des feuilles globalement significativement plus élevée pour les parcelles « compost » que pour les « témoin », entre la mi-avril (courant montaison) et début mai (fin floraison) (cf. Figure 13). Au cours de cette période, on a un rapport R_{SPAD} moyen de 104,5 % pour le blé et 104,2 % pour l'orge.

Le décrochement du 13 mai correspond au début de la sénescence des feuilles : la remobilisation dans le grain débute et les feuilles jaunissent.

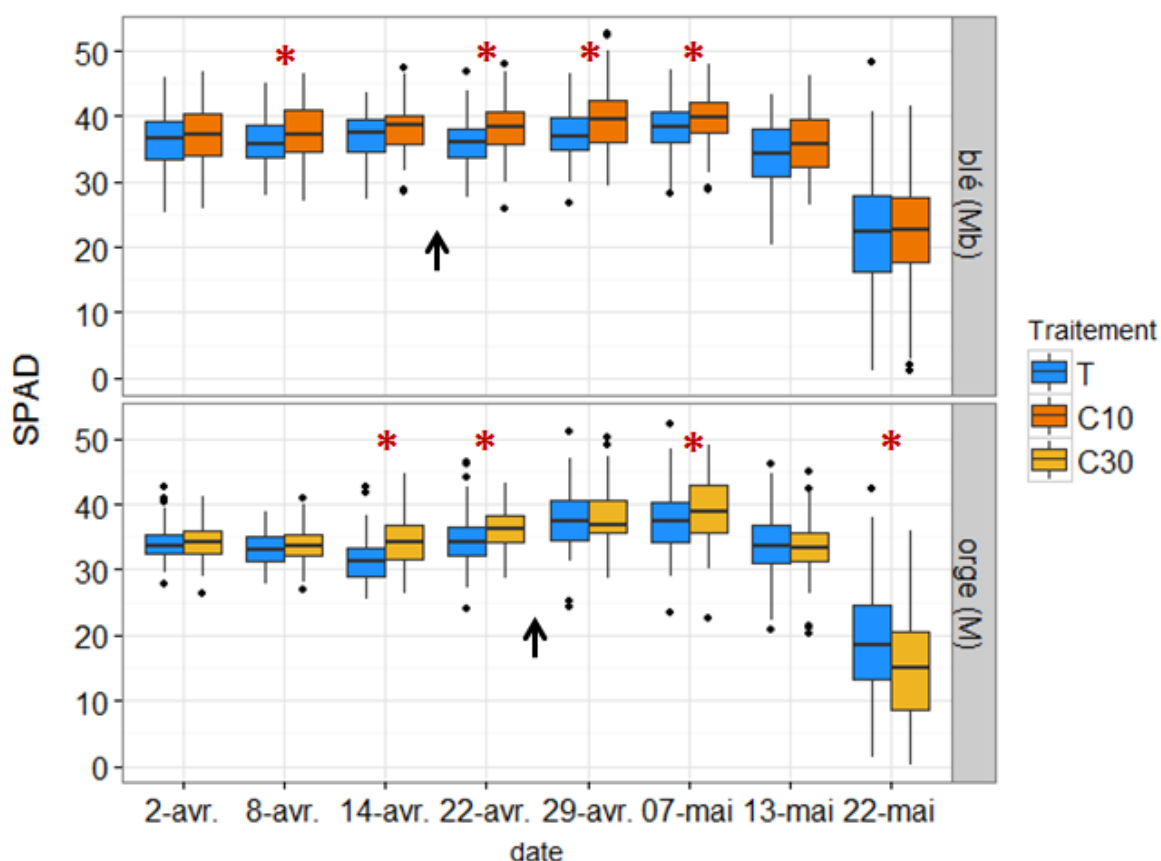


Figure 13: Evolution temporelle des valeurs SPAD pour les sites Mb (en haut) et M (en bas) selon les différents traitements. Sur les boxplots, chaque barre représente un quartile. Les flèches noires indiquent les dates auxquelles 50% des plants sont à épisaison. Les étoiles rouges indiquent que le test ANOVA a révélé une différence significative (à p -value < 0,05) entre les valeurs SPAD des parcelles « témoin » et « compost » pour ce site à cette date.

4.1.3.3 Teneur en protéines

On ne distingue aucun effet clair de l'apport de CMR sur la teneur en protéines des grains (cf. Figure 14) : les parcelles « compost » ont des teneurs protéiques moyennes parfois plus élevées que les « témoin » (A7 notamment), et parfois plus basses (A6), mais les écarts-types restent toujours très élevés.

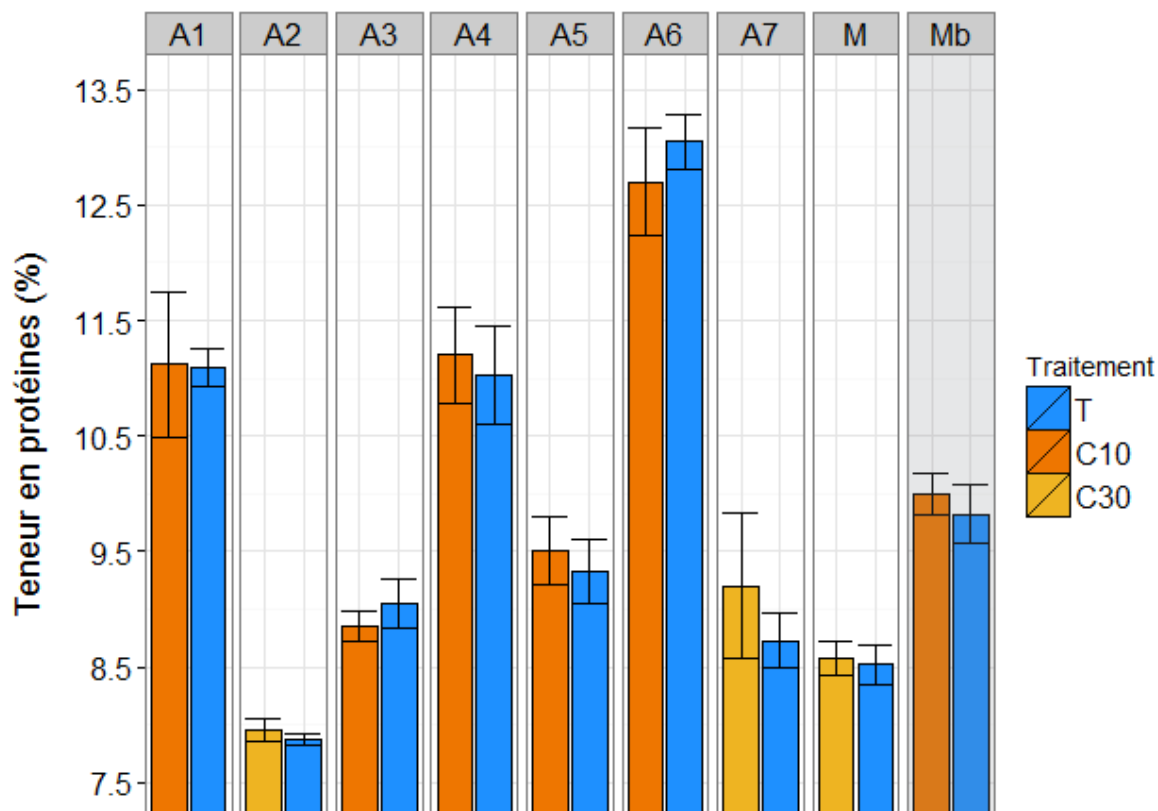


Figure 14: Teneur en protéines moyenne par site, en %. Les barres représentent les écarts-types.

Les résultats de l'analyse par modèles linéaires mixtes confirment effectivement que le « site » est le seul facteur explicatif, parmi ceux étudiés, de cette teneur protéique.

4.2 Impacts sur le sol

4.2.1 Teneur en N

Pour tous les sites, à l'exception d'A4, la teneur en N a diminué depuis 2013 lorsqu'aucun apport de CMR n'a été effectué (cf. Figure 15). Cette baisse est d'en moyenne $- 15,7 \pm 6,3 \%$ de la valeur initiale. L'apport de CMR au contraire a permis d'augmenter l'N total par rapport à l'Ei dans la majorité des cas (A1, A4, A7, M et Mb) et par rapport aux parcelles « témoin » dans la totalité des cas (sauf A5). Notons que ces augmentations ne sont pas systématiquement significatives à la vue des incertitudes de mesure.

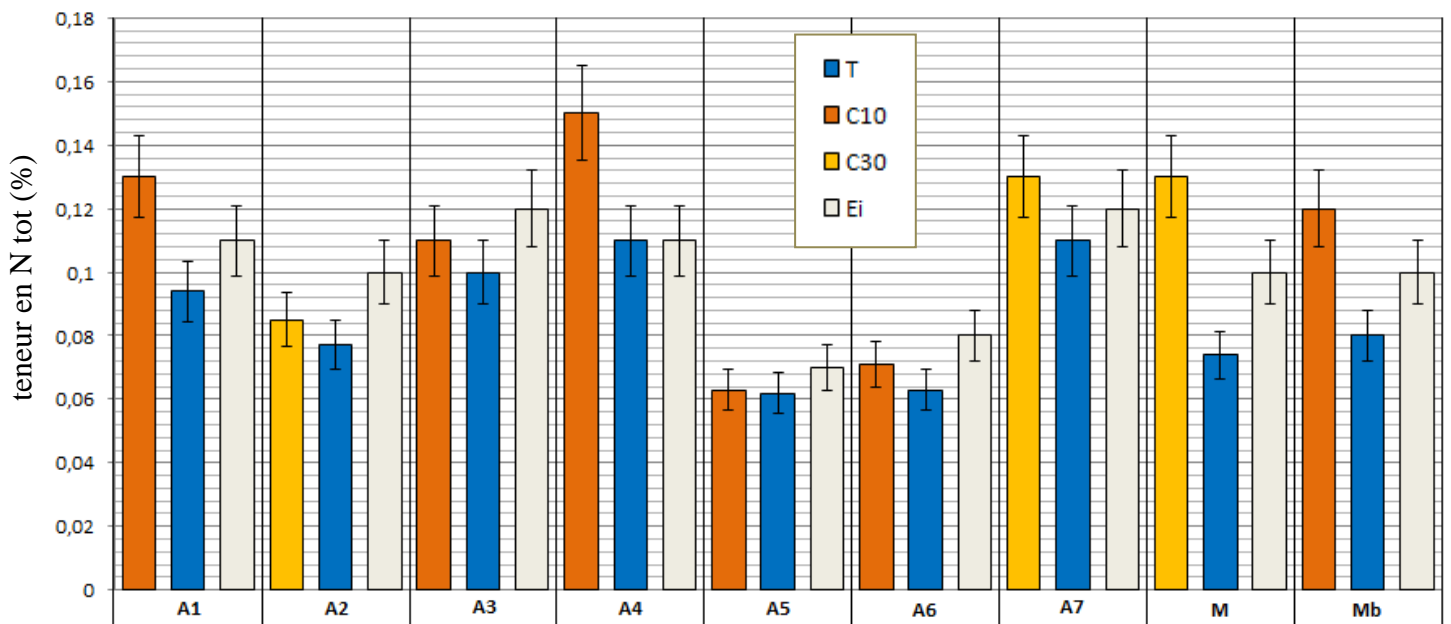


Figure 15: Teneur en N totale du sol dans les 20 premiers centimètres en début et en fin d'essai (en % de sol sec). Légende : T, C10 et C30 : résultats de fin d'essai (été 2015 – prélèvements analysés par Celesta-Lab) ; Ei : Etat initial du site en début d'essai (automne 2013 – prélèvements analysés par SAS Laboratoire). Les barres représentent les incertitudes de mesure.

4.2.2 Teneur en MO et fractionnement granulométrique

Une grande similarité est observée entre les évolutions des teneurs en N et en MO (cf. Figure 15 et Figure 16).

La diminution de teneur en MO entre Ei et T est observée pour tous les sites à l'exception d'A1 et A4 (cf. Figure 16). Tout comme la teneur en N, cette baisse est d'en moyenne $-15,7 \pm 7,1$ % de la valeur initiale, et l'apport de CMR a augmenté la teneur en MO par rapport à Ei pour les 5 mêmes sites que pour l'N. L'augmentation par rapport aux parcelles « témoin » est moins marquée pour A1, A3 et A6.

La teneur en MO attendue pour les parcelles amendées n'est pas atteinte pour 4 cas (A2, A3, A5 et A6). Néanmoins elle l'est pour les autres et est même dépassée pour A4.

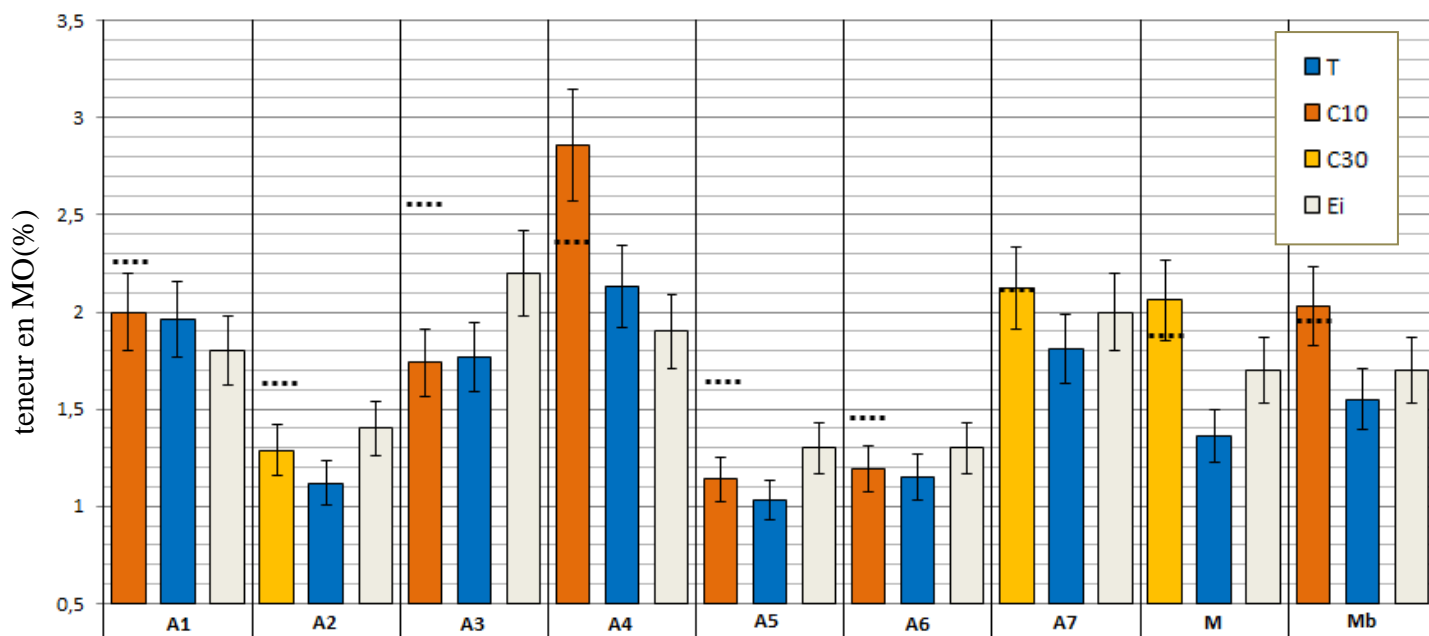


Figure 16 : Teneurs en MO du sol dans les 20 premiers centimètres en début et en fin d'essai (en %). Légende : T, C10 et C30 : résultats de fin d'essai (été 2015 – prélèvements analysés par Celesta-Lab) ; Ei : Etat initial du site en début d'essai (automne 2013 – prélèvements analysés par SAS Laboratoire). Les barres représentent les incertitudes de mesure. Les traits pointillés représentent la valeur attendue de teneur en MO pour les parcelles amendées (cf. Équation 1)

Le fractionnement granulométrique de la MO révèle que malgré des teneurs totales en MO relativement semblables (cf. Figure 16) la MO des sols amendés est plus libre que celle des sols non amendés (cf. Figure 17). En effet pour les deux sites A5 et A6, le pourcentage de MO liée/très lente est plus faible en « compost » qu'en « témoin », et la fraction de MO libre/lente est accrue, en particulier pour A6.

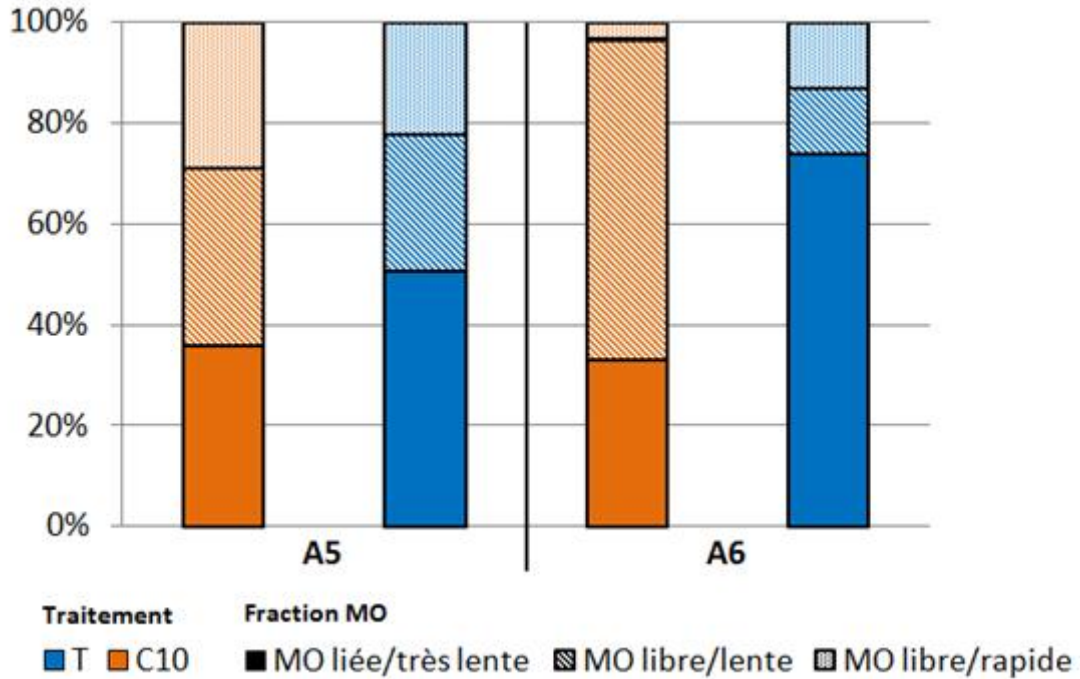


Figure 17: Répartition relative des différentes fractions granulométriques de la MO dans les 20 premiers centimètres des sols des sites A5 et A6. MO liée/très lente = < 50 µm ; MO libre/lente = entre 50 µm et 200 µm ; MO libre/rapide = entre 200 µm et 2 mm.

4.2.3 Test pelle-bêche de Joseph Görding

L'observation macroscopique de la structure du sol ne laisse pas apparaître de différence prononcée entre les parcelles T, C30 et C10 (sites M et Mb).

Dans certaines parcelles amendées, on note des mottes légèrement plus grumeleuses, de type Γ , par rapport à certaines parcelles T comprenant plus de mottes à arrêtes droites, de type Δ_0 (cf. Figure 18). Ces observations sont cependant loin d'être généralisées et peuvent être liées à l'hétérogénéité spatiale pédologique.

Des traces de CMR encore visibles sur les premiers centimètres témoignent d'une dégradation incomplète du produit à ce stade. Aucune différence n'est observée au niveau de la densité de l'enracinement, ni de sa profondeur.

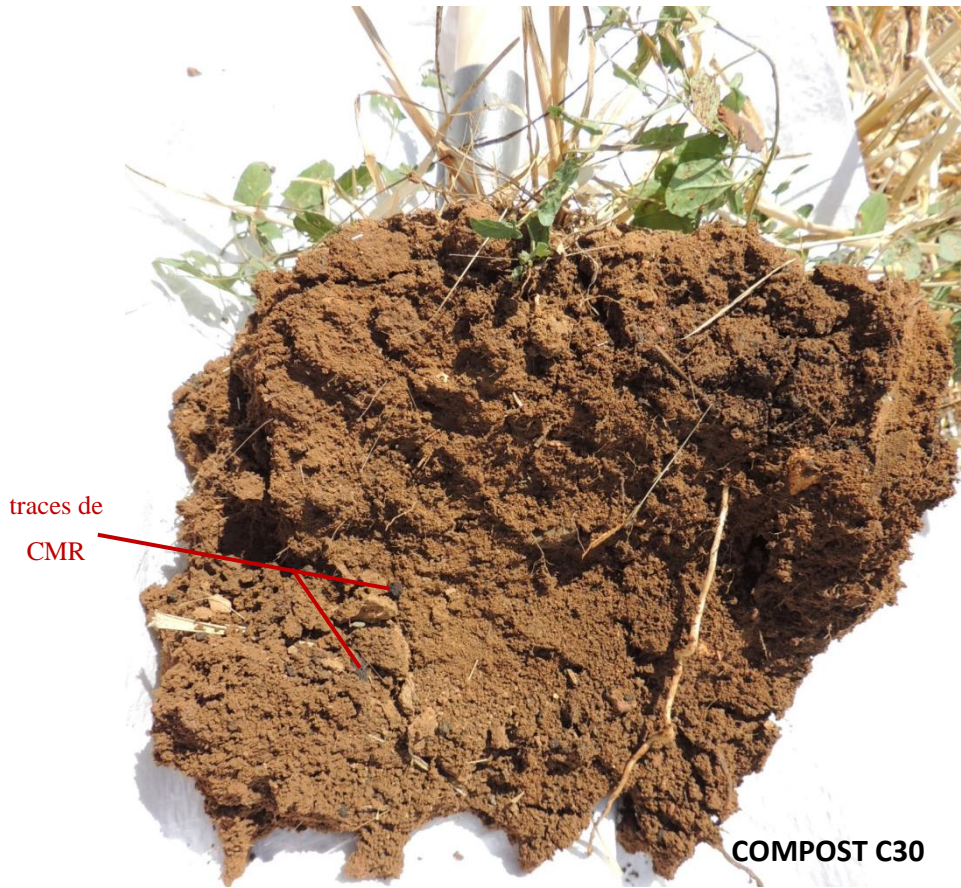


Figure 18: Photographies de bêchées de sol lors du test pelle-bêche sur le site M, dans une parcelle C30 (en haut) et une parcelle T (en bas).

4.2.4 Statut hydrique du sol

L'apport de CMR ne joue pas de manière évidente sur le potentiel matriciel du sol moyen à aucune des trois profondeurs (cf. Figure 19). Notons tout de même que pour les trois profondeurs, c'est la courbe du traitement C30 qui se trouve en dessous de la courbe T, ce qui peut laisser penser que l'eau du sol de C30 est légèrement moins disponible que l'eau de T.

Les potentiels moyens des deux traitements restent cependant très proches, avec des variabilités très prononcées et une incertitude de mesure élevée (< 10 kPa pour des valeurs supérieures à -30 kPa ; et fiabilité des mesures non garantie en-deçà de -70 kPa). On peut éventuellement noter des valeurs légèrement moins dispersées pour les parcelles amendées.

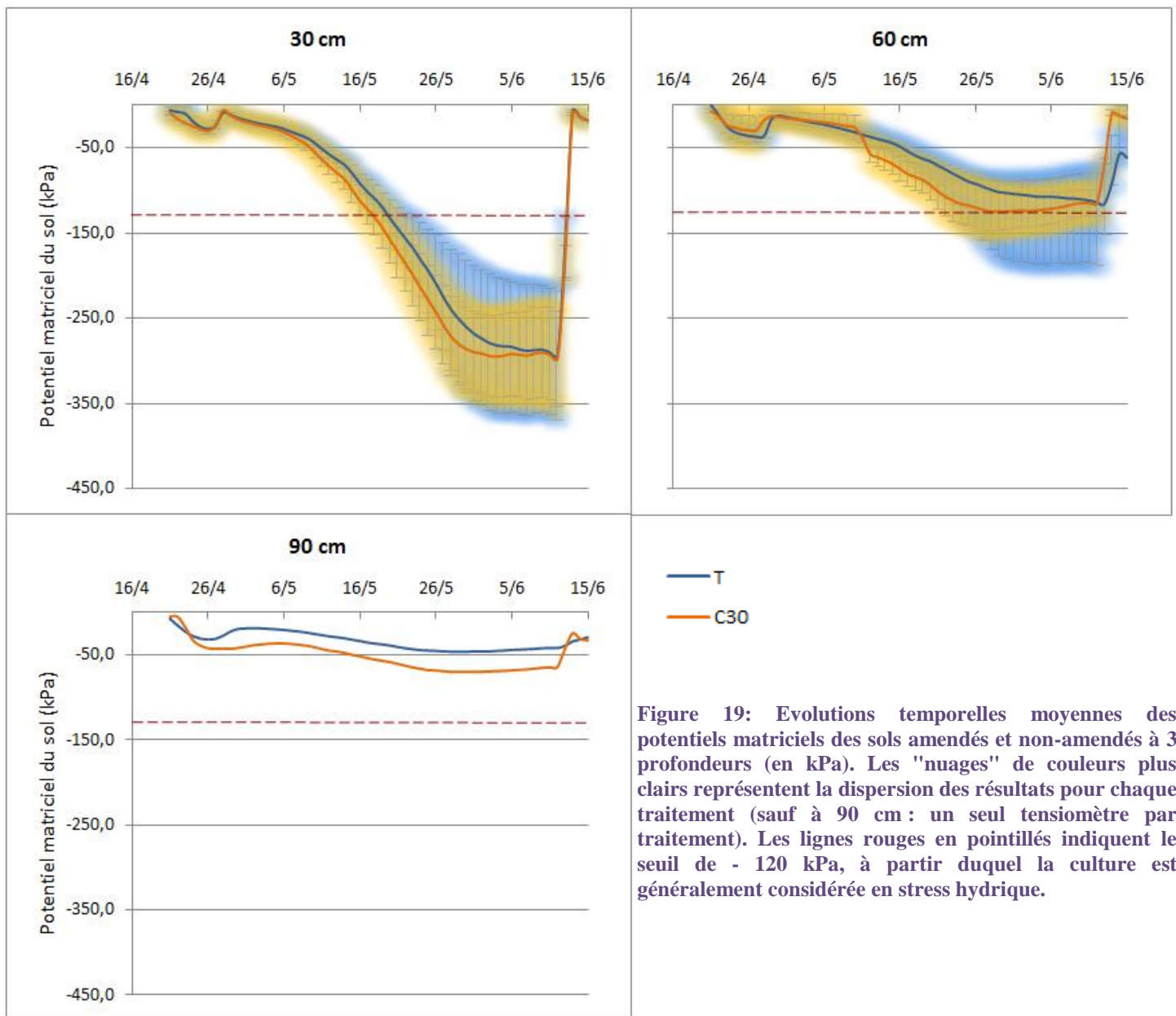


Figure 19: Evolutions temporelles moyennes des potentiels matriciels des sols amendés et non-amendés à 3 profondeurs (en kPa). Les "nuages" de couleurs plus claires représentent la dispersion des résultats pour chaque traitement (sauf à 90 cm : un seul tensiomètre par traitement). Les lignes rouges en pointillés indiquent le seuil de -120 kPa, à partir duquel la culture est généralement considérée en stress hydrique.

Bien que la disponibilité de l'eau du sol soit restée correcte jusqu'à la mi-mai, les deux modalités ont possiblement subi un stress hydrique à partir de cette date. En effet, Charton et al. (2003) estiment que les réserves en eau sont à un niveau critique en-deçà de -120 kPa, bien que Calvet, Chenu et Houot (2015) précisent que le seuil de biodisponibilité pour les végétaux se situe vers -1500 kPa (point de flétrissement permanent). Ce seuil de -120 kPa est dépassé à 30 cm de profondeur, mais la disponibilité de l'eau est restée plus ou moins correcte à partir de 60 cm.

4.2.5 Température du sol

Les températures à 5 cm de profondeur mesurées dans les parcelles « compost » sont en permanence supérieures à celles mesurées en « témoin » de $0,5$ °C entre le semis et la levée (données brutes non présentées dans ce mémoire). Cependant cette différence de température est comprise dans l'incertitude de mesure des appareils, et on ne peut affirmer avec certitude qu'elle soit effectivement due à la présence/absence de CMR.

Un tableau récapitulatif des résultats de la campagne 2014/2015 est disponible en annexe v. Ce tableau présente également de manière succincte les résultats de la campagne précédente ; les résultats des deux campagnes seront confrontés dans la partie « discussion ».

5 Discussion

5.1 Analyse des résultats obtenus

5.1.1 Variations inter-sites

Globalement, les résultats obtenus lors de cette campagne 2015 ont été assez variables d'un site à l'autre. Le « site » est en effet le facteur aléatoire explicatif des résultats qui est le plus ressorti dans l'analyse par modèles mixtes. Ces variations sont bien entendu liées au contexte pédoclimatique propre à chaque parcelle associé à un itinéraire technique particulier.

Certains sites ayant obtenu des rendements très faibles (notamment A1, avec des rendements inférieurs à 5 q/ha), on peut se poser la question de leur représentativité statistique. En effet, si les conditions de croissance de culture sont déjà difficiles (adventices, variétés peu performantes...), on peut imaginer qu'il sera difficile d'exprimer le potentiel fertilisant du CMR.

Cependant lorsque les rendements sont déjà élevés en parcelle « témoin », il devient plus difficile de les augmenter de manière significative avec une même dose d'apport (c'est la loi des rendements décroissants).

Rappelons que c'est là tout l'intérêt de travailler sur un essai multi-sites : la prise en compte de contextes réels et variés permet d'avoir une vision concrète de l'efficacité de cet épandage sur le terrain.

5.1.2 Intérêt agronomique de l'épandage de CMR

5.1.2.1 Récoltes de la deuxième campagne

Malgré un effet du CMR significativement positif sur les rendements d'après l'analyse par modèles mixtes, les résultats étaient plus mitigés dans la réalité. La moyenne des rendements a certes augmenté pour quasiment tous les sites, mais de manière probablement négligeable pour l'agriculteur (+ 1,9 q/ha en moyenne), à l'exception du site A6 dont la situation sera approfondie au paragraphe 5.1.4.

Cette augmentation des rendements est surtout expliquée par de meilleures levées, un pouvoir couvrant plus développé et un nombre de grains par épi supérieur.

Il est possible que la levée des cultures en parcelles « compost » ait été favorisée par un réchauffement du sol accru par deux mécanismes : premièrement par la couleur foncée du CMR qui capte davantage la chaleur solaire, deuxièmement par un sol plus aéré en raison de

l'enfouissement superficiel du compost au croc. Ceci reste cependant une hypothèse, que le matériel utilisé n'a pas pu vérifier par manque de précision pour une si faible différence.

Notons que malgré un nombre de levées / m² supérieur en C, le nombre d'épis/m² est resté plutôt stable entre les modalités C et T d'un même site. Il semble donc y avoir eu une compensation dans les parcelles « témoin » du plus faible nombre de levées par un nombre d'épis par plant supérieur, ce qui est couramment observé dans la littérature scientifique (Meynard et Sebillote, 1994).

Si l'on s'en réfère à la Figure 1, le nombre de grains par épi augmenté par le CMR pourrait traduire une augmentation de la disponibilité en nutriments entre les stades épi 1 cm et floraison. C'est ce qui s'est confirmé avec le suivi de la teneur en chlorophylle des feuilles : les cultures des parcelles amendées ont eu une nutrition azotée plus riche entre la montaison et la floraison. Par la suite cette augmentation du nombre de grains par épi semble s'être répercutée négativement sur le poids des grains par manque d'eau.

En effet, à partir de la mi-mai, l'eau du sol à 30 cm est devenue très peu disponible or cette période correspond à la phase de remplissage des grains, très sensible aux stress hydriques et thermiques (Arvalis-Institut du végétal, 2013b). Ainsi en cas de raréfaction de l'eau, les grains sont moins gros s'ils sont plus nombreux.

En parallèle ce manque d'eau a inévitablement eu un impact sur la minéralisation de l'azote organique présent dans le sol. Calvet, Chenu et Houot (2015) précisent en effet que l'activité microbienne diminue lorsque le potentiel hydrique décroît. Cependant la nitrification par les bactéries n'est stoppée qu'en-deçà de – 500 kPa (Harris, 1985). Ce ralentissement de la minéralisation de l'N en phase de remplissage des grains, associé à une phyto-absorption de l'N minéral également freinée par le manque d'eau, peut être l'une des causes expliquant qu'il n'y ait pas de différence de teneur en protéines entre les traitements.

5.1.2.2 Comparaison avec les récoltes de la première campagne

La première campagne d'essai avait été implantée en blé tendre, et l'effet « année » est donc confondu avec le facteur « espèce ». Il n'est ainsi pas évident de différencier les changements qui sont dus à la météo de l'année et ceux liés à la génétique spécifique. L'essai en blé à Melgueil ayant reçu 10 t / ha ne peut pas non plus être utilisé pour comparer les résultats avec ceux de l'année dernière car ayant reçu 30 t / ha. Ces effets pourront cependant être approchés par la comparaison des parcelles « témoin » de Mb lors des deux années

(renseigne sur l'effet « année ») et de Mb et M lors de la deuxième année (renseigne sur l'effet « espèce »). Gardons à l'esprit que ces deux sites sont situés tous deux au domaine de Melgueil et qu'ils ne sont pas assurément représentatifs des autres sites.

De manière générale les résultats de la deuxième campagne d'essai sont plutôt concordants avec ceux de la première en termes de quantité et de qualité de récolte, même si des divergences sont présentes lorsque l'on s'intéresse au détail des composantes de rendement.

En effet lors des deux campagnes les rendements se trouvent positivement affectés par le CMR malgré les variations inter-sites ; et aucun effet type sur les protéines n'est décelé. Néanmoins lors de la première campagne, le CMR n'a pas influencé le nombre de levées mais a eu un effet positif sur le nombre d'épis par m². D'une certaine manière, on retrouve ici le phénomène de compensation observé lors de la deuxième campagne: si le CMR n'a pas augmenté le nombre de pieds, ces derniers ont probablement plus tallé du fait de ressources plus disponibles, un nombre de talles supérieurs amenant à une compétitivité égale aux parcelles n'ayant pas reçu de CMR.

En comparant les levées des parcelles « témoin » du site Mb de l'année 1 (Mb 1) avec ceux de l'année 2 en blé (Mb 2) et en orge (M 2), il apparaît que les levées ont été assez médiocres à Melgueil pour cette première année : à densité de semis égale, il y a eu presque sept fois moins de levées en Mb 1 qu'en Mb 2 (cf. Figure 20). On peut donc supposer que la première année le climat n'avait pas été favorable à la levée, mais que les apports supplémentaires de CMR avaient favorisé le rattrapage de la culture par l'augmentation du nombre d'épis / m². On aurait pu penser que l'effet du CMR sur le nombre d'épis / m² était plus marquée lors de la première campagne en raison d'un épandage à 30 t/ha (vs. 10 t/ha pour la majorité des sites lors de la deuxième campagne), mais la Figure 8 ne montre pas de différence entre les parcelles C30 et C10 de la deuxième campagne.

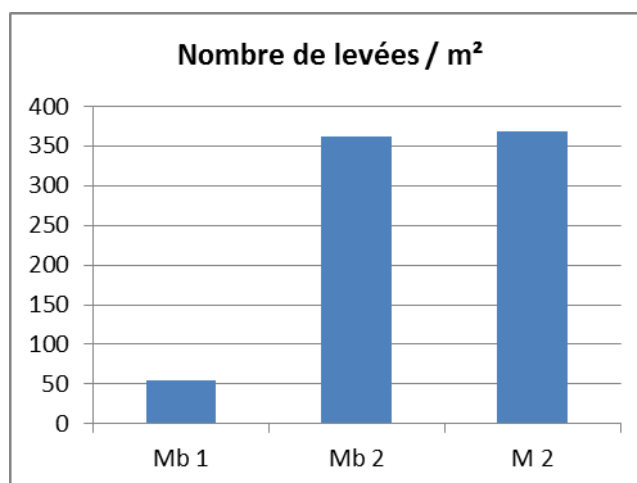


Figure 20: Comparaison des nombres de levées des parcelles "témoin" de Melgueil.
Légende: Mb 1 : Melgueil blé année 1 ; Mb 2 : Melgueil blé année 2 ; M 2 : Melgueil orge année 2

Des représentations similaires à la Figure 20 pour les autres caractéristiques étudiées mettent en évidence un effet « espèce » sur les rendements bien supérieur à l'effet « année », mais aucune tendance ne se dégage sur les protéines (figures non présentées dans ce mémoire).

L'étude des résultats de récolte sur les deux années permet également de repérer les sites localisés sur des parcelles à faible potentiel (*a priori* les sites ayant eu des faibles rendements les deux années de suite) tels qu'A1 par exemple.

5.1.2.3 Le CMR en tant qu'amendement

Bien que la durée de l'étude soit très courte pour l'évaluation d'une valeur amendante, le CMR semble déjà avoir un effet positif sur la teneur en MO du sol au bout de deux années puisqu'elle a augmenté par rapport à l'état initial pour la majorité des sites. L'épandage de CMR a ainsi compensé les pertes de MO par minéralisation et exportation qui expliquent la diminution de teneur en MO entre l'état initial et les parcelles « témoin » en fin d'essai.

Le fractionnement granulométrique de la MO indique une MO plus libre dans les parcelles amendées de CMR, et donc plus apte à être minéralisée, ce qui peut expliquer pourquoi certains sites n'ont pas atteint la teneur en MO attendue. Les cas où les teneurs en MO ont atteint (ou dépassé) cette teneur correspondent aux sites à sols plus riches en argiles (en particulier A4 avec un sol argileux à 34,7 %), peu favorables à la minéralisation de la MO. Les traces de CMR observées lors du test pelle-bêche à Melgueil confirment effectivement une dégradation incomplète.

L'augmentation marquée de teneur en MO sur le site M (+ 0,7 points de MO) n'a semble-t-il pas eu d'effet sur la structure et la rétention en eau du sol, à l'en croire les observations macroscopiques et les évolutions des potentiels matriciels. Rappelons toutefois que les sondes tensiométriques utilisées ne sont pas les outils les plus adaptés pour une comparaison entre modalités. Ces outils ont en première vocation de guider l'irrigation en champ chez les agriculteurs en décelant un début de stress hydrique, mais n'ont pas été conçus pour avoir une grande précision. De plus, les analyses de MO ont été effectuées sur les 20 premiers centimètres, c'est-à-dire plus superficiellement que la position des tensiomètres.

Néanmoins sur le site M les rendements ont progressé de manière importante avec l'épandage de CMR. On a donc, à statut hydrique du sol apparemment égal, une production

plus importante en « compost ». Les augmentations du pouvoir couvrant (+ 42 %) et des rendements (+ 17 %) vont dans le sens d'une biomasse aérienne plus importante, qui logiquement a consommé plus d'eau que la biomasse des parcelles « témoin », et aurait pu avoir un effet plus asséchant sur le sol.

Le fait que les potentiels matriciels soient plus ou moins égaux en parcelles amendées et non amendées peut témoigner du fait que la MO supplémentaire apportée par le CMR ait permis de répondre aux besoins hydriques supplémentaires de la culture.

Outre cette dernière hypothèse, il est possible que l'augmentation de teneur en MO ait contribué à une variabilité horizontale moindre du potentiel matriciel, la MO du sol joue en effet un rôle important dans la stabilité du sol vis-à-vis des agressions extérieures (Chambre d'Agriculture du Languedoc-Roussillon, 2011b).

5.1.3 Dynamique de minéralisation de l'N organique du CMR

En fin d'essai, les sols amendés sont plus riches en N total que les non-amendés. L'N minéral étant très mobile dans le sol et les prélèvements ayant été effectués après de fortes pluies, cet N total représente surtout l'N organique. L'azote organique fourni par le CMR n'est donc pas totalement minéralisé, comme le laissent présager les analyses de minéralisation en laboratoire (cf. Figure 5). En effet ces dernières indiquent qu'au maximum entre 1,6 et 2,8 % de l'N organique est minéralisé en 3 mois d'incubation, comparables à une année en champs. On a ainsi, en une année, les fournitures d'N minéral théoriques suivantes (cf. Tableau 4) :

Tableau 4: Estimation des fournitures en N minéral pour les différents CMR aux différentes doses d'épandage.

Origine compost	Campagne	Dose d'épandage (tPB/ha)	N minéral du CMR (kgN/ha)	N organique minéralisé au cours de l'année (kgN/ha)
AUDE	1	30	40	18
	2	10	1	3
		30	3	10
GARD	1	30	15	9
	2	10	6	2
		30	18	7

Le CMR étant épandu juste avant le semis, l’N minéral qu’il contient n’est probablement pas absorbé par la culture d’une part car elle est encore trop jeune (absorption de l’N surtout à partir du stade épi 1 cm), d’autre part car l’automne est pluvieux (cf. Figure 3) et l’N minéral est rapidement lessivé.

La minéralisation de l’N organique dépend ensuite fortement des conditions de température et d’humidité du sol. Les cinétiques de minéralisation en laboratoire (cf. Figure 5) mettent en évidence un risque d’organisation de l’N minéral du sol jusqu’aux mois de février-mars (environ équivalents au 28^{ème} jour sur 91 pour un épandage fin octobre) pour le CMR de la deuxième campagne venant de l’Aude. Cela pourrait-être une des raisons expliquant la variabilité inter-sites des résultats RSH : les prélèvements ayant été effectués début mars, il serait possible que selon les conditions pédoclimatiques propres à chaque parcelle, certains sites aient déjà été en phase de « reminéralisation » tandis que d’autres étaient encore en « faim d’azote ». Néanmoins cette piste est peu probable ; d’une part car elle n’explique pas les résultats RSH des sites amendés avec le compost du Gard, d’autre part car aucun effet de « faim d’azote » n’a été observé en début de croissance des cultures amendées.

Du reste, les cinétiques suggèrent une libération d’N minéral permanente à partir de mars (28^{ème} jour), avec un pic vers la mi-mai (49^{ème} jour). Le suivi SPAD montre cependant une nutrition azotée des cultures amendées supérieure à partir de début avril seulement, il est donc probable que la cinétique de minéralisation « réelle » soit décalée dans le temps par rapport à la théorique. Rappelons qu’un manque d’eau dans le sol a probablement ralenti l’activité biologique minéralisante à partir de la mi-mai.

Il est important de garder à l’esprit que les quantités d’N théoriquement libérées par le CMR restent faibles par rapport aux consommations des cultures (pour mémoire : 3 kgN/quintal pour le blé tendre et 2,5 kgN/quintal pour l’orge, cf. paragraphe 1.4.2), mais que les parcelles en C10 bénéficient également de la minéralisation du CMR épandu lors de la première campagne.

5.1.4 Le cas particulier du site A6

Le site A6 a obtenu cette année des rendements assez faibles (autour de 7 q/ha en « témoin »). Ces derniers peuvent s’expliquer par le fait qu’en raison de conditions climatiques difficiles pendant l’hiver, l’essai a été semé début janvier 2015 (c’est-à-dire 2 mois plus tard que les autres), et n’a donc pas satisfait ses besoins de vernalisation. Les

conséquences d'un semis tardif peuvent être une réduction du tallage, une biomasse limitée, un enracinement moins profond ou encore moins de grains par épi car la phase de remplissage des grains tombe en période plus sèche (Chambre d'Agriculture du Gers, 2009).

Néanmoins l'orge en A6 a vu progresser ses rendements de + 79 % avec l'épandage de CMR, et c'est le seul parmi tous les sites étudiés à avoir connu une amélioration aussi fulgurante. Cette progression est surtout liée à des nombres de levées et d'épis / m² supérieurs. Cela est cohérent avec les observations faites sur le terrain : le sol d'A6 est très sensible à la battance et la formation d'une croûte de battance a limité la levée des plants. Il est possible que le CMR, par l'apport de MO, ait limité la formation de cette croûte (Le Bissonnais et Le Souder, 1995).

En outre l'enracinement superficiel dû au semis tardif a été moins préjudiciable aux parcelles amendées en raison d'une disponibilité des nutriments accrue en surface, à proximité immédiate des racines.

Précisons toutefois que des analyses de sol approfondies effectuées dans le cadre du projet Illiad mettent en évidence qu'A6 est le seul site étudié dont le sol des parcelles « témoin » présent un taux de saturation inférieur à son taux de saturation optimal. Cela signifie que la CEC peut entrer en compétition avec la plante pour la captation des éléments nutritifs. L'apport de CMR, par l'apport de cations (notamment K⁺), a permis de dépasser ce taux de saturation optimal, et les éléments nutritifs sont ainsi plus disponibles pour la culture. En parallèle, l'épandage de CMR a fait gagner 0,7 points de pH.

Ces changements expliquent cette forte augmentation des rendements, qui précisons le, a entraîné une chute de la teneur en protéine. En effet lorsque les rendements sont trop stimulés, il est fréquent que cela aboutisse à moins de protéines dans les grains par effet de « dilution » de l'azote.

5.1.5 Influence de l'origine du compost

De par l'impact sur sa composition, l'origine du CMR joue inévitablement sur le comportement de ce dernier dans le sol. A titre d'exemple, lors de la première campagne, la quantité d'N minéralisable l'année suivant l'épandage variait du simple (pour le CMR du Gard) au double (pour le CMR de l'Aude), pour une même dose de produit brut épandue (cf. Tableau 4). Elle restait néanmoins faible dans les deux cas.

Les résultats obtenus et l'analyse par modèles linéaires mixtes n'ont pas mis d'effet significatif de l'origine du CMR en évidence, ni sur la récolte, ni sur le sol.

Les CMR utilisés dans ce projet provenant tous des distilleries du groupe Grap'Sud, ils sont globalement tous soumis aux mêmes conditions de composition et de compostage. Leurs caractéristiques étaient en accord avec ceux décrits dans la bibliographie (cf. paragraphe 1.4.4). Des CMR issus d'autres distilleries auraient peut-être abouti à des résultats un peu différents de ceux du projet Illiad.

5.1.6 Extrapolabilité des résultats au blé

L'influence du compost sur les cultures ayant été cohérente entre les deux campagnes il semblerait que les résultats observés sur orge puissent être appliqués au blé.

La comparaison des « témoin » Mb 1, Mb 2 et M 2 met tout de même en évidence des rendements plus élevés en orge qu'en blé à conditions de croissance égales, et un PMG inférieur en orge. L'orge est souvent décrite par les agriculteurs comme une plante plus « rustique » que le blé, avec des besoins en N inférieurs ce qui explique les rendements supérieurs. Sa phase de remplissage des grains est cependant plus courte que celle du blé, ce qui la rend plus sensible à un stress environnemental (ITCF, 2002b).

Bien qu'aucune différence marquée n'ait été observée entre les résultats protéiques de l'orge et du blé, il convient de rester prudent sur ce point. Le blé, contrairement à l'orge, absorbe de l'azote jusqu'en fin de cycle, et c'est ce qui va permettre d'augmenter sa teneur en protéines.

5.2 Discussion sur les protocoles

Le premier point à soulever pour la discussion du protocole d'essai est la durée de l'expérimentation. Deux années sont effectivement trop courtes pour permettre l'expression de tout le potentiel amendement d'un produit organique. Malgré cela, des effets sur la culture ont tout de même pu être mis en évidence ainsi que des effets sur la teneur en MO et N organique du sol. Cette variation de teneur en MO a fort probablement eu un effet sur la rétention en eau et la structure du sol, cependant les moyens mis en œuvre n'ont pas été suffisants pour détecter de si faibles variations. La structure du sol pourrait également se mesurer de manière quantitative et plus précise en laboratoire, bien que le test pelle-bêche présente des avantages de rapidité et de gratuité. Les sondes tensiométriques ont aussi cet avantage de rapidité mais

l'extrapolabilité des résultats dépend de l'hétérogénéité du sol (Deloire, 2008) et les incertitudes de mesures sont inadaptées à la comparaison de modalités.

Dans l'idéal, une reconduction des essais sur 2 ou 3 ans permettrait non seulement de mieux envisager l'effet du compost sur la structure et la rétention en eau du sol, mais également de mieux appréhender son effet sur le blé tendre.

Cependant, le problème des maladies du blé telles que la carie se poserait à nouveau si les essais étaient semés chaque année en blé. On pourrait envisager d'évaluer l'intérêt de l'épandage du CMR au sein d'une rotation des cultures. Certains agriculteurs et distilleries ont soulevé l'idée d'épandre le CMR sur de la luzerne, gourmande en potasse. L'amélioration des rendements en luzerne augmenterait ainsi l'N fixé par la légumineuse et restitué pour la culture suivante. Un blé sur luzerne verrait ainsi sa nutrition azotée indirectement favorisée par l'épandage de CMR.

Pour le suivi de la nutrition azotée de la culture, la mise en place de parcelles supplémentaires fertilisées à l'optimum aurait apporté des informations intéressantes : le calcul de l'indice SPAD, fortement corrélé à l'INN, aurait indiqué de manière assez claire à quel point les cultures étaient en carence azotée, au-delà d'une simple comparaison entre traitements.

Dans la pratique, les doses d'apports de produits organiques doivent être adaptées à chaque sol, en fonction notamment de sa texture, de sa teneur en MO et de sa vitesse de minéralisation.

D'un point de vue statistique, l'analyse par modèles linéaires mixtes permet d'analyser simultanément les résultats de tous les sites étudiés, ce qui lui confère une grande puissance statistique. La réalisation d'une telle analyse sur les données des deux années reste assurément à faire. Comme il a été plusieurs fois observé cependant, il est indispensable de confronter ces résultats statistiques aux données brutes. Une augmentation de rendements, bien que statistiquement significative, n'a que peu d'intérêt si elle ne compense pas les dépenses financières générées par l'achat et l'épandage du compost. Une analyse économique effectuée d'après la première campagne a mis en évidence que les gains de rendements ne suffisent pas à compenser ces coûts (Morisset, 2014) (l'investissement sur le long terme est cependant toujours à étudier, avec l'enrichissement du sol en MO).

Notons que l'étude approfondie des résultats site par site apporterait des informations supplémentaires sur l'influence des conditions pédoclimatiques et de l'itinéraire technique appliqué sur la valorisation du CMR épandu. D'un point de vue statistique une analyse en composantes principales pourrait appuyer ce point (Gil et al., 2008).

Enfin il serait très intéressant de se pencher sur l'impact biologique de ce compost. D'une part les adventices, principal facteur limitant les rendements du blé avec l'N, pourraient également être favorisées par ces apports nutritifs. D'autre part, toute modification des conditions environnementales va influencer sur les organismes autochtones à cet environnement. La faune du sol amendé sera ainsi probablement modifiée par le CMR, ce qui aura inévitablement un impact sur l'équilibre édaphique.

5.3 Pertinence de l'utilisation de CMR pour répondre aux problématiques soulevées

Dans le projet Illiad, l'utilisation de CMR a été envisagée en remplacement de l'épandage d'effluents d'élevages (indisponibles), pour répondre aux déficits en MO des sols et en N des céréales.

Plusieurs points sont à nuancer quant à la pertinence de cette pratique vis-à-vis de ces problématiques.

Tout d'abord, bien que le CMR semble avoir une valeur amendante plutôt satisfaisante, sa valeur fertilisante en termes de nutrition azotée reste faible. L'épandage de CMR sur deux années n'a pas permis d'augmenter les teneurs en protéines des grains et n'a amélioré que faiblement les rendements, ce qui ne permet pas aux agriculteurs de rentrer dans leurs frais d'épandage. Le CMR semblerait donc être apte à répondre aux déficits en MO des sols, mais pas en N des céréales du moins pas sur le court terme. Il reste toutefois possible qu'il y réponde sur le long terme, avec l'augmentation des stocks de N organiques dans les sols. Néanmoins ce n'est pas là la principale richesse du CMR, plutôt riche en potasse. Soulignons également la présence d'ETM dans les CMR (principalement cuivre). Au terme de ces deux années d'essai, entre 4 et 7 kg de cuivre ont été apportés par hectare avec ces épandages. Le cuivre est en effet couramment utilisé en vignes pour la protection des cultures, mais ses effets sur le sol sont souvent décriés. Des analyses d'ETM dans le sol dans le cadre du projet Illiad ont cependant montré que l'augmentation de la teneur en cuivre du sol était nulle ou très faible au bout de deux ans. L'effet d'épandages répétés à long terme appellerait toutefois à rester vigilant.

En outre en termes de disponibilité des stocks de CMR, les 12 000 tonnes disponibles par an estimées par Vignaud (2006) permettraient un apport de seulement 3 t/ha si elles étaient partagées entre toutes les parcelles de céréales biologiques du Languedoc-Roussillon (Morisset, 2014). On se situe donc bien loin des 30 t et 10 t expérimentées lors du projet. Néanmoins la totalité du marc désalcoolisé n'étant pas composté, la production de CMR pourrait encore être augmentée. Ce n'est semble-t-il pas la tendance actuelle avec le décret du 18 août 2014 (cf. paragraphe 1.4.4) qui ne donne plus le monopole aux distilleries quant à la récupération des marcs bruts.

Enfin l'épandage de ces composts issus des vignes en céréales ne ferait en quelques sortes que « déplacer » le problème de déficit en MO à la viticulture. Cette dernière est généralement une activité agricole présentant des taux de MO déjà assez bas (particulièrement en région méditerranéenne). L'exportation des produits d'une parcelle (en l'occurrence de vigne) à une autre parcelle (céréales) ne peut que créer un déficit dans la première parcelle si aucun rééquilibrage n'est fait pour clôturer le cycle de la matière (un retour de matière venant des céréales à la vigne). C'est le principe sur lequel reposent habituellement les échanges paille-fumier entre céréaliers et éleveurs.

Outre l'idée à étudier d'épandre du CMR sur de la luzerne, l'une des pistes à explorer pour répondre à ces différents problèmes serait la relocalisation de l'élevage en Languedoc-Roussillon. Cela permettrait de retrouver la complémentarité polyculture/élevage permettant la fermeture des cycles des éléments à échelle locale tout en satisfaisants éleveurs et céréaliers. On pourrait ainsi imaginer que le marc de raisin puisse être co-composté avec des effluents d'élevage complémentaires, moins stables dans le sol mais plus riches en azote.

6 Conclusion

Pour cette deuxième campagne d'essai, l'épandage de CMR a augmenté les rendements en orge de façon variable selon les sites étudiés, mais aucune tendance ne se dégage quant à ses effets sur la teneur en protéines des grains. L'augmentation des rendements est liée à une meilleure nutrition azotée conduisant à une hausse du nombre de grains par épi, mais elle a été atténuée par la diminution du PMG par manque d'eau durant la phase de remplissage des grains. Ce même manque d'eau de fin de campagne a probablement limité la minéralisation de l'azote organique et limitant ainsi les teneurs en protéines. Les résultats des deux campagnes d'essai sont plutôt concordants en termes de quantité et de qualité de récolte

A l'issue des deux années d'expérimentation, il apparaît que le CMR enrichit sensiblement le sol en matières organiques, mais l'impact sur la rétention d'eau n'a pas pu être clairement démontré par le matériel en place. Le CMR apporte de l'azote sous forme organique principalement. Sa minéralisation semble plutôt lente, ce qui participe au fait que les coûts d'épandage ne soient pas rentabilisés dès les premières années.

Une reconduction des essais sur 2 ou 3 ans permettrait de mieux envisager l'effet du compost sur la structure et la rétention en eau du sol ainsi que sur les récoltes de blé tendre, et donc d'approfondir son intérêt économique.

Néanmoins, l'épandage de CMR sur les parcelles de blé biologiques en Languedoc-Roussillon ne semble pas être une solution de long terme aux problématiques de déficit en MO des sols et d'approvisionnement azoté des producteurs, pour des raisons de disponibilité des ressources et de concurrence avec la viticulture. D'autres manières de valoriser ce CMR en blé bio peuvent être envisagées, comme l'épandage sur luzerne précédant du blé, ou encore le co-compostage avec des effluents d'élevage plus riches en N.

Bibliographie

- Abubaker J. *Effects of fertilisation with biogas residues on crop yield, soil microbiology and greenhouse gas emissions*. Uppsala : Swedish university of agricultural sciences, 2012. 79 p.
- Alley M. M., Pridgen T. H., Brann D. E., Hammons J. L., Mulford R. L. *Nitrogen fertilization of winter barley: principles and recommendations*. 2009.
- Arrouays D., Kicin J. L., Péliissier P., Vion I. « Evolution des stocks de carbone des sols après déforestation: analyse spatio-temporelle à l'échelle d'un paysage pédologique ». *Etude et Gestion des Sols*. 1994. Vol. 1, n°2, p. 7 à 15.
- Arvalis-Institut du végétal. *Produire du blé tendre de qualité en agriculture biologique*. Paris : Arvalis, 2013a. ISBN : 978-2-8179-0171-8.
- Arvalis-Institut du végétal. « Céréales: attention au déficit hydrique fin montaison ». In : *ARVALIS-info.fr* [En ligne]. 2013b. Disponible sur : < <http://www.arvalis-infos.fr/une-secheresse-a-partir-de-fin-montaison-penalise-fortement-le-potentiel-de-rendement-d-une-cereale-a-paille-@/view-12519-arvarticle.html> > (consulté le 27 août 2015)
- Arvalis-Institut du végétal. « Carie commune - Maladie sur blé tendre, blé dur, triticale ». In : *ARVALIS-info.fr* [En ligne]. 2015. Disponible sur : < http://www.fiches.arvalis-infos.fr/fiche_accident/fiches_accidents.php?mode=fa&type_cul=1&type_acc=4&id_acc=81 > (consulté le 15 juillet 2015)
- Balesdent J. « Un point sur l'évolution des réserves organiques des sols en France ». *Etude et Gestion des Sols*. 1996a. Vol. 3, n°4, p. 245 à 260.
- Balesdent J. « The significance of organic separates to carbon dynamics and its modelling in some cultivated soils ». *European Journal of Soil Science*. 1996b. Vol. 47, p. 485 à 493.
- Bell A., Michaud A., Heurtaux M., Houot S. « Réseau PRO: analyse du contexte national de l'expérimentation au champ portant sur les effets agronomiques, environnementaux et sanitaires des produits résiduels organiques recyclés en agriculture ». *Echo-MO*. octobre 2013. n°103,.
- Le Bissonnais Y., Arrouays D. « Aggregate stability and assesment of soil crustability and erodibility: II. Application to humic lomy soils with various organic carbon contents ». *European Journal of Soil Science*. 1997. p. 39 à 48.
- Le Bissonnais Y., Le Souder C. « Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion ». *Etude et Gestion des Sols*. 1995. Vol. 2, p. 43 à 56.
- Bonnemort C. *Synthèse régionale « Alternatives Agricoles à l'arrachage de la vigne » - Partie 2: fiche blé tendre*. septembre 2008.
- Bouthier A., Trochard R., Parnaudeau V., Nicolardot B., Morvan T. « Valeur fertilisante azotée des produits résiduels organiques (PRO): mieux prendre en compte la dynamique de la fourniture d'azote ». In : *Journée technique grandes cultures biologiques ITAB-Arvalis*. 2009.
- Bouthier A., Trochard R. « Prise en compte de l'effet azote des produits organiques (PRO) appliqués à l'automne, dans la méthode du bilan azoté ». In : *Conférence azote SAS Laboratoire / AGRO-Systèmes - ARDON*. 2009.
- Calvet R., Chenu C., Houot S. *Les matières organiques des sols - Rôles agronomiques et environnementaux*. 2^e éd.: France Agricole, 2015. 351 p.(Agriproduction). ISBN : 978-2-85557-379-3.

- Casagrande M. *Evaluation des performances du blé biologique (rendement et teneur en protéines): une approche combinée de diagnostic agronomique, de modélisation à l'aide d'indicateurs de nuisibilité et d'études des pratiques dans les exploitations agricoles*. AgroParisTech, 2008. 225 p.
- Chalhoub M. *Effet de l'apport de composts sur la dynamique hydrique du sol, la disponibilité de l'azote pour la plante et le lessivage du nitrate: cas d'un sol limoneux cultivé du bassin parisien*. Institut National Agronomique Paris-Grignon, 2010. 260 p.
- Chambre d'Agriculture du Gers. « Céréales d'hiver : Jusqu'à quand semer ? Quelle variété et quelle espèce ? » *Volonté Paysanne du Gers*. 16 janvier 2009. n°1158, p. 18.
- Chambre d'Agriculture du Languedoc-Roussillon. « Chapitre 1: Le Languedoc-Roussillon, une terre méditerranéenne ». In : *Les produits organiques utilisables en agriculture en Languedoc-Roussillon - Guide technique*. 2011a. Vol. 1.
- Chambre d'Agriculture du Languedoc-Roussillon. « Chapitre 2: Les matières organiques du sol ». In : *Les produits organiques utilisables en agriculture en Languedoc-Roussillon - Guide technique*. 2011b. Vol. 1.
- Chambre d'Agriculture du Languedoc-Roussillon. « Chapitre 5: Les critères analytiques des produits organiques ». In : *Les produits organiques utilisables en agriculture en Languedoc-Roussillon - Guide technique*. 2011c. Vol. 1.
- Chambre d'Agriculture du Languedoc-Roussillon. « Chapitre 2: Les produits d'origine industrielle ». In : *Les produits organiques utilisables en agriculture en Languedoc-Roussillon - Guide technique*. 2011d. Vol. 2.
- Chapman S. C., Barreto H. J. « Using a chlorophyll meter to estimate specific leaf nitrogen of tropical maize during vegetative growth ». *Agron. J.* 1997. n°89, p. 557 à 562.
- Charton P., Boyer I., Chol P., Guinet P., Isbérie C., Leclercq J. B., Lopez P., Martinez A. M., Odet J., Piton N., Ricavy I., Terrentroy A. *Les sondes tensiométriques*. 2003.
- Chaussod R., Nouaïm R. « Evaluation au champ de la valeur "amendement organique" de matières organiques exogènes: quelques aspects méthodologiques ». *Echo-MO*. mars 2004. n°46,.
- Chauvin M. *La réglementation française sur la valorisation agronomique des déchets organiques - Organisation et points principaux*. 2004.
- David C. *Le blé en agriculture biologique: diagnostic agronomique et raisonnement de la fertilisation azotée de printemps*. Institut National Agronomique Paris-Grignon, 2004. 145 p.
- Debaeke P., Rouet P., Justes E. « Relationship between the normalized SPAD Index and the Nitrogen Nutrition Index: application to durum wheat ». *Journal of Plant Nutrition*. 2006. Vol. 29, n°1, p. 75 à 92.
- Deland J. P., Painchaud J. *Evaluation des performances de l'engrais lacto-fermenté Organo-San comme complément de fertilisation de la canneberge sous régime biologique*. 2013.
- Deloire A. *L'irrigation de la vigne: synthèse*. 2008.
- Doan T. T., Henry-des-Tureaux T., Rumpel C., Janeau J. L., Jouquet P. « Impact of compost, vermicompost and biochar on soil fertility, maize yield and soil erosion in Northern Vietnam: a three year mesocosm experiment ». *Science of the total environment*. 2015. Vol. 514, p. 147 à 154.

- Domergue M., Costa S. *Etude des échanges paille-fumier entre céréaliers et éleveurs*. UMR MOISA, 2013.
- Doran J. W. « Soil health and global sustainability: translating science into practice ». *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2002. Vol. 88, n°2, p. 119 à 127.
- Dragon S., Icard C. « Effet d'apport de différents amendements organiques sur les propriétés du sol - Bilan de 15 années d'essai en culture légumière à la SERAIL ». *Echo-MO*. janvier 2010. n°81, p. 8.
- Elherradi E., Soudi B., Elkacemi K. « Evaluation de la minéralisation de l'azote de deux sols amendés avec un compost d'ordures ménagères ». *Etude et Gestion des Sols*. 2003. Vol. 10, n°3, p. 139 à 154.
- Fisher R. A. « Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature ». *J. agric. Sci.* 1985. n°105, p. 447 à 461.
- Gate P. *Ecophysiologie du blé: de la plante à la culture*. Paris : Technique et Doc. - Lavoisier, 1995. ISBN : 2-86492-222-3.
- Gaudart J., Giorgi R., Thalabard J. C., Thiam D., Whegang S. *Modèles linéaires à effets mixtes*. 2010.
- Gazeau G. « Fiche n° 16: Compost de Marc de Raisin ». In : *Matières organiques*. Chambre d'Agriculture de Provence-Alpes-Côte d'Azur, 2012.
- Gil M. V., Calvo L. F., Blanco D., Sanchez M. E. « Assessing the agronomic and environmental effects of the application of cattle manure compost on soil by multivariate methods ». *Bioresource Technology*. 2008. Vol. 99, p. 5763 à 5772.
- Gis Sol. *Synthèse sur l'état des sols de France*. Groupement d'intérêt scientifique sur les sols, 2011. 24 p. ISBN : 978-2-7380-1296-8.
- Gitelson A. A., Gritz Y., Merzlyak M. N. « Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves ». *Journal of Plant Physiology*. 2003. Vol. 160, n°3, p. 271 à 282.
- Gosselin F., Boulanger F., Debaive N., Gilg O., Gosselin M., Dauffy-Richard E., Archaux F., Bouget C., Paillet Y. « L'approche multisite au coeur du projet GNB ». In : *Intérêts et limites des approches comparatives multi-sites: regards disciplinaires et pistes de progrès*. Paris. 2014. p. 13.
- Harris R. F. « Effect of water potential on microbial growth and activity ». *Water potential on microbial relations in soil microbiology*. 1985. Vol. SSA Publication, n°9, p. 23-97.
- Hénin S., Dupuis M. « Essai de bilan de la matière organique du sol ». *Annales agronomiques*. 1945. Vol. 15, p. 17 à 29.
- Houlès V., Guérif M., Mary B. « Elaboration of a nitrogen nutrition indicator for winter wheat based on leaf area index and chlorophyll content for making nitrogen recommendations ». *European Journal of Agronomy*. 2007. Vol. 27, p. 1 à 11.
- IFV. « Marcs de raisins, lies de vin et bourbes: Quelle gestion des sous-produits vinicoles? » *Itinéraires*. novembre 2013. n°25,.
- ITCF. *Blé tendre: marchés, débouchés, techniques culturales, récolte et conservation*. Paris : ITCF - Institut technique des céréales et des fourrages, 2002a. ISBN : 978-2-86492-520-0.
- ITCF. *Orge brassicole et fourragère*. Paris : ITCF - Institut technique des céréales et des fourrages, 2002b. ISBN : 2-86492-490-0.

Jeuffroy M. H., Bouchard C. « Intensity and duration of nitrogen deficiency on wheat grain number ». *Crop Sci.* 1999. Vol. 39, p. 1385 à 1393.

Johnstone P. D., Lowther W. L., Keoghan J. M. « Design and analysis of multi-site agronomic evaluation trials ». *New Zealand Journal of Agricultural Research.* 1993. Vol. 36, p. 323 à 326.

KONICA MINOLTA. *Chlorophyll meter SPAD-502Plus.* 2014.

Kuznik N. *Communication personnelle: entretien avec Nicolas Kuznik - ingénieur chargé d'études chez Grap'Sud.* 23 avril 2015.

Lashermes G., Nicolardot B., Parnaudeau V., Thuriès L., Chaussod R., Guillotin M. L., Lineres M., Mary B., Metzger L., Morvan T., Tricaud A., Villette C., Houot S. « Indicator of potential residual carbon in soils after exogenous organic matter application ». *European Journal of Soil Science.* 2009. Vol. 60, p. 297 à 310.

LCA. « Le poids de M.O. » In : *L'Agro-Reporter* [En ligne]. 2014. Disponible sur : < <http://agro-reporter.blogspot.fr/2013/01/le-poids-des-mo.html> > (consulté le 24 juillet 2015)

Leclerc B. « Chapitre 6: Le compostage ». In : *Guide des matières organiques.* ITAB, 2001. ISBN : 2-9515-855-1-9.

Leclerc B. *Document de mise à jour du « Guide des matières organiques » de l'ITAB.* mars 2014.

Linères M., Djakovitch M. « Caractérisation de la stabilité biologique des apports organiques par l'analyse biochimique ». In : *Matières organiques et agricultures. 4ème Journée d'analyse de terre et 5ème Forum de fertilisation raisonnée.* Blois : GEMAS - COMIFER, 1993. p. 159 à 168.

Lucas M. E., Hoad S. P., Russel G., Bingham I. J. « Management of cereal root systems ». *Home-Grown Cereals Authority (HGCA) - Research Review.* mai 2000. n°43.

Martinez D. E., Guiamet J. J. « Distortion of the SPAD 502 chlorophyll meter readings by changes in irradiance and leaf water status ». *Agronomie, EDP Sciences.* 2004. Vol. 24, n°1, p. 41 à 46.

Masciandaro G., Ceccanti B. « Assessing soil quality in different agro-ecosystems through biochemical and chemico-structural properties of humic substances ». *Soil and tillage research.* 1999. Vol. 51, n°1-2, p. 129 à 137.

Masle J. « Relations entre croissance et développement pendant la montaison d'un peuplement de blé d'hiver. Influence des conditions de nutrition. » *Agronomie.* 1981. Vol. 5, n°1, p. 365 à 374.

Météyé S., Bova F. *Enquête sur les variétés et rendements des céréales biologiques/Récolte 2011.* FranceAgriMer/Etablissement national des produits de l'agriculture et de la mer, 2012.

Meynard J. M., Sebillote M. « L'élaboration du rendement du blé, base pour l'étude des autres céréales à talles ». In : *Elaboration du rendement des principales cultures annuelles.* 1994. p. 31 à 51. ISBN : 2-7380-0537-3.

Moldes A. B., Vàsquez M., Dominguez J. M., Diaz-Fierros F., Barral M. T. « Evaluation of mesophilic biodegraded grape marc as soil fertilizer ». *Applied Biochemistry and Biotechnology.*

Morisset S. *Essai de fertilisation de blé tendre biologique d'hiver avec du compost de marc de raisin en Languedoc-Roussillon.* Gradignan : Bordeaux Sciences Agro, 2014.

- Offerman F., Nieberg H. *Economic Performances of Organic Farms in Europe*. Stuttgart : University of Hohenheim, 2000. ISBN : 3-933403-04-9.
- Pailler C., Augier P., De Caix C., Deltour B., Foyer-Benos C. « Languedoc-Roussillon - Viticulture - Recensement agricole 2010 ». *Agreste / DRAAF*. novembre 2011.
- Passion Céréales. *Des chiffres et des céréales: L'essentiel de la filière*. 2014.
- Peltonen J., Virtanen A., Haggren E. « Using a chlorophyll meter to optimize Nitrogen fertilizer application for intensively-managed small-grain cereals ». *J. Agronomy & Crop Science*. 1995. Vol. 174, p. 309 à 318.
- Plénet D., Lubet E., Juste C. « Evolution à long terme du statut carboné du sol en monoculture non irriguée de maïs (*Zea mays* L.) ». *Agronomie*. 1993. Vol. 13, p. 685-698.
- Rémy J. C., Marin-Laflèche A. « L'analyse de terre: réalisation d'un programme d'interprétation automatique ». *Ann. Agron.* 1974. Vol. 25, n°4, p. 607 à 632.
- Robin D. « Intérêt de la caractérisation biochimique pour l'évaluation de la proportion de matière organique stable après décomposition dans le sol et la classification des produits organominéraux ». *Agronomie, EDP Sciences*. 1997. Vol. 17, n°3, p. 157 à 171.
- Roussel O., Bourmeau E., Walter C. « Evaluation du déficit en matière organique des sols français et des besoins potentiels en amendements organiques ». *Etude et Gestion des Sols*. 2001. Vol. 8, n°1, p. 65 à 81.
- Salducci X. *Les matières organiques: l'énergie solaire des sols*. février 2014.
- Scott W. R. « Development and yield of "Kopara" and "Karamu" wheat under different rates of nitrogen ». *New Zealand Journal of Agricultural Research*. 1978. Vol. 21, p. 463 à 466.
- Taupier-Létage B., Abécassis J., Viaux P., Fontaine L. *Qualité des blés biologiques et qualités nutritionnelle et organoleptique des pains biologiques*. INRA-CIAB / ACTA / ACTIA, 2007.
- Teulat-Merah B., Ben Salem M., Zoumarou W., Bahri H., Douimi R., This D. « Etude de la tolérance à la sécheresse chez les céréales. L'orge comme modèle biologique, approche QTL ». In : *Des modèles biologiques à l'amélioration des plantes. VIIème journée scientifique du réseau AUF - « Biotechnologies végétales: amélioration des plantes et sécurité alimentaire » - Montpellier, 3-5 juillet 2000*. Paris : Serge Hamon - IRD, 2001. p. 493 à 516. ISBN : 2-7099-1472-7.
- Védie H. *Evaluer la fertilité des sols*. 2003.
- Vignaud P. *Evaluation des gisements et des débouchés des composts en Languedoc-Roussillon. Bilan 2006 - Prospective 2010*. ADEME - Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie - Délégation Régionale Languedoc-Roussillon, 2006.
- Le Villio M., Arrouays D., Deslais W., Daroussin J., Le Bissonnais Y., Clergeot D. « Estimation des quantités de matière organique exogène nécessaires pour restaurer et entretenir les sols limoneux français à un niveau organique donné ». *Etude et Gestion des Sols*. 2001. Vol. 8, p. 47 à 63.
- Wienhold B. J., Krupinsky J. M. « Chlorophyll Meter as Nitrogen Management Tool in Malting Barley ». *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 1999. Vol. 30, n°17&18.

Annexes

Annexe i: Caractéristiques pédologiques de chaque site en début d'essai. Source : Morisset, 2014

Site	Nom sol	Analyse granulométrique						Analyse chimique				Eléments majeurs						Oligo-éléments						CEC et équilibre chimique						MO, C/N, bilan humique					
		Argile %	Limons fins %	Limons gros %	Sables fins %	Sables gros %		pH eau	pH KCl	CaCO3 %	CaO mg/kg	P2O5	K2O	MgO	Na2O	Zn	Mn	Cu	B	Fe	CEC meq/100g	Ca éch. %CEC	K éch. %CEC	Mg éch. %CEC	Na éch. %CEC	MO %	C org %	N tot %	C/N	K2 %					
A1	Calcaire ...	12,9	12,1	10,5	0,7	0,7	8,6	8,1	61,2	15161	12	248	814		1,0	4,9	5,0	0,2			20,4	264,9	2,6	19,9		1,8	1,07	0,11	9,9	1					
A2	Sable argilo- limoneux	22,4	16,7	16,6	20,1	9,3	8,6	7,7	13,6	11299	14	276	322		1	8,6	4,4	0,2			9,8	411,8	6,0	16,4		1,4	0,8	0,10	8,4	1					
A3	Limons argilo- sableux	22,1	22,7	17,3	12,8	4	8,7	7,9	18,9	11078	20	283	537		3	14,9	19,1	0,6			9,8	404,1	6,2	27,4		2,2	1,3	0,12	11	1					
A4	Arg. limono- sableuse	34,7	12,6	13,9	8,9	11,6	8,5	7,7	16,3	14447	17	313	558		<1	4,9	17,9	0,3			18,0	286,8	3,7	15,5		1,9	1,12	0,11	10	1					
A5	Sable limoneux	12,3	10,8	17,7	31,1	5,2	8,6	7,8	21,6	11384	11	276	189		<1	13,1	0,5	0,3			6,7	606,8	8,8	14,1		1,3	0,77	0,07	10	1					
A6	Limons sableux	10,1	9,5	35,6	34,9	8,3	7,3	6,4	0,4	2787	60	113	140	16	<1	35,0	3,6	0,1	111		7,1	139,8	3,4	9,8	1	1,3	0,74	0,08	9,5	2					
A7	Limons argilo- sableux	14,3	12,8	30,3	14,3	6,9	8,5	7,7	19,3	11258	40	254	131	15	2	10,4	6,5	0,3	17,1		10,7	377,2	5,1	6,1	0,6	2	1,17	0,12	9,7	1					
M / Mb	Limons argilo- sableux	25,1	14,9	19,4	12,5	5,6	8,4	7,6	20,8	15056	62	426	205		2	6,5	28,4	0,3			18,2	295,6	5,0	5,6		1,7	0,98	0,10	9,9	1					

Annexe ii: Compositions détaillées des CMR utilisés

		MS	MO	C/N	pH	Norg	Nmin	P2O5	K2O	Corg	Cu	MO stable (calcul avec ISMO)
Compost	Campagne	%PB		s.u.		kg/tpB				%MS	mg/kgMS	kg/tpB
AUDE	1	58,6%	33,9%	7,7	9,6	20,8	1,32	6,1	23,4	29%	170,8	320
	2	67,6%	31,2%	8,5	8,3	18,2	0,10	6,5	21	23%	159,4	279
GARD	1	76,2%	21,1%	6,9	10	14,7	0,51	14,7	26,7	14%	229,7	175
	2	72,1%	20,0%	6,8	9,8	14	0,60	17,8	18,6	14%	230,7	167

Annexe iii: Itinéraires techniques détaillés des différents sites d'essai

	A1	A2	A3	A5	A4	A6	A7	M (Mb)
Sol	argilo-calcaire très calcaire	sable argilo-limoneux	limon-argilo-sableux	sable limoneux	argile limon-sableuse	limons sableux	limon argilo-sableux	limon argilo-sableux
Pente	3-10%	3-10%	<3%	<3%	<3%	<3%	<3%	<3%
Pierrosité	15-50%		<15%	<15%	15-50%	<15%		<15%
variété	population	calypso	amistar	semences propres	mélange	calypso	calypso	calypso (nogal)
usage variété	fouillage	brasserie	brasserie	fouillage	fouillage	brasserie	brasserie	brasserie (panification)
épandage compost	30/10/2014	29/10/2014	29/10/2014	21/10/2014	22/10/2014	12/01/2015	15/12/2014	28/10/2014
semis	02/11/2014			< 17/10/2014	< 17/10/2014	12/01/2015	15/12/2014	30/10/2014
Travail du sol	disques - chisel - vibroculteur	labour	déchaumage après moisson -labour 30 cm - vibroculteur			labour	labour 20 cm - cultivateur / griffon (1 ou 2 faux-semis)	labour
désherbage		-	écrouteuse - herse étrille				-	herse étrille
densité de semis	aucune idée (mélanges cultures)		épais	100 kg/ha			150 kg/ha	350 graines/m ²

Annexe iv: Script R pour l'analyse par modèles linéaires à effets mixtes

Importation des données:

```
options(stringsAsFactors = FALSE)
donnees <- read.csv2("Basedonnees.csv", header=T)
donnees <- subset(donnees, modalite == "C"|modalite=="T")
y<-donnees$rendement
```

#Définition des facteurs:

```
donnees$traitement <-factor(donnees$traitement)
donnees$site <-factor(donnees$site)
donnees$origine <-factor(donnees$origine)
donnees$variete<-factor(donnees$variete)
donnees$traitement<-relevel(donnees$traitement, "T") #précise qu'on veut T comme
traitement de référence
```

install.packages("lme4")

```
library(lme4)
```

#Ecriture des différents modèles mixtes:

```
mixA <- lmer( y ~ traitement + (1 | site), REML=FALSE, data=donnees) #effet traitement +
effet site
mixB <- lmer( y ~ traitement + (1 | origine), REML=FALSE, data=donnees) #effet traitement
+ effet origine
mixC <- lmer( y ~ traitement + (1 | variete), REML=FALSE, data=donnees) #effet traitement
+ effet variété
mixD <- lmer( y ~ traitement + (1 | site) + (1 | origine), REML=FALSE, data=donnees) #effet
traitement + effet site + effet origine
mixE <- lmer( y ~ traitement + (1 | site) + (1 | origine)+ (1 | variete), REML=FALSE,
data=donnees) ) #effet traitement + effet site + effet origine + effet variete
mixF <- lmer( y ~ traitement + (traitement|origine), REML=FALSE, data=donnees)#effet
traitement + effet interaction traitement/origine
etc...
```

Comparaison des modèles:

```
anova(mixA, mixD)
anova(mixX, mixY)
etc...
```

→ sélection du modèle qui a le plus petit AIC (différence supérieure à 2)

Vérification effet fixe:

```
mixK<-lmer(y~1 + (1| site), REML=FALSE, data=donnees) # /\ à réajuster pour chaque modèle sélectionné!
```

```
anova(mixA, mixK)
```

```
#Détails du modèle:
```

```
mixA
```

```
summary(mixA)
```

```
plot(mixA)
```

#Vérification des hypothèses :

```
#Vérifier que résidus augmentent pas avec preditions:
```

```
plot(fitted(mixOK), resid(mixOK))
```

```
abline(h=0)
```

```
#Vérifier que la distribution est à peu près la même partout:
```

```
library(lattice)
```

```
xyplot(resid(mixOK) ~ fitted(mixOK) | donnees$site, abline=0)
```

```
#Vérifier que résidus centrés sur 0 et symétriques autour de 0:
```

```
bwplot(resid(mixOK)~ donnees$site)
```

```
#Normalité des résidus intra-bloc: vérifier que bien alignés
```

```
qqnorm(resid(mixOK))
```

```
qqline(resid(mixOK))
```

```
#Vérifier que les variances sont constantes:
```

```
str(rr1 <- ranef(mixOK, condVar = TRUE))
```

```
dotplot(rr1,scales = list(x = list(relation = 'free')))[["site"]]
```

```
#Normalité marginale des effets aléatoires: vérifier que bien alignés
```

```
layout(matrix(1:2,1,2));layout.show(2)
```

```
qqnorm((rr1[[1]]),1)
```

```
qqline((rr1[[1]]),1)
```

Annexe v: Tableau récapitulatif des résultats des deux campagnes d'essai

Légende : + : effet positif ; - : effet négatif ; / : pas d'effet. Les p-values de la comparaison par modèles linéaires mixtes sont indiquées entre parenthèses ; «Ø» signifie que l'analyse par modèles mixtes n'a pas été réalisée pour ce paramètre ; n.d. : no data

Analyses multisite	Impacts sur la culture et sa nutrition N										Impacts sur le sol			
	Nb levées /m ²	Pouvoir couvrant	Nb épis /m ²	Nb grains/épi	PMG	Rendements	RSH	SPAD	Protéines	Teneur N sol	Taux MO	Fractionnement MO	Structure du sol	Potentiel matriciel du sol
Effet du CMR 2015 (p-value)	+++ (0,001)	+ (Ø)	/	++ (0,005)	- (0,036)	+ (0,034)	/	+ (selon stade) (Ø)	/	+ (Ø)	+ ou / (Ø)	↑ MO libre (Ø)	+ ou / (Ø)	/
Facteurs aléatoires explicatifs	site		site	variété	site variété	site (variété)			site					
Résultats 2014 (Morisset, 2014)	/	+	+++	+++	- ou /	+++	+	n.d.	/	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

Autorisation de diffusion du mémoire

non confidentiel

à l'issue de la période de confidentialité

(cocher la case correspondante)

Je soussignée.....

agissant en l'absence de toute contrainte et en sachant qu'en dehors de l'obligation de déposer mes travaux, je bénéficie de la liberté de définir son périmètre de diffusion après soutenance.

En premier lieu, j'autorise l'Ecole à signaler mon mémoire dans sa base documentaire.

En termes de diffusion,

- **pour les usagers de l'Ecole**, j'accepte que l'acte de dépôt du mémoire autorise l'Ecole à rendre les travaux réalisés pour l'obtention de mon Diplôme d'Ingénieur de Bordeaux Sciences Agro librement accessibles et ce, sans limitation de temps : consultation, prêt de la version papier et consultation de la version informatique en ligne sous condition d'authentification.

- **pour les usagers extérieurs à Bordeaux Sciences Agro**, j'autorise, sans limitation de temps, l'Ecole à diffuser, dans les conditions suivantes :

- prêt de la version papier

aux étudiants

oui non

à d'autres bibliothèques ou services documentaires

oui non

à des organismes professionnels (Chambre d'agriculture, institut...)

oui non

- diffusion de la version informatique dans la base documentaire et/ou les serveurs web de l'école

→ le « Résumé du mémoire » (page de garde, résumé, plan détaillé) oui non

→ le « Mémoire complet »

oui non

La présente autorisation de diffusion vaut également autorisation de reproduction. Ces reproductions sont limitées aux seules fins des diffusions ainsi définies.

Je renonce à toute rémunération pour les diffusions et reproductions effectuées dans les conditions précisées ci-dessus.

A Gradignan, le.....

Signature de l'étudiant

précédée de la mention manuscrite « **BON POUR ACCORD** »

Résumé

L'absence d'élevage en Languedoc-Roussillon entraîne des difficultés de la part des producteurs de blé tendre biologiques à se fournir en matières fertilisantes azotées et à entretenir les stocks de matière organique (MO) de leurs sols. En parallèle la production de vin, première activité agricole de la région, génère du marc de raisin en grandes quantités. L'objectif ici est d'évaluer l'intérêt agronomique de l'épandage de compost de marc de raisin (CMR) pour répondre aux problématiques des céréaliers. Des essais comparant les récoltes en orge et les sols de parcelles amendées avec du CMR et non amendées sont mis en place chez des agriculteurs et en station expérimentale. Les résultats montrent des rendements très légèrement améliorés par l'épandage de CMR mais des teneurs en protéines inchangées. Les teneurs en MO et azote du sol sont nettement augmentées après deux années, même si aucun impact sur la rétention en eau et la structure du sol n'a pu être démontré par le matériel en place. L'épandage tel quel de CMR sur les céréales biologiques ne semble pas être une réponse satisfaisante à leurs problèmes de nutrition azotée mais pourrait toutefois être intéressant pour rehausser les teneurs en MO de ces sols. D'autres solutions pourraient être envisagées, telles que l'épandage de CMR sur luzerne précédant du blé ou le co-compostage du CMR avec des matières plus riches en azote.

Mots-clés : compost de marc de raisin – fertilisation azotée – amendement

Summary

The lack of animal farming in Languedoc-Roussillon leads to lack of N resources for organic bread wheat producers and decrease of soil organic matter (SOM). In the same time, huge amounts of grape marc are generated by wine production. This study aims to evaluate agronomic interest of composted grape marc (CGM) application on wheat fields, relatively to their N and SOM deficiencies. Field trials are installed on farm and in experimental conditions: crop quantity and quality and soil of amended and unamended plots are compared. Results show that CGM application slightly enhances yields but no impact on grain's proteins is observed. SOM and soil organic nitrogen are higher after two years but the impact on soil water retention and structure could not be attested by the equipment. CGM spreading on organic cereals does not seem to be a satisfying answer for their nitrogen nutrition problems but could be interesting in enhancing SOM. Other solutions could be considered like CGM application on alfalfa or CGM co-composting.

Key-words: composted grape marc – nitrogen fertilization - amendment