

Doctorat ParisTech

T H È S E

pour obtenir le grade de docteur délivré par

L'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement

(AgroParisTech)

Spécialité : Sciences Agronomiques

Présentée et soutenue publiquement par

Ahmed Karim DHAOUADI

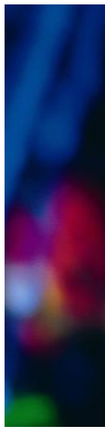
Le 27 Mars 2014

Insertion des Produits Résiduaires Organiques dans les systèmes de culture : Cas des systèmes céréaliers de la Plaine de Versailles et du Plateau des Alluets

Directrice de thèse : **Christine AUBRY**
Directrice de thèse : **Sabine HOUOT**

Le jury est composé de :

Bernard NICOLARDOT	Professeur, AgroSup Dijon	Rapporteur
Jean-Marie PAILLAT	Chercheur, CIRAD	Rapporteur
Jean ROGER ESTRADE	Professeur, AgroParisTech	Examinateur
Claire CHENU	Professeur, AgroParisTech	Examinateur
Philippe EVEILLARD	Responsable Agronomie-Environnement, UNIFA	Examinateur
Christine AUBRY	Ingénieur de Recherche HC, HDR, INRA	Directrice de thèse
Sabine HOUOT	Directeur de Recherche, INRA	Directrice de thèse



AgroParisTech
UMR Sciences Action Développement Activités produits Territoires ;
UMR Environnement et Grandes Cultures
Bât. EGER, BP 01, 78 850 Thiverval-Grignon

Remerciements

Le travail de thèse porte le seul nom de son auteur, toutefois, nombreux sont celles et ceux, sans lesquels, ce mémoire n'aurait pu voir le jour…

Ce travail de thèse a été réalisé à cheval entre l'UMR SAD-APT et l'UMR EGC dans le cadre du projet ISARD « Intensification écologique des Systèmes de production Agricoles par le Recyclage des Déchets ». Ce projet a bénéficié d'un financement de la part de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR).

En premier lieu, un GRAND MERCI à mes deux directrices de thèse : **Sabine Houot** (Directrice de Recherche à l'UMR EGC) et **Christine Aubry** (Ingénieur de Recherche à l'UMR SAD-APT) qui ont encadré cette thèse durant 4 années. Je suis très reconnaissant pour leur disponibilité et du temps consacré pour mener à bien ce travail, surtout pendant les moments difficiles. Leurs remarques étaient toujours pertinentes. A chaque étape de cette thèse, elles m'ont toujours accordé leur confiance et ont su me donner goût pour la recherche scientifique. Je les remercie également pour les nombreuses discussions scientifiques toujours constructives et intéressantes. Leur soutien moral était important et efficace tout au long de la thèse. Très sincèrement, Merci beaucoup !

En second lieu, je voudrais remercier de tout mon cœur ma famille : Mon père, Ma mère, Ma sœur et ma fiancée Nour. Ils m'ont toujours soutenu et ont toujours tout fait pour que je sois dans les meilleures conditions possibles pour mener à bien mon travail de thèse malgré les innombrables problèmes dans MON PAYS « la TUNISIE ». Je leur dédie spécialement ce travail et j'espère qu'ils sont fiers de moi. Que DIEU me les garde !

Je suis très reconnaissant à Virginie Parnaudeau pour son aide : la formation que j'ai pu acquérir sur STICS m'était très précieuse, grâce à elle. Je n'oublierai pas les nombreuses discussions scientifiques, très enrichissantes, que nous avons pu avoir.

Je dédie également ce travail à toute l'équipe de chercheurs, thésards, post-docs et stagiaires du projet ISARD et particulièrement Hervé Saint Macary, Philippe Cambier, Nouraya Akkal, François Guerrin, Moussa N'Dienor, Alexis de Junet, Steve Joncoux, Santiago Lopez, Laurent Thuriès, Jean Marie Paillat, Emmanuel Doelsch etc…

Je remercie énormément les techniciens de l'UMR EGC sol : Jean-Noel Rampon, Muriel Jolly, Véronique Etievant, Dalila Hadjar et Christophe Labat pour leur aide très précieuse dans toutes les manipes que j'ai eu à effectuer, leur soutien ainsi que leur patience et surtout pour les nombreuses questions de tout genre que je leur ai posées.

Je remercie énormément tous les acteurs du territoire de la Plaine de Versailles et du Plateau des Alluets (agriculteurs, producteurs de PRO et tous les membres de l'Association Patrimoniale de la Plaine de Versailles et du Plateau des Alluets) de leur accueil, de leur aide précieuse et de leur participation active au bon déroulement de cette thèse.

Je remercie particulièrement mes collègues de bureau (Jésus Maria Benito, Sohaib Aslam, Khaled Brimo) et spécialement Marc. Outre notre relation de collègue, nous sommes aussi de très bons amis. Cette ambiance magnifique m'a beaucoup aidé à surmonter des moments difficiles. Merci les gars pour votre bonne humeur et l'excellente ambiance entretenue durant ces 4 années de thèse.

Merci aux ex-thésards avec qui j'ai partagé de nombreux moments sympathiques : Gwenaelle Lashermes, Christophe Gigot, Théodore Kaboré, Clément Peltre, Jérémy Doublet, Flavie Mayrand, Maha Chalhoub ainsi que les

futurs qui soutiendront prochainement : Anais Goulas, Amira Askri, Ana Cassigneul, Fiona Obriot, Florian Chabauty, Laure Vogel, Marc Pinheiro, Ophélie Sauzet, Paul Emile Noirot, Karen Yemadje et Quentin Aemig.

Merci aussi à Laure Mamy, Alix Bell, Sabrina Fehri et Vincent Mercier pour les nombreuses discussions, les moments extrêmement sympathiques que nous avons pu partager ainsi que leur soutien.

Je ne peux terminer sans dédier ce travail à toute l'équipe EGC et plus particulièrement l'équipe Sol pour leur accueil ainsi que les relations très amicales que j'ai eu.

Je n'aurai que de très bons souvenirs de mon passage à Grignon, après ces années de travail, grâce à toutes les personnes que j'ai citées, mais aussi grâce au cadre du travail où les échanges ont toujours été passionnants et sympathiques.

Encore une fois un GRAND MERCI A TOUS !

SOMMAIRE

INTRODUCTION 1
0.1. L'augmentation du prix du pétrole et la volatilité des prix des céréales 1
0.2. Une forte augmentation des déchets 2
0.3. En France, une agriculture qui pourrait avoir besoin de ces déchets organiques 3
0.4. Plus et mieux utiliser les PRO en agriculture 4
0.5. Présentation du projet ISARD 5
0.6. Objectifs de la thèse 6
Chapitre 1 : ETAT DE L'ART 11
1.1. Contexte réglementaire du devenir des déchets organiques 11
1.2. Valeur agronomique des PRO 15
1.3. Valeur amendante des PRO : 28
1.4. Impacts environnementaux potentiels liés à la dynamique du N après apport de PRO 30
1.5. Intérêt de la modélisation pour appréhender le devenir du C et N apportés par les PRO 33
1.6. Insertion des PRO dans les systèmes de culture 35
Chapitre 2 : PRESENTATION DU TERRITOIRE D'ETUDE 41
2.1. Présentation du territoire d'étude : la Plaine de Versailles et le Plateau des Alluets (PVPA) 41
Chapitre 3 : INVENTAIRE ET CARACTERISATION DES PRO ET DES SYSTEMES DE CULTURE SUR LE TERRITOIRE 51
3.1. Inventaire et caractérisation des PRO disponibles sur le territoire 51
3.2. Résultats : Sources de PRO sur le territoire, inventaire et caractérisation 56
3.3. Caractérisation des systèmes de culture sur le territoire 74
Chapitre 4 : INTERET ET CALAGE DU MODELE STICS POUR DECRIRE LA DYNAMIQUE DE L'AZOTE EN CAS D'APPORTS REPETES DE PRO : EXEMPLE DE L'ESSAI QUALIAGRO 91
4.1. Matériel et méthodes 92
4.2. Résultats et discussion 100
4.3. Conclusion 113
Chapitre 5 : SCENARIOS DE SUBSTITUTION DES ENGRAIS AZOTES VIA L'UTILISATION DE PRO FERTILISANTS ET AMENDANTS 117
5.1. Méthodologie d'élaboration des scenarios de substitution des engrais azotes par l'utilisation des PRO 117
5.2. Construction des simulations STICS 125
5.3. Analyse des resultats 129
5.4. Scénarios de substitution 143
5.5. Conclusion 168
Chapitre 5 : Discussion 173
6.1. Retour sur les Résultats 173
6.2. Dimension territoriale de l'utilisation agricole des PRO 183
6.3. Perspectives à l'issue du travail de thèse 184
CONCLUSION 185
ANNEXES 201

Liste des Figures

Figure 0.1 : Evolution des prix du pétrole entre 1970 et 2011 (source France-inflation.com) 1
Figure 0.2 : Evolution des prix de vente du blé de 1970 à 2012 en $/t de blé (source Bourse de Kansas City) 2
Figure 0.3 : Evolution des marges nettes du blé et de maïs entre 1991 à 2004 en euros/ha (source Insee, 2007) 2
Figure 0.4 : Répartition de la production d'effluents d'élevage en France en 2002 (Biomasse Normandie, 2002) 4
Figure 1.1 : Procédures de retour au sol des matières organiques (Source : *Recyclage agronomique des matières organiques, D. Plumail et S. Ducotet, Biomasse Normandie, Env. et Technique n°205, av.2001)* 14
Figure 1.2 : Schéma simplifié du cycle de l'azote lié à un apport de PRO (Thèse Francou, 2003) 20
Figure 1.3 : Cinétiques de minéralisation du N organique de différents types de PRO. 22
Figure 1.4 : Exemples de valeurs d'ISMO de différents types de PRO 29
Figure 1.5: Description du modèle Henin & Dupuis, 1945 33
Figure 1.6: Structures générales des modèles Henin-Dupuis et AMG 34
Figure 2.1: Positionnement géographique du territoire (Plaine de Versailles et Plateau des Alluets, PVPA) en France et en ile de France; présentation des communes concernées et de la topographie du territoire 41
Figure 2.2 : Carte géologique du territoire d'études 43
Figure 2.3 : Carte pédologique simplifiée du territoire d'études 43
Figure 2.4 : Données climatiques du territoire d'études (Station météo de la Ferme de Grignon) : Moyennes de la température max et min, la pluviométrie et l'ETP Pennman sur 12 ans ou cumuls mensuels moyennés sur cette même période (2000-2011) 44
Figure 3.1: Quantités d'effluents d'élevage (hors fumiers de chevaux) produites sur le territoire et emplacement des différentes fermes 59
Figure 3.2: Quantités de fumiers de chevaux produites sur le territoire et emplacement des différents centres équestres 60
Figure 3.3: Organisation des communes dans la gestion des boues et les quantités produites par station d'épuration 62
Figure 3.4: Organisation des communes dans la gestion des ordures ménagères et les quantités produites sur le territoire 64
Figure 3.5 : Organisation des communes dans la gestion des déchets verts et les quantités de composts produites sur le territoire 65
Figure 3.6 : Cinétiques de minéralisation du C des PRO au cours d'incubations en conditions contrôlées de laboratoire 69
Figure 3.7. Dynamique de minéralisation de l'azote organique au cours d'incubation des différents PRO en mélange dans un sol et en conditions contrôlées de laboratoire 70
Figure 3.8. Evolution de l'azote disponible accumulée sur la période d'incubation des différents PRO 71
Figure 3.9 : Localisation des exploitations céréalières enquêtées sur le territoire par rapport aux grands types de sols (JM Gilliot et D. Hadjar) 75
Figure 3.10 : Successions culturales reconstituées à partir des occupations du sol déclarées dans les îlots PAC 84
Fig.4.1. Plan de l'essai Qualiagro, TEM : traitement témoin, DVB : co- compost de déchets verts et boue, BIO : co-compost de biodéchets et déchets verts, OMR : compost d'ordures ménagères résiduelles, FUM : Fumier de bovin 93
Fig. 4.2. Dynamique de minéralisation de l'azote (a) et du carbone (b) des amendements organiques : moyennes des résultats expérimentaux de 1998, 2000, 2002, 2004, 2006 et 2007 ; cinétiques simulée avec STICS résidus calibrée sur la moyenne des résultats d'incubation 96

Fig.4.3. Représentation du module STICS résidus. k et λ : coefficients de décomposition (j^{-1},), Y : rendement d'assimilation du PRO par les microorganismes ($g.g^{-1}$), h : rendement d'intégration dans la matière organique du sol issue de la matière organique assimilée par les microorganismes ($g.g^{-1}$), k2 (an^{-1}) : coefficient de minéralisation de la MO 97
Fig.4.4. Dynamique de minéralisation de l'azote avant (Nicolardot et al, 2001. Trait plein) et après modification des paramètres (trait discontinu) 98
Fig.4.5. Dynamique de minéralisation de l'azote des amendements organiques après modification des paramètres du BIO et FB 99
Figure 4.6. Comparaison entre les rendements simulés/observés des différents traitements durant les 11 ans de l'essai 101
Fig. 4. 7. Rendements observés (a) et simulés (b) des différents traitements durant les 11 ans de l'essai 102
Fig. 4.8. Comparaison entre les quantités de N absorbées par les cultures simulés/observés des différents traitements durant les 11 ans de l'essai 104
Fig. 4.9. Quantités mesurées (a) et simulées (b) de N absorbées par les cultures des différents traitements durant les 11 ans de l'essai 104
Fig.4.10. Evolution des stocks de Norg dans le sol des différents traitements : données mesurées (moyenne des 4 répétitions par traitements) et simulées avec STICS 106
Fig.4.11. Résultats de simulation du modèle STICS. Accumulation des quantités de Norg provenant des PRO et des résidus de culture dans le sol pendant 11 ans d'essais (a : DVB, b : BIO, c : OMR, d : FB). Nb : quantités de N dans la biomasse microbienne, Nr : Quantités de N dans les résidus (PRO+Résidus de culture), MO active : Fraction du N organique du sol dans la matière organique active (35% du N humus), DELTA : évolution des quantités de N humus dans le sol après soustraction des quantités de Norg initiales dans le sol. 106
Fig. 4.12. Evolution des quantités simulées (courbes) et mesurées (points) de N minéral dans le sol sur 120cm de profondeur des différents traitements 109
Fig.4.13. Evolution des quantités de N minéralisées des PRO cumulées sur les 11 ans de simulation dans les différents traitements 110
Fig.4.14. Evolution des quantités de N minéralisées de la matière organique du sol cumulées sur les 11 ans de simulation dans les différents traitements 110
Fig. 4.15. Evolution des quantités de N lixiviées cumulées sur les 11 ans de simulation dans les différents traitements 111
Figures 5.1 : Pluviométries cumulées mensuelles (a), températures moyennes mensuelles (b), ETP Penman moyennes cumulées (c) et rayonnements globaux cumulés (d) entre 1999 et 2009, sur le site Qualiagro considéré comme représentatif du territoire étudié 119
Figure 5.2 : Schéma des différents scénarios de substitution des engrais azotés, testés pour une des successions de culture dominantes sur le territoire 124
Figure 5.3 : Dynamique d'évolution de l'azote minéral potentiellement disponible optimisée à l'aide du module STICS à partir des résultats d'évolution du N minéral au cours d'incubations sol +PRO fertilisant ou amendant en conditions contrôlées de laboratoire (mg N/kg sol) 127
Figure 5.4 : Courbes de réponse à l'azote minéral des rendements pour la culture de Colza 132
Figure 5.5 : Courbes de réponse à l'azote minéral des quantités de N absorbées par la culture de Colza 132
Figure 5.6 : Courbes de réponse à l'azote minéral des rendements pour la culture de Blé 133
Figure 5.7 : Courbes de réponse à l'azote minéral des quantités de N absorbées par la culture de Blé 134
Figure 5.8: Courbes de réponse à l'azote minéral pour le rendement de la culture de Maïs 135
Figure 5.9 : Courbes de réponse à l'azote minéral des quantités de N absorbées par la culture de Maïs 135
Figure 5.10: Rendements simulés des scénarios d'utilisation de PRO fertilisants **sur un sol pauvre en MO** 144

Figure 5.11: Quantités de N lixiviées des scénarios d'utilisation de PRO fertilisants **sur un sol pauvre en MO** 145
Figure 5.12: Bilan Norg des scénarios d'utilisation de PRO fertilisants **sur un sol pauvre en MO** 146
Figure 5.13 : Rendements simulés du scénario d'utilisation de boues séchées **sur un sol riche en MO** 148
Figure 5.14: Quantités de N lixiviées du scénario d'utilisation de boues séchées **sur un sol riche en MO** 149
Figure 5.15: Bilan Norg du scénario d'utilisation de boues séchées **sur un sol riche en MO** 150
Figure 5.16: Rendements simulés des scénarios d'utilisation de PRO amendants **sur un sol pauvre en MO** avec ou sans exportation des résidus de blé. Compost FC : Compost de fumier de chevaux, FC pailleux : fumier de chevaux pailleux, Compost DV : Compost de déchets verts de Versailles, Compost FC – RC : Compost de fumier de chevaux avec exportation des résidus de culture de blé 152
Figure 5.17: Quantités de N lixiviées des scénarios d'utilisation de PRO amendants **sur un sol pauvre en MO** avec ou sans exportation des résidus de blé. Compost FC : Compost de fumier de chevaux, FC pailleux : fumier de chevaux pailleux, Compost DV : Compost de déchets verts de Versailles, Compost FC – RC : Compost de fumier de chevaux avec exportation des résidus de culture de blé 154
Figure 5.18: Bilan Norg des scénarios d'utilisation de PRO amendants **sur un sol pauvre en MO**, avec cipan 155
Figure 5.19: Rendements simulés des scénarios d'utilisation de PRO amendants **sur un sol riche en MO** avec ou sans exportation des résidus de blé. Compost FC : Compost de fumier de chevaux 157
Figure 5.20: Quantités de N lixiviées des scénarios d'utilisation de PRO amendants **sur un sol riche en MO** avec ou sans exportation des résidus de blé. Compost FC : Compost de fumier de chevaux 158
Figure 5.21: Bilan Norg des scénarios d'utilisation de PRO amendants **sur un sol riche en MO** avec ou sans exportation des résidus de blé. Compost FC : Compost de fumier de chevaux 159
Figure 5.22: Rendements simulés des scénarios d'utilisation mixte de boues séchées et de compost de fumier de chevaux sur **un sol pauvre en MO**, avec ou sans exportation des résidus de culture 162
Figure 5.23: Quantités de N lixiviées des scénarios d'utilisation mixte de boues séchées et de compost de fumier de chevaux sur **un sol pauvre en MO**, avec ou sans exportation des résidus de culture 163
Figure 5.24: Bilan Norg des scénarios d'utilisation mixte de boues séchées et de compost de fumier de chevaux sur **un sol pauvre en MO**, avec ou sans exportation des résidus de culture 164
Figure 5.25: Rendements simulés des scénarios d'utilisation mixte de boues séchées et de compost de fumier de chevaux sur **un sol riche en MO**, avec enfouissement total des résidus de culture 165
Figure 5.26: Quantités de N lixiviées des scénarios d'utilisation mixte de boues séchées et de compost de fumier de chevaux sur **un sol riche en MO**, avec enfouissement total des résidus de culture 166
Figure 5.27: Bilan Norg des scénarios d'utilisation mixte de boues séchées et de compost de fumier de chevaux sur **un sol riche en MO**, avec enfouissement total des résidus de culture 167

Liste des Tableaux

Tableau 1.1 : concentration en ETM et en polluants organiques dans les boues et les flux maximums à apporter au sol 12
Tableau 1.2 : Périodes d'interdiction d'épandage des fertilisants en fonction de leur type 15
Tableau 1.3 : Distance réglementaire entre les surfaces épandables et différentes sources d'eaux en fonction du type de fertilisant 15
Tableau 1.4 : Quantités de PRO produits en France 16
Tableau 1.5 : Synthèse des caractéristiques des PRO issus de données bibliographiques 19
Tableau 1.6 : Disponibilité de l'azote des boues (ADEME, 1996) 23
Tableau 1.7 : Récapitulatif de la disponibilité de l'azote des différentes familles de PRO 26
Tableau 1.8 : Synthèse des Keq des différents types de PRO (d'après COMIFER, 2013) 27
Tableau 1.9 : Valeur fertilisante à court terme du phosphore des différents PRO (Guivarch, 2001) 28
Tableau 1.10 **:** Synthèse des rendements d'accumulation du C du sol générés par des apports de matières organiques exogènes (d'après Muller et al., 2004) 29
Tableau 1.11 : Synthèse des volatilisations de NH_3 des différents types de PRO (ADEME, 2005) 32
Tableau 3.1 : Recensement des sources de PRO : origine des informations collectées et méthode de calcul et de vérification des quantités de PRO 53
Tableau 3.2 : Méthodes de caractérisation chimique des PRO 55
Tableau 3.3 : Quantités produites et flux sur le territoire des PRO produites et/ou consommés 57
Tableau 3.4 : Synthèse des types d'élevage et les quantités d'effluents produits par les différentes sources 59
Tableau 3.5. : Inventaire détaillé des quantités de fumiers de chevaux produites. Les calculs sont faits sur la base de 36 semaines de présence en box, une densité de 0.4 pour les fumiers frais et une teneur en MS de 50% 61
Tableau 3.6 : Synthèse des productions de boue sur le territoire 63
Tableau 3.7 : Caractéristiques des procédés de compostage des déchets verts et tonnages produits 65
Tableau 3.8 : teneurs en ETM dans les différents PRO ; concentrations maximales autorisées pour les amendements organiques (NFU 44 051) et les boues d'épuration (arrêté du 8 Janvier 1998) 66
Tableau 3.9 : Caractéristiques générales des PRO échantillonnés (3 échantillons analysés par PRO) 68
Tableau 3.10 : Caractéristiques biochimiques (% MO) et indice de stabilité de la matière organique (ISMO) des PRO (% MO ou C) 69
Tableau 3.11 : Quantités d'azote disponible et de Norg minéralisé des différents PRO en fin d'incubation 72
Tableau 3.12: Quantités d'azote disponibles des PRO fertilisants sur le territoire 73
Tableau 3.13 : récapitulatif des exploitations enquêtées 77
Tableau 3.14: Typologie des successions de cultures en fonction des types de sols chez les agriculteurs 78
Tableau 3.15 : Récapitulatif de la gestion de la fertilisation des cultures des successions dominantes 81
Tableau 3.16 : Utilisation des PRO dans les exploitations enquêtées 82
Tableau 3.17. Récapitulatif des successions de cultures reconstituées à partir des données PAC du territoire 85
Tableau 3.18. Triplets successions, types de sols et Fertilisation moyenne pour les successions principales à partir des agriculteurs enquêtés 86
Tableau 3.19: Apports moyens annuel en N minéral pour les cultures sur le territoire 86
Tableau 4.1: Caractéristiques des résidus de récolte de blé et de maïs 94
Tableau 4.2 : Caractéristiques des amendements épandus dans l'essai Qualiagro. Moyenne et écart-type des analyses des amendements épandus en 1998, 2000, 2002, 2004, 2006 et 2007. DVB : co- compost de déchets verts et boue, BIO : co-compost de biodéchets et déchets verts, OMR : compost d'ordures ménagères résiduelles, FB : Fumier de bovin 94

Tableau 4.3 : Fractions biochimiques et indice de stabilité de la matière organique des amendements (ISMO). Valeurs moyennes et écart-type des différentes fractions (SOL : fraction soluble, HEM : hémicellulose, CEL : cellulose, LIC : lignines, C3j : pourcentage de Corg minéralisé à 3 jours d'incubation). DVB : co- compost de déchets verts et boue, BIO : co-compost de biodéchets et déchets verts, OMR : compost d'ordures ménagères résiduelles, FB : Fumier de bovin 95
Tableau 4.4 : Flux de N organique (Norg) et de N minéral (Nmin) apportés via l'épandage des différents amendements dans l'essai Qualiagro entre 1998 et 2007. DVB : co- compost de déchets verts et boue, BIO : co-compost de biodéchets et déchets verts, OMR : compost d'ordures ménagères résiduelles, FB : Fumier de bovin 95
Tableau 4.5 : Paramètres régissant la dynamique d'évolution du N des différents PRO dans le modèle STICS résidus (cf figure 2). SSD : Somme des carrées des écarts entre la cinétique simulé pour un type de PRO et la cinétique mesurée. 98
Tableau 4.6. Caractéristiques du sol 100
Tableau 4.7. Indicateurs de qualité des simulations des traitements simulés : EF : efficience de la simulation, RMSE : erreur quadratique moyenne, ND : Déviation normalisée 103
Tableau 4.8: Evolutions mesurée et simulée des stocks de N organique dans l'horizon de labour des différents traitements ; rendements apparents mesuré et simulé d'incorporation du N des PRO apportés en N organique du sol 107
Tableau. 4.9. Postes du bilan N minéral des différents traitements. TF : témoin fertilisé, TNF : témoin non fertilisé, DVB : co-compost de déchets verts et boue, BIO : co-compost de biodéchets et déchets verts, OMR : compost d'ordures ménagères résiduelles, FB : Fumier de bovin a) Flux d'entrée de N minéral cumulés pendant les 11 années de simulation, b) flux de sortie de N minéral cumulés pendant les 11 ans de simulation. 112
Tableau 5.1 : Principales caractéristiques physico-chimiques des sols 120
Tableau 5.2 : Caractéristiques des situations retenues pour évaluer les scenarios de substitution des engrais minéraux par des PRO 121
Tableau 5.3 : Doses d'apport de PRO testées dans les scénarios en respectant la législation (170kgNtot/ha)et rappel des teneurs en N organique et minéral des PRO, estimation du N minéral potentiellement disponible des PRO à l'issue des simulations des cinétiques de minéralisation du N 126
Tableau 5.4: paramètres décrivant les différents PRO dans STICS (voir figure 4.4 et tableau 4.5 de présentation du module STICS résidus pour la signification des paramètres) 126
Tableau 5.5 : Dates de début et fin de simulation des différents cas testés de la succession Colza/Blé/Maïs/Blé. 127
Tableau 5.6 : Paramètres initiaux du sol de la succession Colza/Blé/Maïs/Blé 128
Tableau 5.7 : Dates des interventions culturales et d'apport des PRO amendants et fertilisants pour les 4 cultures de la succession 129
Tableau 5.8 : Exportation de P_2O_5 et de K_2O par les cultures (Conditionnalité, 2009) 131
Tableau 5.9: CAU calculés pour la culture de colza pour les différentes situations testées 133
Tableau 5.10: CAU calculés pour la culture de blé pour les différentes situations testées 134
Tableau 5.11: CAU calculés pour la culture de maïs pour les différentes situations testées 136
Tableau 5.12 : Rendements simulés et quantités de N absorbées par les cultures ainsi que les CAU engrais calculés pour les différentes cultures de la succession Colza/Blé/Maïs/Blé en absence de fertilisation et en cas de fertilisation « agriculteur » en sol limoneux 137
Tableau 5.13. Quantités d'azote lixiviées et volatilisées des différents situations témoins de la succession de culture Colza/Blé/Maïs/Blé 141
Tableau 5.14: Bilan d'azote organique des différents témoins de la succession de culture Colza/Blé/Maïs/Blé 142

Tableau 5.15: Rendements simulés, quantités de N absorbées des plantes et Keq calculés des différents scénarios avec utilisation de PRO fertilisants de la succession de culture Colza/Blé/Maïs/Blé **sur un sol pauvre en MO** 144
Tableau 5.16: Quantités d'azote lixiviées et volatilisées des différents scénarios avec utilisation de PRO fertilisants de la succession de culture Colza/Blé/Maïs/Blé **sur un sol pauvre en MO** 145
Tableau 5.17: Bilan d'azote organique des différents scénarios avec utilisation de PRO fertilisants de la succession de culture Colza/Blé/Maïs/Blé **sur un sol pauvre en MO** 147
Tableau 5.18: Rendements simulés, quantités de N absorbées des plantes et Keq calculés des différents scénarios avec utilisation de PRO fertilisants de la succession de culture Colza/Blé/Maïs/Blé **sur un sol riche en MO** 148
Tableau 5.19: Quantités d'azote lixiviées et volatilisées des différents scénarios avec utilisation de PRO fertilisants de la succession de culture Colza/Blé/Maïs/Blé **sur un sol riche en MO** 149
Tableau 5.20: Bilan d'azote organique des différents scénarios avec utilisation de PRO fertilisants de la succession de culture Colza/Blé/Maïs/Blé **sur un sol riche en MO** 150
Tableau 5.21: Quantités totales d'azote, de phosphore et potassium apportées suite à l'épandage de PRO fertilisants à l'échelle de la succession de culture 151
Tableau 5.22: Exportations des cultures en phosphore et potassium en fonction des rendements obtenus 152
Tableau 5.23: Rendements simulés, quantités de N absorbées des plantes et Keq calculés des différents scénarios avec utilisation de PRO amendants de la succession Colza/Blé/Mais/Blé **sur un sol pauvre en MO** 153
Tableau 5.24: Quantités d'azote lixiviées et volatilisées des différents scénarios avec utilisation de PRO amendants de la succession de culture Colza/Blé/Maïs/Blé **sur un sol pauvre en MO** 154
Tableau 5.25: Bilan d'azote organique des différents scénarios avec utilisation de PRO amendants de la succession de culture Colza/Blé/Maïs/Blé **sur un sol pauvre en MO** 156
Tableau 5.26: Rendements simulés, quantités de N absorbées des plantes et Keq calculés des différents scénarios avec utilisation de PRO amendants de la succession Colza/Blé/Mais/Blé **sur un sol riche en MO** 157
Tableau 5.27: Quantités d'azote lixiviées et volatilisées des différents scénarios avec utilisation de PRO amendants de la succession de culture Colza/Blé/Maïs/Blé **sur un sol riche en MO** 158
Tableau 5.29: Quantités totales d'azote, de phosphore et potassium apportées suite à l'épandage de PRO amendants à l'échelle de la succession de culture 159
Tableau 5.28: Bilan d'azote organique des différents scénarios avec utilisation de PRO amendants de la succession de culture Colza/Blé/Maïs/Blé **sur un sol riche en MO** 159
Tableau 5.30: Exportations des cultures en phosphore et potassium en fonction des rendements obtenus 160
Tableau 5.31: Rendements simulés et quantités de N absorbées par les cultures et Keq calculés des scénarios d'apport de boues et de compost de fumier de chevaux de la succession Colza/Blé/Mais/Blé **sur un sol pauvre en MO** 162
Tableau 5.32: Quantités d'azote lixiviées et volatilisées des scénarios d'apport de boues et de compost de fumier de chevaux de la succession Colza/Blé/Mais/Blé **sur un sol pauvre en MO** 163
Tableau 5.33: Bilan d'azote organique des scénarios d'apport de boues et de compost de fumier de chevaux de la succession Colza/Blé/Mais/Blé **sur un sol pauvre en MO** 164
Tableau 34: Rendements simulés et quantités de N absorbées par les cultures et Keq calculés des scénarios d'apport de boues et de compost de fumier de chevaux de la succession Colza/Blé/Mais/Blé **sur un sol riche en MO** 165
Tableau 5.35: Quantités d'azote lixiviées et volatilisées des scénarios d'apport de boues et de compost de fumier de chevaux de la succession Colza/Blé/Mais/Blé **sur un sol riche en MO** 166
Tableau 5.36: Bilan d'azote organique des scénarios d'apport de boues et de compost de fumier de chevaux de la succession Colza/Blé/Mais/Blé **sur un sol riche en MO** 167
Tableau 5.37: Exportations des cultures en phosphore potassium en fonction des rendements obtenus 168

Tableau 6.1: Comparaison des caractéristiques générales des PRO échantillonnés et des références bibliographiques 176
Tableau 6.2 : Comparaison des valeurs fertilisantes azotées des PRO échantillonnés et des références bibliographiques 177

ABSTRACT

Did the recycling of organic residues of a territory on cultivated soils could make possible, at least, partial substitution of nitrogen fertilizers in crop management? This issue was treated in the case of cereal crops in a suburban area characterized by a high diversity of organic residues. The study area is the “Plaine de Versailles and the Plateau Alluets”, located in Ile de France, west of Versailles. The total surface is about 178km2 including 9900ha cultivated by 82 farmers from which 60 cultivate cereals. The animal breeding is scarce in the study area and the most common soils are Cambisols and Luvisols. We tried to develop an approach for analyzing possible substitutions of chemical fertilizers by OWP (organic waste products) use. This approach involves several steps.

First an inventory of the entire OWP available or potentially available in the territory has been achieved and all OWP were sampled and characterized: in particular, the availability of N was evaluated using the potential mineralization of the organic nitrogen under controlled conditions in the laboratory (French standard XPU 44-163). Organic residues territory were classified into (i) "organic amendments" (26320 tons of dry matter and 442 tons of total N) characterized by a stabilized organic matter, with significant potential maintenance and increasing levels of soil organic matter and (ii) "organic fertilizers" with a high availability of N (5686 tons of dry matter and 361 tons of total N) . Among the identified OWP, sludge from sewage treatment (dried and limed), and a commercial product corresponding to dried pig slurry from Britain and poultry manure are OWP with the most interesting fertilizing values.

Organic amendments with high stabilized organic matter value were also identified, including composted or not horse manure, and green waste compost.

The second step was the establishment of the crop succession and their farming practices inventory in the territory. So we can reason the substitution of chemical fertilizers by OWP based on the knowledge of crops, current levels of performance and crop needs in mineral elements, including nitrogen. Surveys have been done among 15 farmers of the territory, with a meeting with chamber of agriculture councillors and the use of multi-year census fragmented. The main crop successions in the territory are tri or quadrennial comprising generally a rapeseed and cereals.

Their quantitative distribution over the whole territory was obtained and calculated using the GIS mapping results of census plot statements PAC surface. Farming practices have been obtained using surveys: the average doses of nitrogen fertilizers in the territory are about 170 kg N/ha/year and the total annual N requirements were calculated and represent approximately 1,300 tons of N. However, the amount of potentially available N after the OWP degradation represents only 13% of crop needs.

To study and evaluate possible forms of nitrogen fertilizers substitution using OWP, we used STICS 6.9, a crop model developed by INRA (France), which simulates crop growth, the dynamics of soil water and nitrogen balances governed by daily climate data. The model was calibrated and validated based on data from a long-term experiment (Qualiagro) where repeated organic amendments spreading have been made. We were interested by simulating N dynamic in the soil as well as crop yields for 11 years. Simulations were performed on a Maize/Wheat rotation with four organic amendments used: green waste compost + sludge, biowaste compost, residual household waste compost and cattle manure, used alone or with nitrogen. The objective of this long term experiment is to study, among others, the C and N dynamics in the soil. The results show that the use of organic amendments improves soil organic matter levels and therefore, indirectly, improves mineral nitrogen availability to the crops. The potential of soil organic matter increasing levels depends on the characteristics of the OWP spread. For some OWP used (green waste compost and sludge), after 11 years, we reached a sufficient nitrogen availability increase in the soil to move from mineral fertilizers at least the year of spreading and a maize crop. The STICS 6.9 calibration on this study included into account the mineralization of crop residues, still imperfectly modelled in the tool, but we have tried to improve it.

Then, we tested alternative scenarios of mineral fertilizers substitution using OWP. The main criterion is maintaining current crop yields performance while limiting the risk of nitrate leaching. We tested using modelled scenarios organic fertilizers inputs (a dried sewage sludge and a dried pig slurry), organic amendments (a composted or not

horse manure and a green waste compost) and mixed organic fertilizers and organic amendments inputs (dried sludge and compost manure horses) on a dominant crop succession on the territory (Rape/Wheat/Maize /Wheat). We have shown that the use of organic fertilizers can substitute full way across the crop succession inputs of nitrogen fertilizers, without increasing N leached amounts and with a good maintenance of soil organic N level. Otherwise, it's important to match the dynamics of N mineralization from the OWP and the crop needs. The tested organic amendments Inputs cannot contribute in the short term, to the substitution of nitrogen fertilizers and a significant N supplementation is essential. The use of these organic amendments increases the soil organic N levels across the crop succession. Mixed organic amendments and organic fertilizers inputs may contribute both for maintaining crop yields and also increasing soil organic N levels of MO soil. However, in this configuration, the flow of P_2O_5, K_2O and amounts of N leached can be very high and unacceptable compared to the pollution risk.

The approach developed here can, in nearby soil and climatic conditions, be repeatable, and opportunities modeled at least partial substitution of mineral nitrogen by OWP in a territory may seem encouraging. Particularly in peri-urban areas, this interest can lead to consider extending the territories of collecting OWP compared to agricultural use areas. However, it's important to be careful about the mineral overflow risks (including excess of phosphorus) in some scenarios. Nevertheless, it might be interesting in the future, to test in the field, the most interesting scenarios.

RESUME

Le recyclage des résidus organiques sur les sols cultivés d'un territoire pourrait-il rendre possible la substitution au moins partielle des engrais azotés dans la conduite des cultures ? Cette question a été traitée dans le cas de la conduite des grandes cultures dans une zone périurbaine caractérisée par une forte diversité de résidus organiques. Le territoire étudié est la "Plaine de Versailles et le Plateau des Alluets" (PVPA), situé en Ile de France, à l'ouest de Versailles. Il représente 178km2 dont 9900ha cultivés par 82 agriculteurs dont 60 en grande culture. Il y a peu d'élevage dans la région d'étude et les sols les plus fréquents sont les luvisols et cambisols. Dans ce territoire on a mis au point une démarche d'analyse des substitutions possibles des fertilisants chimiques par des PRO (produits résiduaires organiques) qui comprend plusieurs étapes.

Tout d'abord un inventaire de tous les PRO disponibles ou potentiellement disponibles sur le territoire a été réalisé et tous les PRO ont été échantillonnés et caractérisés sur un plan physicochimique : en particulier, la disponibilité du N a été évaluée via la minéralisation potentielle de l'azote organique dans des conditions contrôlées au laboratoire (norme française XPU 44-163). Les résidus organiques du territoire ont été classés en (i) PRO « amendants » (26320 tonnes de matière sèche et 442 tonnes de Ntot) caractérisés par une matière organique stabilisée, ayant un potentiel important d'entretien et d'augmentation des teneurs en matière organique des sols et (ii) les PRO « fertilisants » ayant une forte disponibilité de N (5686 tonnes de matières sèches et 361 tonnes de Ntot). Parmi les PRO recensés, les boues de stations d'épuration (séchées et chaulées), un produit commercial correspondant à un lisier de porc en provenance de Bretagne et les fientes de volailles sont les PRO ayant les valeurs fertilisantes les plus intéressantes.

Des PRO à forte valeur amendante ont aussi été recensés, dont des fumiers de chevaux compostés ou non et des composts de déchets verts.

Une deuxième étape consiste en l'inventaire des successions de culture et des itinéraires techniques actuellement pratiqués sur le territoire afin que l'on raisonne la substitution possible de fertilisants chimiques par des PRO sur la base des connaissances des cultures, des niveaux actuels de rendement et des besoins de ces cultures en éléments minéraux, dont l'azote. Cette étape est passée par des enquêtes de pratiques auprès de 15 agriculteurs du territoire, par un entretien auprès des conseillers de la chambre d'agriculture et par l'utilisation pluriannuelle des recensements parcellaires. Les principales successions de culture sur le territoire sont tri ou quadriennales comprenant, généralement, un colza en tête d'assolement et des cultures céréalières. Leur répartition quantitative sur l'ensemble du territoire a été obtenue et leur surface calculée grâce à la cartographie sur SIG des résultats du recensement parcellaire des déclarations PAC. Les itinéraires techniques ont été obtenus par enquêtes : les doses moyennes d'apports d'engrais azotés sur le territoire sont d'environ 170 kgN/ha/an et les besoins annuels totaux en N des cultures ont été calculés et représentent environ 1300 tonnes de N. Or, les quantités de N potentiellement disponibles issue de la minéralisation des PRO produits ou disponibles aujourd'hui sur le territoire ne représentent que 13% des besoins des cultures.

Pour étudier et évaluer néanmoins des formes possibles de substitution des engrais azotés par des PRO, nous avons utilisé STICS 6.9, un modèle de culture développé par l'INRA (France) qui simule la croissance des cultures, la dynamique de l'eau du sol et les bilans azotés régis par des données climatiques journalières. Le modèle a été calé et validé en se basant sur des données issues d'un essai de longue durée localement implanté (Qualiagro) où des apports répétés de PRO amendants sont effectués. Nous nous sommes intéressés à la simulation de la dynamique de N dans le sol ainsi qu'aux rendements des cultures durant 11 ans. L'essai est réalisé sur une rotation maïs-blé avec quatre amendements organiques utilisés : compost de déchets verts + boues, compost de biodéchets, compost d'ordures ménagères résiduelles et fumier de bovin, utilisés seuls ou avec une complémentation azotée pour étudier, entre autres, la dynamique dans le sol du C et N. L'essai montre que l'utilisation d'amendements organiques améliore les teneurs en matière organique du sol et augmente par conséquent, de manière indirecte, la disponibilité en azote pour les cultures. Le potentiel d'augmentation des teneurs en MO des sols dépend des caractéristiques des PRO épandus mais pour certains (compost de déchets verts et de boues) on parvient au bout

de 11 années à augmenter suffisamment la disponibilité en azote des sols pour pouvoir se passer d'engrais minéraux au moins l'année de l'apport et pour une culture de maïs. Le calage de STICS 6.9 sur cet essai a notamment consisté à prendre en compte la minéralisation des résidus de culture, encore imparfaitement modélisée dans l'outil, mais que nous avons tenté d'améliorer.

Nous avons alors construit des scénarios de substitution visant à atteindre des niveaux de rendements compatibles avec les niveaux actuels obtenus par les agriculteurs, tout en limitant les risques de lixiviation des nitrates. Nous avons testé par modélisation des scénarios d'apports de PRO fertilisants (Boues séchées et un lisier de porc séché), des PRO amendants (Compost de fumier de chevaux, Fumier de chevaux pailleux et un Compost de déchets verts) et des apports mixtes de PRO fertilisants et amendants (Boues séchées et Compost de fumier de chevaux) sur une succession de culture dominante sur le territoire (Colza/Blé/Maïs/Blé). Nous avons pu montrer que, l'utilisation de PRO fertilisants peut substituer de manière totale, à l'échelle de la succession de culture, les apports d'engrais azotés, sans augmenter les quantités de N lixiviées et avec un niveau d'entretien non négligeable des teneurs en Norg des sols, à condition de faire correspondre la dynamique de minéralisation de N issue de la minéralisation de ces PRO aux besoins des cultures. Les apports de PRO amendants testés ne peuvent pas contribuer seuls, à court terme, à la substitution des engrais azotés et une complémentation importante en N est indispensable. Par contre, l'utilisation de ces PRO amendants permet une augmentation conséquente des teneurs en Norg dans les sols même à l'échelle de la succession de culture. Les apports mixtes de PRO amendants et fertilisants peuvent, quant à eux, contribuer à la fois à obtenir des niveaux de rendements corrects mais aussi à l'entretien et l'augmentation des teneurs en MO des sols à condition de s'affranchir des contraintes réglementaires actuelles. Cependant, dans cette dernière configuration, les flux de P_2O_5, de K_2O et les quantités de N lixiviées peuvent être très élevés et non acceptables par rapport aux risques de pollution

La démarche ici mise au point peut dans des conditions pédoclimatiques voisines être répétable, et les possibilités modélisées de substitution au moins partielle d'azote minéral par des PRO dans un territoire peuvent paraitre encourageantes. En zones périurbaines notamment, cet intérêt peut amener à envisager l'extension des territoires de collecte des PRO par rapport aux zones agricoles d'utilisation. Il s'agit cependant d'être très vigilant quant aux risques de déséquilibres minéraux (notamment les excès en phosphore) pouvant en résulter dans certains scénarios. Néanmoins, il pourrait être intéressant à l'avenir de tester au champ certains des scénarios qui se sont ici avérés les plus intéressants.

INTRODUCTION

La production agricole, et en particulier celle des grandes cultures dans les pays industrialisés, est fortement dépendante des prix du pétrole, via l'utilisation des engrais chimiques et plus particulièrement des engrais azotés, et des prix de vente alimentaire. Par ailleurs, les quantités de déchets produits dans le monde sont en constante augmentation, en lien avec l'urbanisation et la croissance démographique. La valorisation de la fraction organique de ces déchets *via* leur traitement et leur retour au sol pourrait contribuer à tamponner les fluctuations des coûts de production agricole. Cette thèse s'inscrit dans ce cadre général, en cherchant à contribuer à cette meilleure valorisation des fractions organiques des déchets produits.

0.1. L'AUGMENTATION DU PRIX DU PETROLE ET LA VOLATILITE DES PRIX DES CEREALES

Les prix du pétrole sont en augmentation malgré des fluctuations ponctuelles (Figure 0.1). Ces augmentations sont en relation directe avec la diminution des stocks de ces ressources dans le monde et avec l'importance du secteur de l'énergie dans le développement des pays, notamment les pays dits émergents. Entre 2001 et 2011, les prix sont passés d'environ 35 $/ baril à environ 90 $/ baril ce qui représente une hausse de 255% en 10 ans.

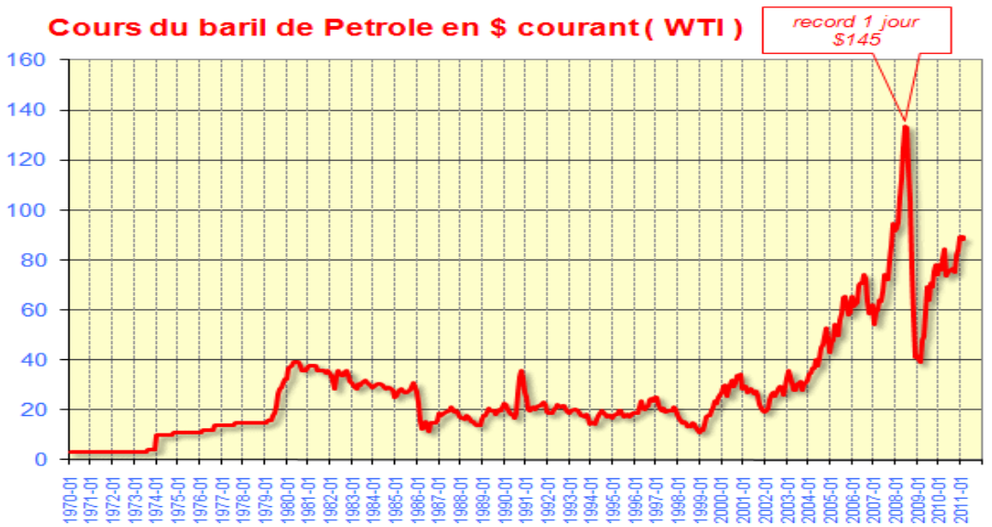


Figure 0.1 : Evolution des prix du pétrole entre 1970 et 2011 (source France-inflation.com)

En parallèle, les prix des produits alimentaires de base ont également augmenté (exemple du blé dans la figure 0.2) en lien avec l'augmentation du coût du pétrole qui impacte directement les coûts de production, *via* les engrais azotés en particulier, produits à partir de la fixation de l'azote atmosphérique moyennant une utilisation d'énergie fossile. Les prix des engrais azotés (ammonitrates) ont atteint 350 euros/t en 2008. Ceci a pour conséquence de diminuer les marges nettes des agriculteurs sur les céréales (Figure 0.3).
C'est pour cette raison que la fertilisation minérale représente souvent, pour les cultures annuelles, le premier poste de dépenses devant les produits phytosanitaires, les semences et le carburant. En effet, environ 15% des charges d'une exploitation agricole sont représentées par l'achat d'engrais chimiques (Agreste, 2010).

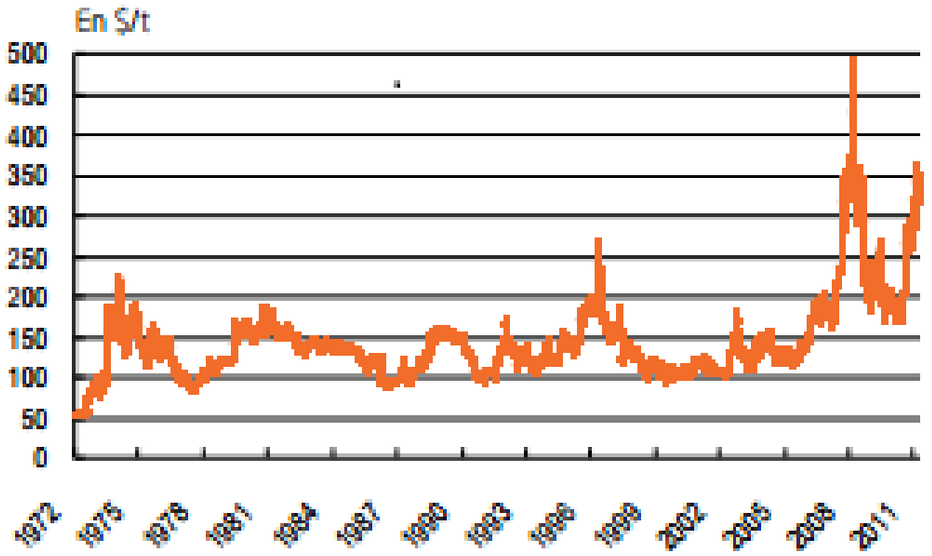


Figure 0.2 : Evolution des prix de vente du blé de 1970 à 2012 en $/t de blé (source Bourse de Kansas City)

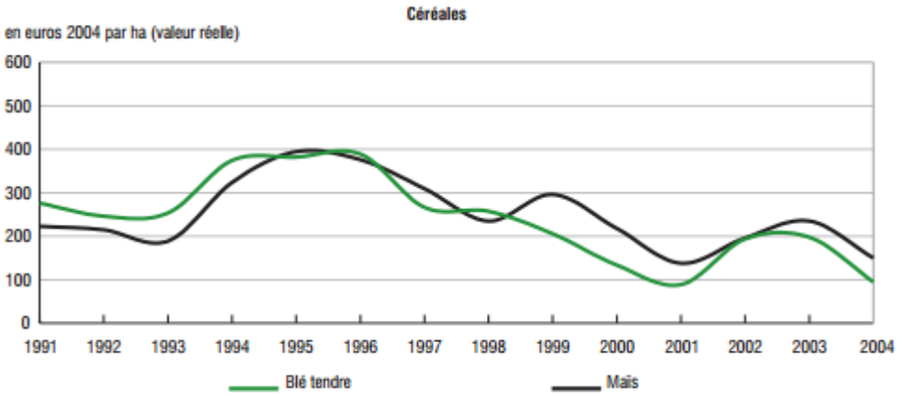


Figure 0.3 : Evolution des marges nettes du blé et de maïs entre 1991 à 2004 en euros/ha (source Insee, 2007)

0.2. UNE FORTE AUGMENTATION DES DECHETS

A l'échelle mondiale, les quantités de déchets produites sont de plus en plus importantes. Cette augmentation est en rapport avec l'évolution démographique et le niveau de développement des pays.
L'ONU estime que la population mondiale devrait poursuivre sa forte croissance jusqu'en 2075, avec un maximum historique à 9,2 milliards d'habitants (contre 6,4 milliards actuellement) aux alentours de 2050 et la poursuite de la tendance forte à l'urbanisation, les urbains dépassant depuis 2007 la moitié de l'humanité (Véron, 2007). La production de déchets qui accompagne l'activité humaine est donc appelée à augmenter dans des proportions considérables, au Sud comme au Nord. A titre d'exemple un Français a acheté, en moyenne, 916 kg de produits alimentaires en 1979 et 954 kg en 1999. Mais en 20 ans, le poids de cette consommation n'a augmenté que de 4% alors que la quantité de déchets issue de cette consommation a augmenté de plus de 15% (Poquet, 2001).
Comme la croissance de la population s'accompagne d'une concentration des habitants dans de grandes métropoles, on estime en particulier que la production de déchets sera quadruplée dans les villes entre les années

1990 et 2030 (Mougeot et Moustier, 2004). La quantité des déchets en France est évaluée à 868 millions de tonnes/an (ADEME, 2009) incluant les déchets des collectivités (14Mt/an), des ménages (31MT/an), les déchets industriels (90Mt/an), agricoles (374Mt/an), du bâtiment et des travaux publics (359Mt/an).
Actuellement 14% des 38 millions de tonnes des déchets collectés par les services publics (collecte des ordures ménagères et déchetterie) sont traités par voie biologique (compostage principalement) pour produire des composts valorisés en agriculture (ADEME, 2009). La production annuelle d'ordures ménagères est de 374 kg/habitant (ADEME, 2009) dont environ 32% sont des fractions fermentescibles potentiellement valorisables en agriculture. La part valorisée par traitement biologique et valorisation agricole pourrait donc potentiellement augmenter.
De même, le volume des boues de stations d'épuration urbaine est en constante évolution dans l'Union Européenne avec la généralisation du traitement des eaux urbaines résiduaires, en application de la directive 91/217/CEE. Actuellement en France, 1.2 millions de tonnes de matière sèche de boues d'épuration sont produites chaque année dont 75% sont épandues en agriculture, 16% l'étant sous forme de boues compostées (MEEDDM, 2009). Ces boues sont épandues sur 2 à 3% de la surface agricole utile totale en France.
Cette quantité croissante de production de déchets va être confrontée à un resserrement des alternatives possibles de leur gestion. En effet, certains pays européens comme la France et l'Allemagne ont prévu de limiter la mise en décharge des déchets non ultimes, ce qui devrait favoriser la recherche de valorisation de la fraction organique de ces déchets.

0.3. EN FRANCE, UNE AGRICULTURE QUI POURRAIT AVOIR BESOIN DE CES DECHETS ORGANIQUES

La perte de matière organique dans les sols agricoles, liée à la diminution de l'élevage dans de nombreuses régions agricoles françaises, est une des menaces de dégradation de la qualité des sols recensées lors des travaux préparatoires à la mise en place d'une directive « Sol » européenne. Les matières organiques influent sur les composantes majeures biologique, chimique et physique de la fertilité des sols (Abbott & Murphy, 2007). Les conséquences de cette diminution des teneurs en matières organiques (MO) sont nombreuses, telles que la diminution de la rétention d'eau, de la stabilité des agrégats et de la nutrition des plantes (Loveland et Webb, 2002). En France, les teneurs en MO dans les sols cultivés ont tendance à diminuer surtout en cas de pratiques culturales intensives avec exportation de résidus de culture. La majorité des sols cultivés en France présente des teneurs inférieures à 2% de carbone organique (Arrouays et al, 2002).
La capacité de l'agriculture à fournir ses propres sources de matières organiques est très variable. En France, l'agriculture est spécialisée selon les régions et la répartition des zones d'élevage est très hétérogène au niveau du territoire, avec des régions comme le centre du Bassin Parisien où l'élevage a quasiment disparu et d'autres où se concentre l'élevage comme en Bretagne et en Normandie. Il en découle une forte hétérogénéité de la répartition des effluents d'élevage, avec des zones produisant des quantités très faibles (Figure 0.4) ce qui contraint les agriculteurs qui souhaitent amender leurs sols à chercher d'autres ressources (compost de déchets verts, boues de stations…) et des zones de production animale avec des quantités d'effluents souvent supérieures aux quantités maximales pouvant être épandues sur les terres agricoles locales. Ces dernières zones sont dites zones d'excédents structurels.

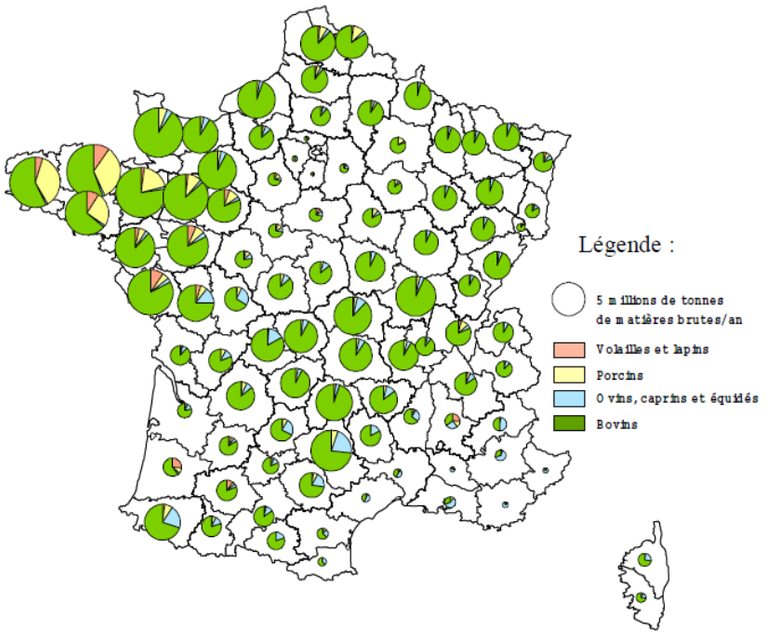


Figure 0.4 : Répartition de la production d'effluents d'élevage en France en 2002 (Biomasse Normandie, 2002)

0.4. PLUS ET MIEUX UTILISER LES PRO EN AGRICULTURE

Définis comme étant exogènes à la parcelle agricole, différents types de matières organiques d'origine animale issus d'élevages (bovins, ovins, porcins, équins etc…), d'origine urbaine (boues d'épuration, ordures ménagères, déchets verts) ou industrielle (vinasses de sucreries, résidus d'IAA etc.) peuvent être valorisés en agriculture. L'ensemble de ces matières organiques d'origine résiduaire sera défini sous l'appellation de ***produits résiduaires organiques (PRO)***. Les quantités de PRO actuellement valorisés en agriculture sont d'environ 330 millions de tonnes en France et représentent des flux d'éléments fertilisants du même ordre de grandeur que les quantités d'engrais de synthèse épandus en France en 2008 (2,4 millions de tonnes d'azote, 632 000 tonnes de P2O5 et 794 000 tonnes de K). Dans un bilan de la fertilisation en France, l'UNIFA montre que 30% de l'azote, 50% du phosphore et 70% du potassium épandus sur les sols cultivés sont d'origine résiduaire (UNIFA, 2009).

Il existe plusieurs incitations à la valorisation des PRO. Le contexte politique et réglementaire (Grenelle de l'Environnement, Directive Cadre sur les Déchets au niveau Européen) vise à augmenter la part des déchets recyclée afin d'atteindre un taux de 35 % en 2012 et 45 % en 2015 des déchets ménagers valorisés contre 24 % en 2004, ce qui aura comme impact la réduction de la quantité de déchets incinérée ou stockée. L'augmentation de la valorisation de la fraction organique participe à cette augmentation.
Les lois du Grenelle de l'environnement prônent également une progression de la notion d'agriculture durable et visent à augmenter la conversion en agriculture biologique (Objectif 12% de la SAU conduite en bio en 2020). Cela s'accompagne d'une volonté importante des consommateurs incitant les agriculteurs à produire « mieux » en utilisant moins d'intrants, et plus particulièrement en utilisant moins d'engrais azotés ce qui éviterait la contamination des eaux et limiterait les problèmes d'eutrophisation.
D'autres réglementations encadrent le retour au sol des PRO visant à assurer l'innocuité de la pratique : soit en régulant la qualité des PRO (Critères de qualité retenus pour l'homologation des matières fertilisantes, normalisation des amendements organiques via les normes NFU 44-095 et 44-051, arrêté de Janvier 1998 pour les boues d'épuration), soit en règlementant leur usage (zone d'épandage, dose et période d'épandage dans les lois liées à la mise en application de la directive nitrates).

Mais, malgré ces efforts, la valorisation des déchets en agriculture reste encore insuffisante. Pour certains PRO, on constate des réticences sociales à l'utilisation agricole. Du côté des particuliers, cette résistance provient des craintes de nuisances olfactives (exemple : boues de STEP, lisiers), notamment dans les zones périurbaines où agriculteurs et habitants ne cohabitent pas toujours de manière harmonieuse (Bertrand, 2010 ; Donadieu, 1998)
Du côté des agriculteurs eux même et de filières commerciales de produits agricoles, ce sont les risques de contamination des sols et des récoltes *via* les éléments traces métalliques (ETM) et les pathogènes que peuvent contenir les PRO d'origine urbaine (mais aussi les effluents d'élevage) qui peuvent limiter l'emploi de certains PRO dont les boues. Ainsi, les agriculteurs peuvent être contraints de ne pas épandre des boues d'épuration dans leurs parcelles à cause de certaines clauses dans les contrats de vente de leurs produits, à des firmes agroalimentaire sous signe de qualité, stipulant l'interdiction de l'utilisation de ces PRO (Amon et al, 2006). Ces craintes sont particulièrement marquées en Ile de France, en raison de l'historique d'épandage d'eaux usées non traitées d'Achères (Yvelines), qui a conduit en 1999 à une interdiction totale de toute production agricole à usage alimentaire dans les parcelles qui ont reçu ces eaux, puisqu'elles enregistraient des teneurs en ETM très importantes constituant un risque fort de toxicité pour les consommateurs.
Des contraintes d'ordre technique sont également présentes pour limiter l'usage actuel des PRO. En effet, avant l'épandage des PRO, il faut avoir des centres de collecte, de tri et de traitements des déchets (centres de collecte, plateformes de compostage, méthaniseurs, bâtiments de stockage etc.) qui représentent des investissements lourds et une main d'œuvre qualifiée. Outre les contraintes de production et de stockage des PRO, des contraintes techniques lors de l'épandage sont également présentes. Des épandeurs spécifiques pour l'épandage de PRO doivent être présents à proximité des exploitations agricoles, que ce soit des épandeurs achetés par les agriculteurs ou facilement disponibles chez des sous-traitants. D'autres contraintes existent également, telles que le manque de temps, obligation d'embaucher de la main d'œuvre occasionnelle, les conditions climatiques,….

0.5. Présentation du projet ISARD

Le projet ISARD (Intensification écologique des Systèmes de production Agricole par le Recyclage des Déchets) financé par l'ANR (Agence Nationale de la Recherche) a pour objectif d'étudier, sur quatre territoires (Mahajanga : Madagascar, Dakar : Sénégal, la Réunion et la Plaine de Versailles et le plateau des Alluets), le mode actuel de gestion et de valorisation des produits résiduaires organiques (PRO) sur des contextes différents (réglementation, type d'agriculture, climat, pression urbaine) en agriculture et de proposer d'éventuelles solutions pour mieux valoriser les PRO produits localement afin de diminuer le recours aux engrais de synthèse, tout en s'intéressant à l'impact agro-environnementale et sociologique de ces solutions à l'échelle des différents territoires.
Ce projet est constitué de 3 tâches :
- La première a pour objectifs de mettre au point des outils et des protocoles de caractérisation des différents « objets » (caractérisation des PRO,ETM, problèmes sociologiques…) rentrants dans la problématique de recyclage agricole des matières organiques disponibles sur les 4 sites d'études.
- La seconde tâche a pour buts d'élaborer une méthodologie d'analyse des modes de gestion des PRO à l'échelle des territoires. 4 sous tâches sont définies : la connaissance et la représentation cartographiques des sources et puits potentiels de PRO, la simulation de la transformation des PRO, la représentation et simulation de la gestion des PRO dans les systèmes de production agricole et enfin les politiques incitatives et représentations sociales de la gestion des PRO.
- La troisième tâche est l'intégration des connaissances et évaluation par simulation des systèmes de recyclage.

Notre travail a pour terrain d'étude le territoire de la plaine de Versailles et du plateau des Alluets (PVPA). La thèse s'insère essentiellement dans les objectifs de la deuxième tâche, tout en contribuant à la première par certains protocoles et résultats.

0.6. OBJECTIFS DE LA THESE

Les éléments de contexte précédemment présentés plaident pour l'augmentation de la valorisation de PRO dans les systèmes de production agricole au sein d'un territoire donné. Mais cette intensification nécessite la mise en place d'outils et de méthodes permettant d'assurer cette augmentation de la valorisation agricole, en s'assurant du maintien de la production agricole, ou au moins des marges générées par cette production pour les agriculteurs, de l'absence d'impacts environnementaux et de la possibilité technique de cette valorisation agricole (ressource en PRO, matériel d'épandage disponible, insertion dans les systèmes de culture,…). Nous nous intéresserons en particulier à la possibilité de substituer les fertilisants chimiques et en premier lieu l'azote, par le recours à un ou des PRO. Nous traiterons de ce sujet pour des systèmes de production de grandes cultures, en climat tempéré, et spécifiquement dans le Bassin Parisien : nous verrons que si les PRO issus d'effluents d'élevage y sont rares, d'autres PRO plutôt d'origine urbaine (voire exogènes) sont disponibles et pourraient être plus valorisés.
Nous choisirons aussi de traiter cette possible substitution de fertilisants par des PRO à l'échelle d'un territoire défini, dont nous justifierons le choix, car d'une part les PRO (matières organiques éventuellement pondéreuses) n'ont pas nécessairement vocation à voyager sur de longues distances, mais au contraire à être valorisés comme ressources locales, d'autre part car nous souhaitons nous situer dans un contexte pédoclimatique suffisamment défini pour que nous puissions, avec des outils d'agronome notamment des modèles de culture paramétrés, évaluer des scénarios de substitution sur le plan des rendements et des éventuels impacts environnementaux.

Notre question de recherche sera donc, en tant qu'agronome : *Comment raisonner l'insertion de PRO dans les pratiques de fertilisation dans les systèmes de grande culture du Bassin Parisien ?*

Nous montrerons, que pour répondre à cette question, à l'échelle d'un territoire, nous avons besoin (i) d'une part de connaître les PRO de ce territoire (issus de ou accessibles dans ce territoire) et de les caractériser sur un plan agronomique (ii) de connaître les systèmes de culture actuels de ce territoire et les pratiques actuelles de fertilisation minérale et organique des exploitants (iii) sur ces bases de proposer et évaluer sur un plan agro-environnemental des scénarios de substitution fertilisants-PRO.

Les objectifs de la thèse sont :

i) Evaluer la valorisation potentielle des PRO : assurer la production agricole à moindre coût en substituant les engrais par des PRO ou via l'augmentation des teneurs en MO dans les sols
ii) S'assurer du maintien des niveaux de rendements
iii) Evaluer les impacts environnementaux en se limitant aux flux de nitrates lixiviés
iv) Tester différents scénarios d'insertion des PRO dans les systèmes de production d'une région.

On réalise ce travail dans une petite région : la Plaine de Versailles et le Plateau des Alluets (PVPA), choix que nous justifierons, en faisant un bilan de la mise en place potentielle effective de la valorisation des PRO sur ce territoire compte-tenu de ses caractéristiques pédoclimatiques et agricoles.

Dans ce mémoire nous allons donc :
- Réaliser une bibliographie orientée par notre question, c'est-à-dire portant notamment sur les valeurs agronomiques des PRO et sur leurs insertions possibles dans des systèmes de production agricole (Chapitre 1).
- Présenter et justifier le terrain d'étude (Chapitre 2)
- Présenter les résultats d'inventaire des PRO produits et utilisés sur le territoire ainsi que l'inventaire des pratiques agricoles (Chapitre 3) afin d'identifier les unités de production et de consommation des PRO et établir un

bilan entre l'offre et la demande. Nous caractériserons les PRO en estimant leurs valeurs fertilisantes et amendantes. Nous définirons également les successions de culture les plus pratiquées sur le territoire. Les PRO ayant les valeurs fertilisantes les plus intéressantes seront retenus lors de l'établissement des scénarios de substitution des engrais azotés. Les PRO ayant les valeurs amendantes les plus intéressantes seront également retenus pour des scénarios d'entretien voire d'augmentation des teneurs en matières organiques des sols en vue du maintien de la fertilité des sols de la région étudiée.

- Mettre en place une méthode de construction et d'évaluation des scénarios de substitution des engrais azotés par des PRO et évaluer ces scénarios. Le modèle STICS sera utilisé pour tester les scenarios. Un travail préliminaire de calage et de validation du modèle STICS (Chapitre 4) sera réalisé afin de trouver un paramétrage adéquat aux conditions pédoclimatiques du territoire.
- STICS sera ensuite utilisé pour tester les scénarios de substitution des engrais et d'augmentation des teneurs en matières organiques des sols *via* les PRO. Les résultats de simulation des scénarios de substitution des engrais azotés via l'épandage de PRO et les scénarios d'entretien et d'augmentation des teneurs en matières organiques des sols cultivés des sols de la région étudiée seront analysés (Chapitre 5)
- Enfin, une discussion des différents résultats et des conclusions et perspectives seront présentés dans le Chapitre 6.

Chapitre 1 :

ETAT DE L’ART

CHAPITRE 1 : ETAT DE L'ART

Compte tenu de notre question de recherche, nous avons orienté notre bibliographie dans trois grandes directions.

- D'une part (I), le contexte réglementaire qui encadre la gestion des épandages de PRO sur le territoire français ;
- D'autre part (II), les éléments disponibles dans la littérature scientifique et technique permettant de connaître les valeurs fertilisantes et amendantes des PRO ; ainsi que les modèles existants pour analyser le devenir des éléments (C et N) apportés par des PRO ;
- Ensuite (III), les éléments disponibles permettant de raisonner l'insertion des PRO dans les systèmes de culture à l'échelle de l'exploitation et du territoire. Nous présenterons donc en particulier les concepts liés aux systèmes de culture.

Plus rapidement car telle n'est pas notre compétence propre, nous signalerons des études montrant que l'insertion des PRO dans les territoires peut poser des problèmes politiques et d'acceptabilité sociale.

1.1. CONTEXTE REGLEMENTAIRE DU DEVENIR DES DECHETS ORGANIQUES :

1.1.1 Réglementation française liée aux PRO :

La loi du 13 Juillet 1992 relative à l'élimination des déchets stipule les priorités à suivre en France : réduction de la production des déchets en amont, augmentation du recyclage et de la valorisation des déchets, obligation à partir du 1er Juillet 2002 de ne mettre en décharge que les déchets non valorisables. La valorisation en agriculture des déchets organiques participe à la valorisation matière d'une partie de ces déchets.
Les lois du Grenelle de l'environnement incitent également à augmenter le recyclage des déchets organiques pour atteindre un taux de 35 % en 2012 et 45 % en 2015 de déchets ménagers contre 24 % en 2004, ceci afin de réduire la part des déchets partant en incinération ou en stockage.

Les épandages des matières organiques d'origine résiduaire (PRO pour produits résiduaires organiques) en agriculture, dans le contexte Français, sont cadrés par différentes réglementations qui se superposent. Ces matières organiques peuvent avoir 2 statuts : **déchet ou produit**. Ces principales filières de valorisation sont résumées dans la figure 5.

1.1.1.1. Filière « déchet »

Selon la loi du 15 juillet 1975, est considéré comme déchet « tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau ou produit, ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon ».
Cette définition est complétée par la notion de déchet ultime (loi du 13 juillet 1992) : « un déchet résultant ou non d'un traitement d'un déchet, qui n'est plus susceptible d'être traité dans des conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux » et précisée par la circulaire d'avril 98 « les déchets ultimes sont les déchets dont on a extrait la part récupérable ainsi que les divers éléments polluants comme les piles et accumulateurs ».

Les déchets organiques sont, quant à eux, l'ensemble des résidus ou sous-produits organiques engendrés par l'agriculture, les industries agroalimentaires ou les collectivités composés de matière organique non synthétique et caractérisée par la présence d'atomes de carbone issus d'organismes vivants, végétaux ou animaux. En fonction de leur nature et origine, ces déchets organiques peuvent être valorisés en agriculture. C'est le cas des effluents

d'élevage issus d'installation d'élevage de type ICPE (Installation classée pour l'Environnement), des boues industrielles ou des boues d'épuration urbaine. La valorisation de ces effluents est alors soumise à plan d'épandage qui inclut :

- Recensement de parcelles réceptrices des effluents
- Qualité des effluents (teneurs en N et P) ou des boues épandues (N, P, ETM, polluants organiques)
- Flux maximum épandus
- Suivi de la qualité des sols soumis à épandage (cas des boues)

Dans le cas des boues d'épuration urbaine, les épandages se font selon ce principe en respectant les critères précisés dans l'arrêté du 8 Janvier 1998 (tableau 1.1) dans lequel sont précisées les concentrations maximales en contaminants (éléments traces métalliques et polluants organiques) et les flux maximum de matière sèche de boue (30 tonnes MS/ha en 10 ans) et de ces contaminants pendant une période donnée (10 ans).

Tableau 1.1 : concentration en ETM et en polluants organiques dans les boues et les flux maximums à apporter au sol

Eléments traces Métalliques	Valeurs limites dans les boues	Flux cumulé maximum apporté sur 10 ans	
		Cas général	Epandage sur pâturages ou sols à pH<6*
	mg/kg MS	g/m^2	g/m^2
Cadmium	10	0,015	0,015
Chrome	1000	1,5	1,2
Cuivre	1000	1,5	1,2
Mercure	10	0,015	0,012
Nickel	200	0,3	0,3
Plomb	800	1,5	0,9
Zinc	3000	4,5	3
Chrome+Cuivre+Nickel+Zinc	4000	6	4
Sélénium	-	-	0,12 (pâturage uniquement)
Fluoranthène	5	7,5	6
Benzo(b) fluoranthène	2,5	4	4
Benzo(a)pyrène	2	3	2
Total des 7 principaux PCB	0,8	1,2	1,2

* Seules les boues chaulées peuvent être épandues sur les sols dont le pH est compris entre 5 et 6. L'épandage est interdit sur les sols à pH<5

Dans le cas des effluents d'élevage, les épandages se font en respectant l'arrêté de février 2005 et ses modifications postérieures. Les épandages sont basés sur les teneurs en azote et en phosphore des effluents d'élevage (170 kg N/ha épandable en moyenne sur les parcelles, 100 kg P205/ha en moyenne).

Dans le cas d'autres boues industrielles, d'autres arrêtés existent : 3 Avril 2000 pour les boues de papeterie, 2 Février 1998 pour les autres boues industrielles. Les critères réglementant les épandages sont similaires aux précédents.

Les critères d'innocuité utilisés pour réguler l'épandage des boues sont présentés dans le tableau 1.1.

Lorsque les flux de déchets sont de faible importance comme dans le cas de petits élevages, les plans d'épandage ne sont pas obligatoires mais les épandages doivent respecter le règlement sanitaire départemental (RSD) qui définit des distances et des périodes d'épandage et des conditions d'enfouissement à respecter.

Lorsque le PRO a un statut de déchet, le producteur de PRO est responsable des conséquences des épandages. Afin de pérenniser les épandages de boue, l'article L425-1 du code des assurances et le décret n°2009-550 du 18/05/2009 prévoit une indemnisation des préjudices éventuellement subis par les exploitants et les propriétaires agricoles suite à un épandage de boues d'épuration urbaines ou industrielles sur leurs parcelles (connue sous le nom de « fond de garantie »).

1.1.1.2. *Filière « produit »*

En contexte agricole et plus particulièrement, dans le contexte de la fertilisation des cultures, les matières fertilisantes sont des produits définis, selon la loi n°79-595 du 13 juillet 1979 relative à l'organisation du contrôle des matières fertilisantes et des supports de culture, comme des matériaux dont l'emploi est destiné à assurer ou à améliorer la nutrition des végétaux ainsi que les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols.
L'application de la réglementation sur les matières fertilisantes se fait sous l'égide de Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche et des Affaires Rurales – Direction Générale de l'Alimentation (DGAL).
Quatre idées générales guident la législation des matières fertilisantes et supports de culture :

- les produits mis sur le marché doivent être efficaces pour l'usage prévu.
- les produits doivent être inoffensifs pour l'homme, les animaux et l'environnement.
- les produits doivent être stables (constance dans leur composition par rapport aux teneurs annoncées).
- les produits doivent faire référence à un document technique officiel.

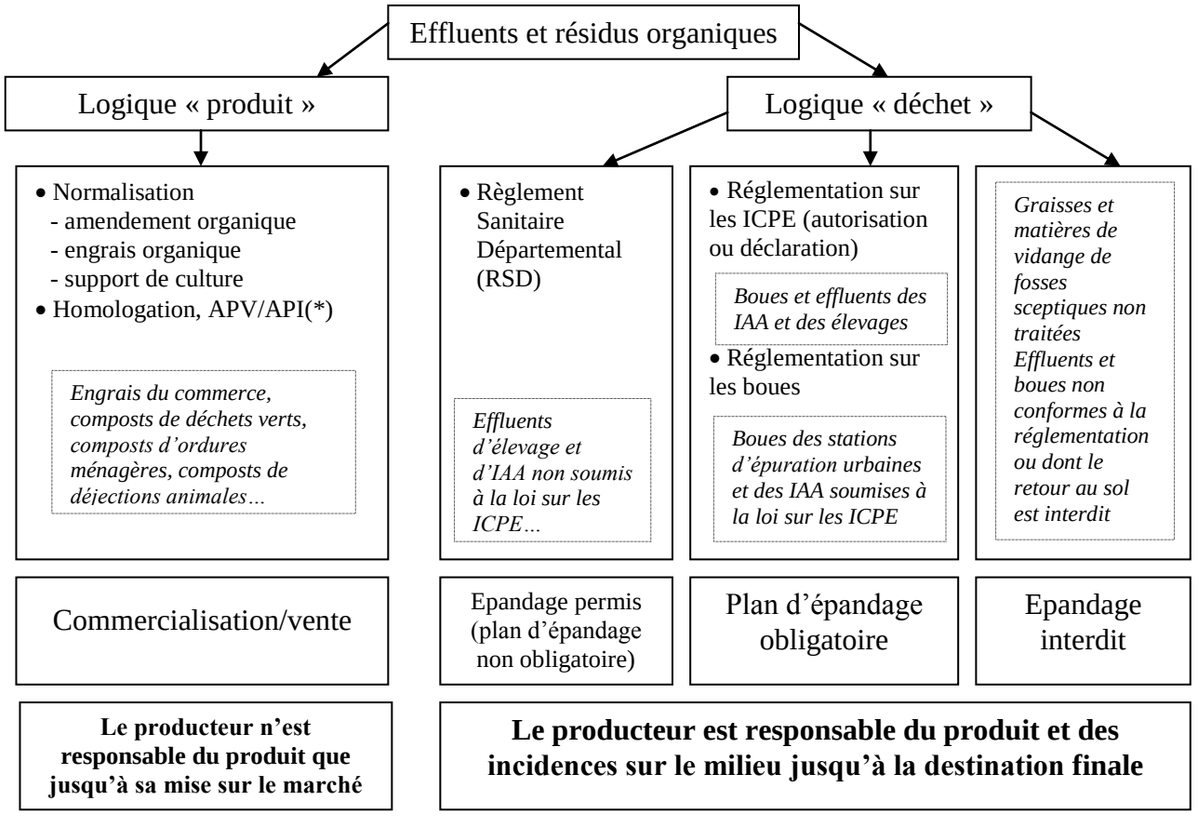
En vertu de ce dernier principe, 2 procédures de mise sur le marché sont prévues :

- Une homologation ou Autorisation Provisoire de Vente (APV) ou d'Importation (API) du produit par le ministère de l'Agriculture (arrêté du 21 déc. 98 paru au JO du 12/02/99),
- La conformité à des normes rendues d'application obligatoire par arrêté ou répondant aux dispositions réglementaires prises en application de directives européennes

Les principales normes sont celles concernant :

- les amendements organiques, *via* la norme NFU 44-051 du 5 Avril 2006 qui couvre principalement les produits fabriqués à partir de déchets végétaux et animaux et les composts urbains fabriqués à partir des ordures ménagères. Les fumiers et d'autres effluents d'élevage peuvent être commercialisés selon cette norme.
- Les amendements organiques issus de boues d'épuration : la norme NFU 44-095 concernant les composts à base de boues, est parue en mai 2002 et rendue d'application obligatoire en mars 2004.
- Les engrais organiques : NFU 42-001
- Les supports de culture : NFU 44-551

Dans toutes ces normes, un certain nombre de dénominations de produits sont définies et caractérisées selon des critères de qualité rendus obligatoires pour qu'un produit soit normalisé ; ainsi pour les dénominations de la norme NFU 44-051: MS>30% MB, N<3% MB, P_2O_5<3% MB, K_2O<3% MB, N=P_2O_5+K_2O<7%MB, C/N>8, Nmin<33% du N total, MO ≥20 ou 25 MB. (MS = Matière Sèche ; MB = Matière Brute, MO = Matière organique).
Dans le cadre de la filière « produit », la responsabilité du producteur de PRO s'arrête au moment de la mise sur le marché du produit, alors qu'elle est engagée sur tout le processus de production agricole pour la filière déchet.



(*) Autorisation provisoire de vente – Autorisation provisoire d'importation

Figure 1.1 : Procédures de retour au sol des matières organiques (Source : *Recyclage agronomique des matières organiques, D. Plumail et S. Ducotet, Biomasse Normandie, Env. et Technique n°205, av.2001)*

1.1.2. Réglementation liée à la directive cadre sur l'eau et la directive « nitrates »

D'autres critères réglementaires peuvent se croiser avec les réglementations spécifiques aux PRO et à leur qualité. C'est le cas, par exemple, de toutes les réglementations touchant à la mise en application de la directive cadre sur l'eau (DCE, 2000/60/CE) qui établit un cadre pour les réglementations nationales concernant la protection de la ressource en eau. La directive « nitrates » du 12 décembre 1991 renforce la DCE pour la protection des eaux vis-à-vis des risques de leur contamination par les nitrates. Dans ce cadre ont été définies des zones vulnérables en France, où les eaux sont particulièrement menacées ou déjà contaminées par les nitrates. Dans ces zones, de nombreuses actions sont menées pour restaurer la qualité des eaux. La définition de bonnes pratiques agricoles est une de ces mesures ainsi que la mise en place d'une réglementation concernant les épandages de tout type de PRO. Les épandages ne doivent pas dépasser 170Kg N total/ha/an sur la superficie épandable. Les flux de Phosphore doivent être équilibrés.

La transcription de la directive nitrates fixe des périodes d'interdiction des épandages de PRO en fonction de leur type et donc de leur rapport C/N (type I, C/N>8) et type II, C/N≤8) et des systèmes de culture en place (tableau 1.2)

Tableau 1.2 : Périodes d'interdiction d'épandage des fertilisants en fonction de leur type

Occupation du sol	Type de Fertilisants		
	Type I (ex fumiers)	Type II (ex Lisier)	Type III (engrais)
	C/N>8	C/N≤8	
Sols non cultivés	Toute l'année	Toute l'année	Toute l'année
Grandes cultures implantées à l'automne	Du 15/11 au 15/01	du 01/10 au 31/01	du 01/09 au 31/01
Grandes cultures implantées au printemps	Ia : 01/07 au 31/08 Du 15/11 au 15/01 Autre I : 01/07 au 15/01	du 01/07 au 31/01	du 01/07 au 15/02
Grandes cultures implantées au printemps avec CIPAN	Ia** Possible jusqu'à20j avant destruction CIPAN (≤70kg efficace) Autre* : de 15 j avant semis à 20 j avant destruction	de 15 j avant semis CIPAN à 20 j avant destruction	
Prairies implantées depuis plus de 6 mois	Du 15/12 au 15/01	du 15/11 au 15/01	du 01/10 au 31/01
Vigne	du 15/12 au 15/01	du 01/07 au 15/01	du 01/07 au 15/01
Autres cultures	du 15/12 au 15/01	du 15/12 au 15/01	du 15/12 au 15/01

*Ia : fumiers compacts pailleux, compost d'effluents d'élevage, certaines boues de papeterie
** Autre : autres type I

Les surfaces épandables sont fixées selon des distances par rapport aux sources d'eau (puits, eaux superficielles etc) et au type de PRO utilisé. Le tableau 1.3 résume ces distances réglementaires. Une distance de 100 et 200m des habitations est fixée pour le stockage des PRO en fonction de leurs types. Les fertilisants de type II doivent être stockés à une distance de 200m des habitations et des endroits publics et les fertilisants de type I doivent être stockés à une distance de 100m de ces mêmes endroits.

Tableau 1.3 : Distance réglementaire entre les surfaces épandables et différentes sources d'eaux en fonction du type de fertilisant

Type de fertilisant	Distance d'isolement des puits, sources, berges	Distance d'isolement des eaux superficielles si 7%<pente<15%
I	35m	200m
II	35m	200m
III	5m des eaux de surface courantes ou non	5m

1.2. VALEUR AGRONOMIQUE DES PRO

1.2.1. Des sources abondantes de produits résiduaires organiques

Il existe une très large gamme de produits résiduaires organiques (PRO) pouvant être valorisés en agriculture. Ils proviennent d'abord de l'agriculture elle-même ou des industries qui lui sont directement liées. Les effluents d'élevage représentent plus de 90 % des PRO valorisés en agriculture (Tableau 1.4).

Tableau 1.4 : Quantités de PRO produits en France

	Source	Total produit (en kt/an)	Part recyclée en agriculture
Effluents d'élevage	Biomasse Normandie, 2002	297 800	100 %
Industries agroalimentaires	Biomasse Normandie, 2002	13 000	65 %
Autres industries	Biomasse Normandie, 2002	2 600	54 %
Boues résiduaires urbaines	ADEME, 2009	1200 (MS)	75 %
Déchets municipaux	ADEME 2012	38 000	14%

Les principaux types de PRO sont :

- PRO d'origine agricole : ce sont essentiellement les effluents d'élevage. On distinguera 3 familles principales : les fumiers (mélange d'effluents et de litières de paille le plus souvent), les lisiers (mélanges liquides d'effluents) et les fientes (déjections de volailles)
- PRO « de loisir » : dans les zones périurbaines, l'élevage de chevaux et l'équitation sont en pleine expansion. En 2012, on compte environ en France 617000 chevaux qui produisent un potentiel de 6,2 millions de tonnes de fumier par an (10 tonnes par tête et par an)
- PRO d'origine urbaine : les 2 familles principales sont les boues d'épuration urbaine et les PRO issus du traitement des ordures ménagères et autres déchets municipaux, essentiellement des composts puisque les digestats issus du traitement anaérobie de déchets organiques sont encore assez peu représentés bien qu'en plein essor. Selon le mode de collecte et le type de déchets compostés, on distinguera les composts de déchets verts, les composts de biodéchets issus d'une collecte sélective de la fraction fermentescible des ordures ménagères et co-compostée en mélange avec des déchets verts, des composts d'ordures ménagères résiduelles issus du traitement de la poubelle résiduelle après collecte sélective des emballages propres et secs. Les boues elles-mêmes pourront subir différents traitements dont le compostage.
- PRO d'origine industrielle : beaucoup d'agro-industries recyclent des effluents liquides soit directement (eaux de lavage par exemple) ou après traitement. On citera en exemple les boues de papeterie largement valorisées.

Concernant les effluents d'élevage, environ 50% de la masse totale produite est émise directement par les animaux lorsqu'ils sont à l'extérieur. La masse potentiellement utilisable pour la fertilisation des cultures représente donc environ 150 millions de tonnes. En 2008, respectivement 38, 50 et 75% des éléments fertilisants N, P et K sont d'origine organique résiduaire, provenant essentiellement de l'élevage.
Ces sources d'effluents d'élevage sont très inégalement réparties sur le territoire national en lien direct avec la répartition de l'élevage (cf Figure 0.4 en introduction). Il en résulte des zones où les PRO sont en excès par rapport aux quantités d'éléments fertilisants dont ont besoin les cultures (zone d'excédent structurel) et la nécessité de traiter et/ou exporter ces effluents d'élevage. En revanche, dans les zones où l'élevage est peu présent, il sera donc intéressant de chercher à développer la valorisation d'autres sources de PRO.
Effectivement, les composts de différentes origines ainsi que les boues de stations, les vinasses, les farines animales et importations de fientes, fumiers et composts sont de plus en plus utilisés à partir de 2005 (UNIFA, 2009). En 2008, les apports de N de ces différents PRO représenteraient 2,1% de l'apport d'azote total dans les exploitations agricoles. Les boues de stations et les composts représentent les sources principales pour cette origine d'azote organique. En effet, la part de l'azote provenant des composts représente à elle seule, environ 1% de l'apport total dans les exploitations agricoles, les boues sont ex deuxième position avec environ 0,5%. Ces deux sources représentent à elles seules environ 71% de tous les PRO utilisés hors effluents d'élevage.

Par la suite, nous allons détailler en quoi l'épandage de ces PRO peut contribuer à la fertilité des sols et à la fertilisation des cultures.

1.2.2. Les apports de PRO améliorent les différentes composantes de la fertilité des sols

La fertilité des sols cultivés est définie par trois composantes majeures (Abbott & Murphy, 2007) :

- la fertilité physique : ensemble des propriétés physiques des sols qui contribuent à la bonne implantation et croissance des plantes : rétention en eau, porosité, stabilité structurale…

- la fertilité chimique : c'est essentiellement la fourniture en éléments fertilisants par les sols, mais également le pH du sol. Ces éléments sont présents dans le sol soit sous forme minérale (P, K, oligo-éléments), soit sous forme organique (N, S). Les caractéristiques physico-chimiques du sol telles que le pH, la CEC vont contribuer à la fertilité chimique en favorisant la rétention des cations fertilisants, en conditionnant la solubilisation d'éléments nutritifs. La teneur en N organique et donc la teneur en matière organique du sol, la dynamique de minéralisation des formes organiques d'azote des PRO ou du sol conditionneront la fertilité du sol.

- la fertilité biologique : l'activité biologique (faune et microflore) contribue aux transformations et aux cycles biogéochimiques des éléments dans le sol. En particulier, la minéralisation des formes organiques de l'azote, la nitrification sont des activités microbiennes majeures de la fertilité des sols. Ces activités sont directement liées aux teneurs en matière organique dans les sols et à la qualité de ces matières organiques.

Les PRO sont des matières organiques dont l'épandage va influencer les 3 composantes de la fertilité du sol. En fonction de leurs caractéristiques et dynamiques d'évolution dans les sols après apport, ils contribueront plus à l'une ou l'autre des composantes.

Par la suite, nous nous focaliserons sur : (i) la valeur fertilisante, essentiellement azotée des PRO, c'est-à-dire l'effet de leur épandage sur la mise à disposition des cultures des formes d'azote assimilables ; (ii) leur valeur amendante, c'est-à-dire leur capacité à entretenir voir augmenter les stocks de matière organique dans les sols.

Mais nous citerons quelques exemples d'autres effets de l'apport de PRO sur les composantes de la fertilité des sols.

Fertilité physique : Les apports répétés de PRO contribuent à l'amélioration de la stabilité de la structure des sols, donc contribuent à améliorer la résistance à l'érosion des sols. Abiven et al. (2009) ont fait une synthèse des références disponibles sur cet effet. Il est lié à l'augmentation des stocks de MO dans les sols (Annabi et al., 2011) mais également à la stimulation de l'activité biologique après apport (Annabi et al., 2007). Différents types de PRO améliorent cette stabilité : les effluents d'élevage (Abiven et al., 2007), les boues d'épuration (Ojeda et al., 2008), les composts d'origine urbaine (Annabi et al., 2007)… Les propriétés de rétention en eau ainsi que l'eau disponible pour les plantes peuvent être améliorées également (Khaleel et al., 1981 ; Foley & Cooperband, 2002). Là encore différents types de PRO se montrent efficaces.

Fertilité biologique : Les apports de PRO peuvent augmenter la biomasse microbienne (Kallenbach & Grandy., 2011) et les activités associées en raison de l'apport de composés carbonés facilement métabolisables (Garcia-Gil et al., 2000). Cette stimulation s'accompagne également d'une modification de la diversité microbienne (Ros et al., 2006; Bastida et al., 2008 ; Leyval et al., 2009 ; Bonila et al., 2012). La faune du sol est également stimulée après apport (Capowiez et al., 2009).

La valeur agronomique des PRO dépend de leur dynamique d'évolution dans le sol : valeur fertilisante *versus* valeur amendante.

Les PRO sont tous des Matières Organiques (MO). Les caractéristiques de leur MO, en particulier la vitesse d'évolution de cette MO après apport au sol, vont conditionner la valeur agronomique des PRO. Leurs effets fertilisants seront liés d'abord à leur teneur en éléments fertilisants (N, P, K, …) puis à la disponibilité de ces éléments fertilisants pour les plantes. En particulier pour ce qui concerne la valeur fertilisante azotée des PRO, celle-ci dépendra de la vitesse de minéralisation des formes organiques de cet azote. En tant que matière organique, les PRO auront une fraction plus ou moins importante de leur azote sous forme organique : la vitesse de transformation de cet azote conditionnera la valeur fertilisante azotée.

La dynamique de minéralisation de la MO des PRO va aussi conditionner leur valeur amendante. Celle-ci est définie comme la capacité des PRO à entretenir les stocks de MO dans les sols. Les PRO qui se dégradent lentement dans le sol auront donc des valeurs amendantes plus intéressantes que ceux qui se dégradent rapidement.

On retiendra donc que les valeurs amendantes et fertilisantes des PRO sont conditionnées par :

- Leur composition chimique, en particulier leur teneur en N, P, K, matière organique et les formes sous lesquelles ces éléments se présentent.
- Leur vitesse de décomposition dans le sol conditionnée par la nature biochimique de leur matière organique et l'équilibre entre éléments, en particulier leur C/N.

On s'intéresse dans ce travail principalement à la valeur fertilisante azotée des PRO. Cependant, il est important dans le raisonnement des apports et l'insertion des PRO dans les pratiques de fertilisation de tenir compte les apports en autres éléments fertilisants, P et K, afin d'éviter les apports en excès des différents éléments. Il existe de nombreuses données de référence sur les teneurs en éléments totaux N, P et K dans les principaux types de PRO. Dans le tableau 1.5 nous faisons une synthèse de ces références.

1.2.3. Valeur fertilisante azotée et disponibilité en N des PRO :

1.2.3.1. Définition de la valeur fertilisante azotée et méthode d'évaluation :

La valeur fertilisante azotée traduit la capacité d'un PRO à participer à la nutrition azotée d'une culture. Les plantes utilisent essentiellement des formes minérales d'azote, en particulier l'azote nitrique. Or dans le sol et dans les PRO, l'azote est essentiellement sous forme organique. Il faudra donc qu'il y ait minéralisation de ces formes organiques en azote ammoniacal puis nitrification pour que l'azote puisse être assimilé par les plantes (Figure 1.2).

Les PRO vont contribuer par 2 voies à la nutrition azotée des cultures :

- *Via* un effet direct : une certaine fraction du N des PRO est sous forme minérale (NH_4^+ ou NO_3^-). Cet azote sera immédiatement disponible pour les cultures. De plus, en fonction des caractéristiques biochimiques de la matière organique des PRO, leur N organique peut se minéraliser rapidement. L'effet direct sera donc conditionné par la teneur en N minéral des PRO, la proportion du N organique susceptible de se minéraliser dans les mois qui suivent l'apport des PRO. La minéralisation des formes organiques peut se poursuivre les années suivant l'épandage. On parle alors des arrières-effets de l'apport.

Tableau 1.5 : Synthèse des caractéristiques des PRO issus de données bibliographiques

Famille PRO	Origine PRO	Référence	MS	MO	Ntot	N min frais	C/N	P2O5	K2O
			%MB	%MS	%MS	%Ntot		%MS	%MS
Fumiers	Bovin	Biomasse Normandie, 2002	25	75	2,2	X	17	1,0	2,9
		Institut de l'élevage, 2001	22	81	2,6	X	15.5	1,0	4,3
	Cheval	Biomasse Normandie, 2002	50	75	1,6	X	23.4	0,6	1,8
		FIVAL, 2009	35	78	1,4	11	27.8	0,9	2,4
		ITAB, 2001	54	76	1,5	X	25.3	0,6	1,7
	Ovin	Biomasse Normandie, 2002	30	75	2,2	X	17.0	1,4	3,7
		Institut de l'élevage, 2001	30	77	2,2	X	17.2	1,3	4,0
	Caprin	Biomasse Normandie, 2002	30	75	2,0	X	18.8	1,7	1,9
		Institut de l'élevage, 2001	45,0	80	1,4	X	29.5	1,2	1,6
	Porcin	Biomasse Normandie, 2002	25,0	75	1,6	X	23.4	1,3	1,4
		Institut de l'élevage, 2001	27,8	81	3,2	10,0	18.5	3,9	4,0
	Volailles	Biomasse Normandie, 2002	70,0	75	4,1	X	9.1	4,1	2,9
		Institut de l'élevage, 2001	75,0	60	3,9	70,0	7.8	3,3	2,7
Lisiers	Bovin	Biomasse Normandie, 2002	11,0	75	3,6	X	10.4	1,8	4,5
		Institut de l'élevage, 2001	11,0	83	4,6	40,0	9.0	1,5	3,3
	Porcin	Biomasse Normandie, 2002	6,0	75	8,3	X	4.5	6,7	5,0
		Institut de l'élevage, 2001	9,3	75	10,3	60,0	3.6	5,2	6,3
Fientes	Volailles humides	Institut de l'élevage, 2001	25,0	60	6,0	70	5.0	5,6	4,8
	Volailles séchées	Institut de l'élevage, 2001	80,0	60	5,0	70	6.0	5,0	3,5
Boues de STEP	Aérobies Liquide	ADEME, 1996	3,0	70	6,7 à 13,3	10 à 20	4 à 5	6,7 à 10,0	3,0
	Deshydratée Aérobie Anaérobie	ADEME 1996	15 à 22 18 à 25	 50	3 à 5.5 1.5 à 3	<5 <5	5 à 10 5 à 10	 3.3 à 5	 0.4
	Déshydratées chaulées	ADEME, 2001	27,0	46	3,3	X	9,7	3,5	0,3
		ADEME, 1996	25,0	30,0	2,4 à 3,6	<10	8 à 11	2,4 à 4,0	0,4
		APCA, 2007	35	30	2.7	7	6		
	Aérobies séchées thermiquement	ADEME, 1996	>90		3,5 à 6,0	10,0 à 15,0	6,0 à 7,5	x	x
		APCA, 2007	95	55	4,5	2	6.1		
Composts	Boues	Leclerc et al, 2008	65	52,0	2,3	20,0	11.3	3,4	0,9
		ADEME, 2000	47	54	1 ,5	1,6	18	1,6	0,8
	Biodéchets	INERIS, 2012 COMIFER, 2013	61,8	45.5	2.2	8	11,4	1.3	1,8
	Ordures ménagères	INERIS, 2012 COMIFER, 2013	64,6	56.6	1,7	10	18,4	0,8	1.0
	Déchets verts	Leclerc et al, 2008	59,0	46,0	1,5	7,0	15.3	0,6	1,4
		ADEME, 2001	50,0	45,0	0,8	X	15,0	0,4	0,7
Digestats	Bruts	ADEME, 2011	x	x	6,5	75,0	9,1	2,8	7,0
	Liquides	ADEME, 2011	x	x	5,2	45,0	7,9	2,0	4,8
	Solides	ADEME, 2011	x	x	2,1	10,0	26,0	1,6	1,5

- *Via* un effet indirect : la minéralisation de la MO du sol contribue pour une grande part à la fourniture en N pour les cultures. En augmentant les stocks de MO dans les sols, les PRO amendants contribueront donc indirectement à la nutrition azotée des cultures.

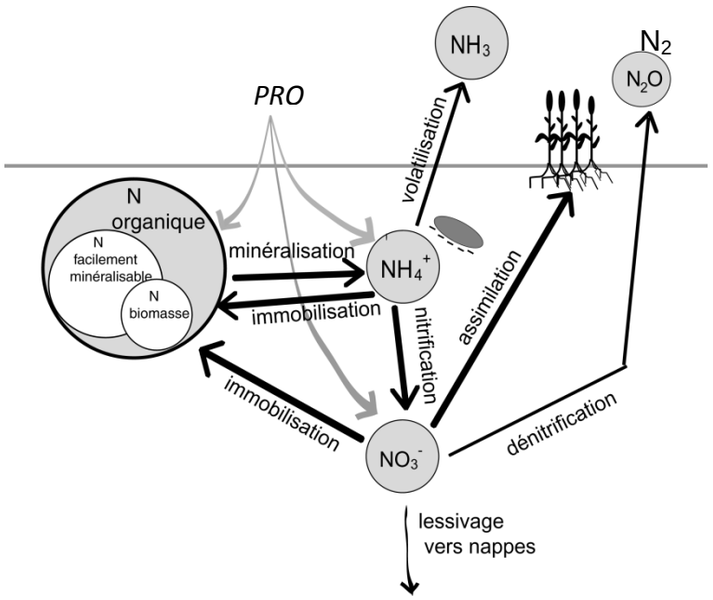


Figure 1.2 : Schéma simplifié du cycle de l'azote lié à un apport de PRO (Thèse Francou, 2003)

La vitesse de minéralisation du N va conditionner la valeur fertilisante azotée. Mais il faut aussi que la dynamique de minéralisation des formes organiques azotées du PRO coïncide avec les besoins des cultures. En effet, si la minéralisation des formes organiques et la production de formes nitriques ne coïncident pas avec les besoins des cultures et ont lieu à un moment où le bilan hydrique de la culture est favorable à des flux d'eau vers les nappes profondes, les nitrates formés risquent d'être lixiviés vers les eaux souterraines ce qui diminuerait la valeur fertilisante des PRO et contribuerait aux impacts environnementaux associés à cette pratique.

Par ailleurs, si une grande part de l'azote des PRO est sous forme ammoniacale, la volatilisation de ces formes ammoniacales diminue d'autant la valeur fertilisante des PRO.
En effet et à titre d'exemple, Génermont et Cellier (1997) enregistrent une perte de 54% en azote ammoniacal d'un lisier de porc épandu au cours d'un essai effectué en Bretagne.
Des mesures similaires ont été enregistrées par Loubet et al (2010) après épandage de lisier de porc à Grignon (Ile de France) où les pertes étaient d'environ 46% de la quantité d'ammonium initialement épandue.
Génermont et Cellier (1997) montrent également que le pH du sol, la vitesse du vent, la température de l'air et la teneur en eau du sol ont une influence importante sur la volatilisation ammoniacale.

Enfin, si les conditions physico-chimiques sont favorables (*via* un engorgement même partiel du sol), la dénitrification conduit à des émissions de N_2O qui, même si elles diminuent très peu la valeur fertilisante azotée des PRO, pourraient annuler les bénéfices environnementaux de cette pratique de recyclage des PRO.

En conclusion, la substitution des engrais azotés par l'azote des PRO n'aura un bilan environnemental favorable que si la pratique ne s'accompagne pas de lixiviation accrue de nitrates, de volatilisation d'ammoniac ni d'émission de N_2O.

La valeur fertilisante azotée va dépendre d'abord de la **proportion de N sous forme minérale** (Tableau 1.5). Les fientes de volailles, les lisiers de porcs ainsi que les boues et les digestats sont ainsi les PRO qui présentent les teneurs en N minéral les plus intéressantes.

Il faut ensuite connaitre la **dynamique de minéralisation du N organique**. Cette dynamique de minéralisation peut être mesurée directement au champ après épandage et suivi de la production de N minéral en absence de culture (Parnaudeau et al., 2009). Cependant, ces expérimentations sont très lourdes à mettre en œuvre. Très souvent, la dynamique de minéralisation du N organique des PRO est donc évaluée en conditions contrôlées de laboratoire au cours d'incubations en mélange dans un sol. Ces expérimentations s'éloignent des conditions réelles d'utilisation mais offrent une plus grande facilité de réalisation (Beloso et al., 1993; Chéneby et al., 1994; Hadas & Portnoy, 1994; Sikora & Yakovchenko, 1996; Iakimenko et al., 1996). Un mode opératoire a ainsi été standardisé par l'AFNOR en France (XPU44-163, AFNOR 2009).
Ces proportions de N minéral au sein du N total ainsi que la dynamique de minéralisation du N organique des PRO vont dépendre de l'origine et du type de PRO. Nous verrons que les **modes de traitement** des PRO conditionnent également la valeur fertilisante des PRO.
Comme mentionné précédemment, la valeur fertilisante azotée des PRO dépend de la disponibilité de leur azote. Il faut également que la dynamique de minéralisation de l'azote des PRO coïncide avec la présence des cultures sur la parcelle amendée. Il est important également de comparer cette disponibilité et utilisation de l'azote des PRO à la dynamique de valorisation des engrais minéraux.

Les **expérimentations en présence de plantes au champ** permettent d'apprécier ces effets des apports de PRO sur la biodisponibilité de l'azote et sur la croissance des plantes en conditions similaires aux pratiques agricoles (Kanal et Kuldkepp, 1993; Sanchez et al., 1997; Gagnon et al., 1997; Abad Berjon et al., 1997; Mamo et al., 1999; Eriksen et al., 1999; Houot et al., 2003). Des coefficients tels que le coefficient apparent d'utilisation (CAU) et le coefficient d'équivalence engrais (Keq) sont définis.
Le CAU est défini comme étant la fraction de l'azote des PRO absorbée par les cultures. Le Keq caractérise l'utilisation du N des PRO par les cultures et le réfère à l'utilisation du N d'un engrais minéral par la même culture et dans les mêmes conditions expérimentales. Le Keq est calculé à partir des CAU du PRO et de l'engrais selon :

- CAU (PRO) = (N exporté par la culture du traitement amendé – N exporté par la culture traitement 0 PRO et 0 engrais)/ Apport total d'azote PRO
- CAU (engrais) = (N exporté par la culture du traitement fertilisé par l'engrais – N exporté par la culture témoins 0 engrais)/ Apport total d'azote engrais
- Keq = CAU(PRO)/ CAU (engrais minéral)

1.2.3.2. <u>Analyse détaillée de la valeur fertilisante azotée des PRO</u>

1.2.3.2.1. Teneurs en N minéral des PRO :

D'après le tableau 1.5 de synthèse, on constate que les lisiers de porcins, les fientes de volailles, les boues et les digestats sont les PRO ayant les teneurs en N minéral les plus importants. Ces quantités représentent un pourcentage supérieur, dans la majorité des cas, à 45% de l'azote total (Ntot). Ces quantités d'azote minéral sont facilement disponibles pour les cultures. Les fumiers de bovins, ovins, caprins, équins ainsi que les composts de déchets verts sont les PRO les moins pourvus en azote minéral et leur valeur fertilisante azotée dépendra de la vitesse de minéralisation de leur N organique (Norg) ; ils seront donc moins intéressants en vue d'une substitution à court terme des engrais azotés.

1.2.3.2.2. Dynamique de minéralisation du N organique

Les dynamiques de minéralisation de la fraction organique des PRO sont très variables (Figure 1.3) aussi bien pour les effluents d'élevage (Morvan et al., 2006) que pour les boues (Parnaudeau et al.,2004), les effluents agro-industriels (Parnaudeau et al., 2006) et les composts (Doublet et al., 2010).

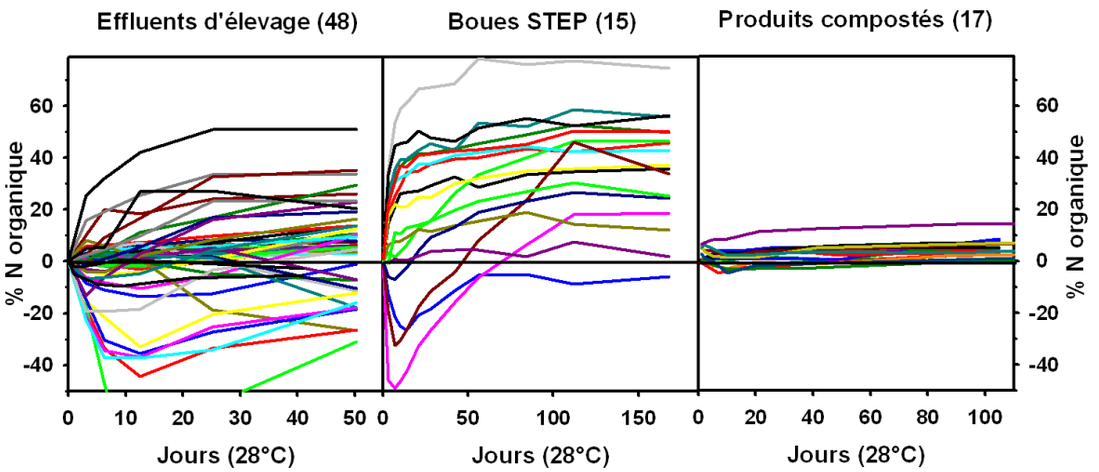


Figure 1.3 : Cinétiques de minéralisation du N organique de différents types de PRO.

Deux caractéristiques physico-chimiques analytiques vont conditionner les dynamiques de minéralisation du N organique des PRO : la biodégradabilité de leur MO et leur rapport C/N. En effet, les PRO ayant un C/N organique bas sont généralement facilement minéralisables et pourraient fournir des quantités plus ou moins importantes d'azote disponible. Les PRO ayant un C/N fort ont tendance généralement à immobiliser de l'azote. Ainsi, Morvan et al. (2006) montrent que la minéralisation du N organique d'effluents d'élevage est positivement corrélée avec leur teneur en N organique et négativement corrélé avec leur C/N. Gutser et al. (2005) trouvent des relations similaires pour un échantillon plus varié de PRO incluant boues, effluents d'élevage, composts, déchets industriels.

Les lisiers (porcins, bovins), mélanges liquides de déjections animales, sont communément connus pour leur haute valeur fertilisante azotée. Le C/N de ces PRO est généralement faible et dépassent rarement la valeur de 20. Les teneurs en azote total des lisiers sont comprises entre 3 et 5% de la matière sèche et la teneur en azote minéral varie entre 40 et 60% de l'azote total (Institut de l'élevage et al, 2001 ; Paschold et al, 2008 ; Fangueiro et al, 2012). La proportion de l'azote organique minéralisée durant la première année d'épandage varie entre 20 et 30%. Donc, 70 à 80% de l'azote total est facilement disponible pour les cultures dès la première année d'apport (Institut de l'élevage et al, 2001 ; Paschold et al, 2008 ; Fangueiro et al, 2012).

Les fientes de volailles (sèches, humides, fumier de volailles) sont quant à elles plus pourvues en azote total. Le pourcentage de Ntot varie entre 1,5% et 7% et leur C/N est autour de 10. Les teneurs en azote minéral sont également très importantes et constituent environ 70% de la quantité en azote total. Durant la première année après l'épandage, environ 90% de l'azote total est disponible (70% Nmin initial et 67% du Norg est minéralisé) (Institut de l'élevage, 2001).

Les fumiers (bovins, ovins, caprins, équins, porcins, volailles) issus des élevages classiques sont généralement pailleux. Les C/N de ces PRO sont élevés et dépassent généralement 25. Les teneurs en Ntot sont faibles et varient entre 0,6 et 1,2% MS (Institut de l'élevage, 2001). Il y a très peu d'azote minéral dans les fumiers en général et ne

dépassent pas la proportion de 10% du Ntot (Institut de l'élevage, 2001). Les quantités d'azote minéralisées durant l'année de l'épandage sont également faibles. La proportion d'azote minéralisé dépasse rarement 20% du Norg surtout pour le cas des fumiers compostés (Institut de l'élevage, 2001).

Concernant les boues, plusieurs études ont également été menées sur la disponibilité de l'azote (Tableau 1.6) ainsi que les impacts agro-environnementaux de leurs apports. En fonction de leurs teneurs en matières sèches et des procédés de leur production, on peut distinguer plusieurs types de boues, tels que les boues digérées qui peuvent être liquides (3-5% MS), égouttées ou centrifugées (à 10%), pâteuses (10-30%), solides et sèches (30-90%). Il existe également un autre procédé de stabilisation des boues qui est le traitement chimique. Après stabilisation, les boues peuvent être co-compostées avec des déchets verts ou autres, séchées thermiquement ou chaulées. Une large gamme de PRO peut donc être produite à partir des boues d'épuration et donc, avoir des conséquences sur la composition initiale des produits et également sur la dynamique de l'azote. En effet, selon l'ADEME (Gavalda et al, 2005), les teneurs en Ntot des boues varient entre 3% et 9% de la matière sèche et les C/N varient généralement entre 5 et 12 (exception faite des boues compostées où le C/N peut être beaucoup plus élevé).

Tableau 1.6 : Disponibilité de l'azote des boues (ADEME, 1996)

Types de boues	Disponibilité N % Ntot
Boues aérobies liquide	25 à 60
Boues arérobies chaulées	25 à 60
Boues aérobies séchées thermiquement	-7 à 34
Co-Compost de boues	7

Comme pour les effluents d'élevage, Parnaudeau et al (2004) montrent une forte corrélation négative entre le potentiel de minéralisation de l'azote des boues et le C/N de leur fraction organique. Des méthodes d'extraction telle que l'hydrolyse acide permettent d'isoler des fractions du N total également bien corrélées au potentiel de minéralisation des boues.
Par ailleurs, le compostage des boues diminue leur valeur fertilisante azotée, ceci en raison d'une perte par voie gazeuse pendant le procédé de compostage et en raison de la stabilisation du N résiduel au sein de la matière organique lors du compostage (Doublet et al., 2009).

D'autres PRO d'origine urbaine existent également. La plupart sont des composts tels que les composts d'ordures ménagères résiduelles, les composts de biodéchets, les composts de déchets verts etc. Les C/N de ces PRO varient entre 14 et 25 (ADEME, 2001 ; Charonnat et al, 2001 ; Houot et al, 2002 ; INERIS, 2012). Les teneurs en Ntot sont également faibles et varient entre 0,4 et 1,8% selon les origines de ces composts, la durée et le procédé de compostage.
La minéralisation nette de composts de biodéchets incubés en conditions contrôlées varie entre -30 et 9% du Norg du compost appliqué, qui dépend du niveau de maturité des composts et leurs compositions (Hadas et Portnoy, 1997 ; Siebert et al, 1998 ; Gagnon et Simard, 1999). Cette minéralisation varie entre -15 et 14% du Norg dans les conditions au champ (Gagnon et al, 1997 ; Von Fragstein et Schmidt, 1999 ; Nevens et Reheul, 2003). Dans une synthèse bibliographique, Amlinger et al (2003) concluent que la disponibilité de l'azote lors de l'année après l'apport d'un compost de biodéchets ou de déchets verts est en général faible et représente moins de 15% du N total des composts, puis de 2 à 8% les années suivantes. Dans le cas des composts d'ordures ménagères, la fraction minéralisée lors de l'année après l'apport est inférieure à 12% (Mamo et al., 1999 ; Hargreaves et al., 2008). Cependant, Chalhoub et al. (2013) montrent des proportions de N utilisées par les plantes montant jusqu'à 21% pour ce type de compost.
Par ailleurs, les apports répétés de composts, en augmentant la matière organique du sol, augmentent la disponibilité de l'azote via la minéralisation de la matière organique du sol. Ainsi Chalhoub et al. (2013) montre que

des apports de composts équivalents à 200 kg/ha de N organique permettaient d'augmenter les teneurs en matière organique du sol de 14 à 30% et la fourniture en N par le sol de 15 à 35% après 10 ans d'application. Par ailleurs, Hartl et Erhart (2005) montrent que 3 à 7% du N apporté par des applications répétées de composts de biodéchets pendant 10 ans (6 épandages) sont valorisés par les cultures.

Enfin, il faut signaler le développement actuel de la production de digestats de méthanisation. Les digestats de méthanisation sont en général riches en azote. Au cours du procédé, une part du N organique est minéralisée sous forme de NH_4. Les digestats sont donc souvent concentrés en NH_4 qui représente une proportion importante du N total (variant entre 10 et 75% du Ntot). Celui-ci est essentiellement dans la phase liquide des digestats. Aussi, une grande part est perdue lors de la séparation de phase. En raison de cette richesse en NH_4, les digestats liquides seront préférentiellement apportés par injection directe dans le sol pour éviter les pertes par volatilisation de cet azote minéral (Moller & Muller, 2012). La séparation de phase permet de séparer une phase liquide dont la valeur fertilisante est similaire à celle d'un engrais et une phase solide moins riche en N mais possédant tout de même une valeur fertilisante azotée intéressante. De plus ces digestats solides auront des valeurs amendantes également intéressantes car riches en MO stabilisé au cours de la digestion anaérobie.

A partir de ces résultats de caractérisation de valeur fertilisante azotée, en particulier à partir des résultats de cinétiques de minéralisation du N organique, différentes typologies des PRO ont été élaborées :

- Typologie d'effluents d'élevage (Morvan et al., 2006) : 6 classes sont définies reliant les dynamiques de minéralisation du C et du N après apport au sol. Ces classes regroupent ou différencient des PRO apparemment de même type. Ainsi la classification différencie 4 classes de composts.
- Typologie générale de PRO incluant effluents d'élevage et PRO d'origine urbaine à dominante d'amendements organiques (Lashermes et al., 2010). Là encore, les 6 classes sont définies sur la base de comportements et caractéristiques biochimiques similaires. Les classes définissent des disponibilités croissantes d'azote et les clés de détermination pour attribuer un PRO à une classe donnée.
- Typologie synthétisant cinétique de minéralisation au champ et incubations au laboratoire définissant 4 classes de PRO toujours en fonction de leur disponibilité en azote (Butler., 2012). La première classe est constituée par des PRO (Boue de papeterie, composts de déchets verts jeunes et ligneux etc) qui réorganisent de l'azote et qui peuvent provoquer des faims d'azote aux cultures en place, lors de la première année de leur épandage aux champs. Les teneurs initiales en azote ammoniacal de ces différents PRO sont faibles à nulles.

La seconde classe est définie par des PRO très stables et qui minéralisent très peu d'azote tels que les composts de déchets verts matures, fumiers de chevaux pailleux, composts de fumiers bovins matures etc. Ces produits minéralisent moins de 1 kg N/t ou m^3 durant 100 jours normalisés à 15°C. Ces PRO ont généralement des teneurs en azote minéral initiales faibles.

La troisième classe est constituée par des PRO qui minéralisent des quantités d'azote faibles à moyennes (composts urbains, fumiers de bovins jeunes, fumiers d'ovins et de caprins, boues chaulées ou co-compostées etc). Ces produits libèrent entre 1 et 3 kg N/t ou m^3 représentant 10 à 20% du Norg qui est minéralisé au bout de 100 jours normalisés. Ces PRO sont moyennement pourvus en azote minéral initial et ces teneurs ne dépassent pas 30% de l'azote total.

La dernière classe est constituée par des PRO qui minéralisent de 30 à 80% de leur Norg intial durant l'année de l'épandage dont au moins 50% de la quantité minéralisé est disponible dans les 50 premiers jours normalisés après leur épandage. Les quantités d'azote minéral initiales sont importantes et dépassent 30% du Ntot. Les quantités disponibles sont supérieures à 4 kg N/t ou m^3. Ces PRO sont les fientes de volailles compostées et non compostées, les boues séchées, les farines animales, les lisiers de bovins et de porcins, les digestats de méthanisation liquide etc.

1.2.3.3. Effet du traitement des PRO sur leur valeur fertilisante azotée

Les PRO peuvent être valorisés directement sur les sols en fonction de leurs caractéristiques physico-chimiques. Mais souvent ils subissent un traitement avant d'être épandus. Ces traitements peuvent viser à :

- Hygiéniser et stabiliser la MO des PRO. C'est le cas du compostage par exemple (Leclerc, 2001).
- Augmenter la matière sèche des PRO et faciliter leur transport : c'est le cas du séchage des boues, de la séparation de phase des digestats…
- Fournir des PRO dont il sera plus facile de maitriser les impacts environnementaux : c'est le cas par exemple des post-traitements de lisier.

Ces traitements ont des conséquences sur les caractéristiques physico-chimiques et biochimiques des PRO qu'il est important de prendre en compte dans la prévision de leur valeur fertilisante et amendante.

Ainsi, la digestion anaérobie de déchets organiques (effluents d'élevage ou autres) augmente la fraction d'azote sous forme minérale donc facilement disponible (Moller & Muller, 2012). En revanche, la séparation de phase post-digestion ou des lisiers, sépare une phase liquide qui contient la majeure partie du N minéral d'une phase solide plus riche en N organique *a priori* moins disponible (ADEME, 2011).

- Le compostage tend à diminuer la quantité d'azote disponible dans les déchets compostés : perte de N minéral au cours du compostage, stabilisation du N sous forme organique plus lentement minéralisable (Doublet et al., 2009).
- Le chaulage des boues diminue leur teneur en N via la dilution par l'apport de chaux (Ademe, 2001). Le chaulage diminue aussi la teneur en NH_4 qui se volatilise suite à l'augmentation du pH mais le N organique résiduel reste aussi facilement minéralisable que dans une boue non chaulée.
- Le séchage des boues selon différents procédés par déshydrations par filtre ou centrifugation s'accompagne d'une diminution des teneurs en N minéral ammoniacal de la boue (perte dans la phase soluble). Le séchage thermique augmente encore la perte d'azote total de la boue (dégradation et volatilisation pendant le séchage). Le séchage thermique influence aussi la disponibilité du N organique résiduel avec des résultats pouvant être contradictoires : moins biodisponible pour les végétaux (Tarrason et al., 2008) ; ou au contraire, plus biodisponible (Silva-Leal et al., 2013).

1.2.3.4. Synthèse sur la disponibilité du N au cours de l'année après l'apport

En synthèse, les proportions de N disponible lors de l'année après l'apport de ces différents types de PRO sont synthétisées dans le tableau 1.7.

Les PRO les plus intéressants pour leur valeur fertilisante azotée immédiate sont : Les boues, à l'exception des boues compostées, les lisiers de porcs, les fientes de volailles et les digestats.

Tableau 1.7 : Récapitulatif de la disponibilité de l'azote des différentes familles de PRO

Famille PRO	Origine PRO	Références	N disponible à court terme (N minéral frais + N minéralisé) % du Ntotal
Fumiers	Bovin	Institut de l'élevage, 2001	40,0
	Cheval	FIVAL, 2009	20,0 à 40,0
	Ovin	Institut de l'élevage, 2001	20,0
	Caprin	Institut de l'élevage, 2001	20,0
	Porcin	Institut de l'élevage, 2001	40,0
	Volailles	Institut de l'élevage, 2001	90,0
Lisiers	Bovin	Institut de l'élevage, 2001	70,0
	Porcin	Institut de l'élevage, 2001	80,0
Fientes	Volailles humides	Institut de l'élevage, 2001	90,0
	Volailles séchées	Institut de l'élevage, 2001	90,0
Boues	Digérées liquide	ADEME, 1996	45,0
	Digérées deshydratées chaulées	ADEME, 1996	40,0
	Digérées deshydratées séchées thermiquement	ADEME, 1996	35,0
Composts	Boues	ADEME, 1996	8,0
		ADEME, 2000	<20
		Leclerc et al, 2008	26,0
	Biodéchets	Leclerc et al, 2008	8.0
		COMIFER, 2013	10,0
	Ordures ménagères résiduelles	COMIFER, 2013 Butler, 2012	10 à 20
	Déchets verts	Leclerc et al, 2008	9.0
Digestats	Bruts	COMIFER, 2013	>80*
	Liquides	COMIFER, 2013	>45*
	Solides	COMIFER, 2013	>11*

*Correspond à la teneur en minéral du Ntot, les quantités d'azote disponible de ces PRO sont supérieure ou égales à la quantité de N minéral.

1.2.3.5. Utilisation par les plantes du N des PRO

En fonction de leurs caractéristiques, la réglementation impose des périodes possibles d'apport de ces PRO (cf tableau 1.2).

On a vu précédemment la disponibilité potentielle de l'azote des PRO pour les plantes. En fonction de la durée de présence des cultures sur une parcelle, les plantes valoriseront plus ou moins bien l'azote minéralisé issu des apports de PRO. Par ailleurs, pour mieux piloter la fertilisation avec des PRO, il est nécessaire de connaitre cette disponibilité en référence à des engrais minéraux classiques.

Gutser et al. (2005) synthétisent ces « équivalents engrais » pouvant aller de 0% pour certains composts à 100% en cas d'application d'urine. En cas d'apports répétés, si on additionne les effets à court terme et les arrières effets de minéralisation au cours des années suivantes et via l'augmentation des teneurs en MO des sols, ces « équivalents engrais » se nivellent autour de 40-70%. (Gutser et al., 2005).
Le COMIFER définit également des coefficients « équivalent engrais » pour différents types de PRO, différentes cultures et différentes périodes d'apport (COMIFER, 2013).

Les principaux sont résumés dans le tableau 1.8 mais pour plus de détails on se réfèrera à la brochure du COMIFER (2013).

Tableau 1.8 : Synthèse des Keq des différents types de PRO (d'après COMIFER, 2013)

Famille PRO	Origine PRO	Référence	Keq (sur Maïs , apport en printemps)	Keq (sur Blé, apport en automne)
Fumiers	Bovin	COMIFER, 2013	0,1	0,1
	Cheval	COMIFER, 2013	0,2	0,1
	Ovin	COMIFER, 2013	0,2	0,1
	Caprin	COMIFER, 2013	0,2	0,1
	Porcin	COMIFER, 2013	0,5	0,1
	Volailles	COMIFER, 2013	0,5	0,1
Lisiers	Bovin	COMIFER, 2013	0,5	0,1
	Porcin	COMIFER, 2013	0,7	0,05
Fientes	Volailles humides	COMIFER, 2013	0,6	0,1
	Volailles séchées	COMIFER, 2013	0,6	0,1
Boues de STEP	Digérées liquide	COMIFER, 2013	0,5	X
	Digérées deshydratées chaulées	COMIFER, 2013	0,3	X
	deshydratées séchées thermiquement	COMIFER, 2013	0,2	X
Composts	Boues	COMIFER, 2013	0,2	X
	Biodéchets	COMIFER, 2013	0,1	0,05
	Ordures ménagères résiduelles	COMIFER, 2013	0,1	0,05
	Déchets verts	COMIFER, 2013	0,1	0,05
Digestats	Brutes	COMIFER, 2013	0,5 à 0,9	0,65
	Liquide	COMIFER, 2013	0,7	X
	Solide	COMIFER, 2013	0,3	X

Pour les autres éléments fertilisants, on admet généralement que la potasse est entièrement et aussi disponible que dans les engrais potassiques. Pour le phosphore, Morel et al (2003) montrent que le coefficient équivalent engrais des PRO varie de 54% (compost de biodéchets) à 92% (boues d'épuration). Le détail des résultats est reporté dans le tableau 1.9.

Tableau 1.9 : Valeur fertilisante à court terme du phosphore des différents PRO (Guivarch, 2001)

Type de PRO	Valeur fertilisante phosphatée
Boues biologiques traitées aux sels de fer ou aux sels de fer+ chaux ; Boues de déphosphatation biologique puis chaulées ou traitées aux sels de fer et chaux	92±16
Boues physico-chimiques traités (chaulage et/ou sels de fer)	88±5
Boues digérées avec ou sans traitement supplémentaire (chaule, séchage thermique)	71±20
Boues co-compostées	73±18
Ordures ménagères résiduelles sans compostage	84
Compost d'ordures ménagères résiduelles et composts de déchets verts	54
Fumiers de bovins	76±8
Fientes de volailles	87±15

1.3. VALEUR AMENDANTE DES PRO :

1.3.1. Définition de la valeur amendante et méthode d'évaluation :

La valeur amendante est l'aptitude d'un PRO à entretenir et augmenter la teneur en matière organique du sol. Cette valeur est mesurée au champ (essai de longue durée : comparaison entre les teneurs en matières organiques d'un sol amendé et un sol témoin). Des indicateurs de laboratoire sont développés pour la prédire sans avoir à mettre en place des essais de longue durée. Le suivi de la minéralisation potentielle du Carbone (C) des PRO au cours d'incubations permet d'évaluer le C restant potentiellement dans le sol pour entretenir les stocks de MO du sol. En faisant le lien entre caractéristiques biochimiques des PRO issues du fractionnement chimique de type Van Soest et Wine (1967) et le C résiduel restant à la fin des incubations précédentes, l'indice de stabilité de la matière organique des PRO a été défini (Lashermes et al., 2009). Le calcul de l'indice ISMO a été normalisé (XPU 44-162, AFNOR, 2009). Cet indice est un indicateur du potentiel humique des PRO et permet de paramétrer des modèles simulant l'évolution des teneurs en C des sols après apports répétés de PRO (Peltre et al., 2012).

1.3.2. Valeur amendante des PRO :

Les PRO à valeur amendante importante sont des amendements organiques. Ils contribuent à l'augmentation des stocks de MO dans les sols. A partir des valeurs d'ISMO (Figure 1.4), les composts, les fumiers et les digestats sont potentiellement des PRO intéressants pour augmenter les stocks de C dans les sols (ISMO élevés). Ces PRO sont effectivement des amendements organiques.

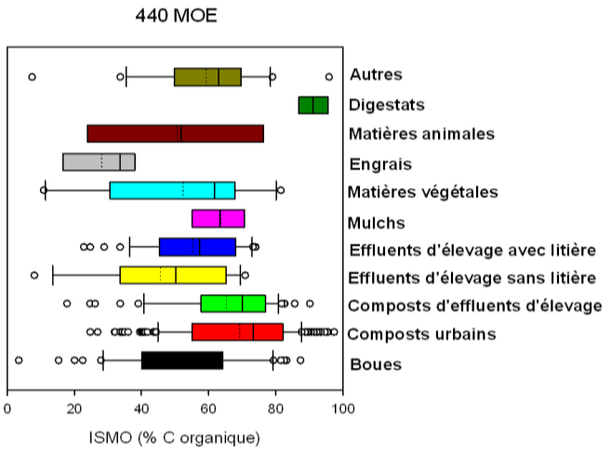


Figure 1.4 : Exemples de valeurs d'ISMO de différents types de PRO

Dans les essais au champ, les apports de fumiers permettent généralement d'augmenter les teneurs en MO des sols (Edmeades, 2003). De même, les composts sont aussi efficaces à augmenter les teneurs en MO des sols (Ross et al., 2006 ; Hartl and Erhart, 2005). Cependant, relativement peu de données sont publiées sur les évolutions des stocks de C (Muller & Hoper, 2004).
Les rendements d'accumulation du C après des apports répétés de PRO peuvent ainsi être calculés selon :

$Rdt = \Delta C_i / C_{cum}$,

où ΔC_i est la quantité de C accumulée après un nombre d'années données (différence de stock par rapport à un traitement témoin sans apport) et C_{cum} est la quantité totale de C apportée par les MOEs (Matières Organiques Exogènes) pendant le nombre d'années considérées. Ces rendements sont dépendants de la durée de l'essai, en effet le taux d'accumulation du C après des apports de MOEs tend à décroitre avec le temps (ΔCi/ nombre d'années) (Thomsen & Christensen, 2010). Ils sont également influencés par les conditions climatiques et la nature du sol de l'essai.

Tableau 1.10 **:** Synthèse des rendements d'accumulation du C du sol générés par des apports de matières organiques exogènes (d'après Muller et al., 2004)

	Nombres de PRO	Moyenne (± ecart type)	Fourchette	Références
Boues d'épuration	**20**	0.30 ± 0.15	0.09-0.70	(Stark & Clapp, 1980; Robertson et al., 1982; Mbagwu & Piccolo, 1990; McGrath et al., 2000; Gerzabek et al., 2001; Bergkvist et al., 2003)
Boues de papeterie	3	0.17 ± 0.01	0.08-0.28	(Chantigny *et al.*, 1999)
Compost d'ordures ménagères et biodéchets	7	0.37 ± 0.13	0.15-0.58	(Giusquiani *et al.*, 1995; Leita *et al.*, 1999)
Composts de boues	4	0.37 ± 0.05	0.32-0.42	(Tester, 1990; McGrath et al., 2000)
Fumiers	21	0.25 ± 0.09	0.16-0.39	(Delas & Molot, 1983; Ndayegamiye & Cote, 1989; Persson & Kirchmann, 1994; Gerzabek et al., 1997; Aoyama et al., 1999; Paré et al., 1999; McGrath et al., 2000; Manjaiah & Dhyan, 2001; Dorado et al., 2003; Hao et al., 2003)
Lisiers	4	0.20 ± 0.15	0.02-0.40	(Ndayegamiye & Cote, 1989; Min *et al.*, 2003)

Les rendements sont supérieurs pour les composts et relativement faibles pour les lisiers et les boues de papeteries (Tableau 1.10). Le recours à la modélisation est nécessaire pour une meilleure comparaison de l'efficacité des PRO à augmenter les stocks de C pour différents sites et différentes durées d'apport.

En utilisant le modèle Roth C, Peltre et al. (2013) simulent les dynamiques d'augmentations des stocks de C dans les sols de différents essais de longue durée et confirment l'efficacité supérieure des composts bien stabilisés par rapport à des fumiers pour augmenter la MO des sols. Les rendements d'accumulation du C varient de 0.15 à 0.50tC accumulé/tC apporté, les valeurs les plus basses étant observées pour des engrais verts et les plus hautes pour des composts très stabilisés. Les rendements d'accumulation en C sont très variables avec des valeurs ne dépassant pas 0.08tC pour des fumiers apportés à la dose de 7.5 t MS par an. Dans un autre essai sous maïs continu irrigué, 40 ans d'apports de fumier à hauteur de 4tMS par an permettent de maintenir les stocks de C du sol alors que des apports de lisiers liquides provoquent la chute des teneurs en MO du sol (Nardi et al., 2004).
A la suite d'épandages de fumiers de bovins à hauteur de 5 à 10 t MF/ha/an durant 36 ans sur une monoculture de riz, 10.7% du carbone et de l'azote apportés ont été accumulés (Mandal et al, 2007).

1.3.3. Conséquence d'épandages répétés des PRO amendants sur la disponibilité de l'azote

Les augmentations des teneurs en matière organique, donc en azote organique des sols, entrainent également une augmentation de la disponibilité de l'azote pour les cultures, issue de l'augmentation des teneurs en azote organique stable dans le sol (Schlegel, 1992; Mamo et al, 1999; Amlinger et al, 2003; Gabrielle et al, 2005 ; Hartl et al, 2005 ; Mallory et Griffin, 2007; Diacono et Montemurro, 2009).

Généralement, les composts et les fumiers ne peuvent pas apporter des quantités importantes en azote disponible lors de l'année d'épandage (Hartl et al, 2003 ; Eghball et al, 2004). Par contre, la minéralisation de la matière organique stable provenant de ces PRO, après des épandages répétés, peut être importante. L'effet devient visible à partir de 4-5 ans d'épandages répétés, permettant alors une substitution des engrais et un maintien des niveaux de rendements (Eghball et al, 2002 ; Barbarick et Ippolito, 2007). Mallory et Griffin (2007) montrent que les quantités d'azote minéralisé provenant d'un sol amendé avec des fumiers de bovins étaient entre 67 et 79% plus importantes que dans un sol non amendé historiquement, grâce à l'accumulation de matières organiques stables dans le sol. De même, Nevens et Reheul (2003) montrent que dans une monoculture de maïs ensilage avec apports répétés de compost de déchets verts pendant 4 ans, environ 6.9% de la quantité d'azote organique épandue provenant du compost sont potentiellement absorbables par les cultures. Chalhoub et al. (2013), précédemment cités, montrent que des apports répétés de composts et fumiers à hauteur de 4 t C/ha tous les 2 ans pendant 10 ans augmentent la disponibilité de l'azote dans les sols de 50 à 70 kg N par an qui correspond à la minéralisation de 6 à 8% de l'augmentation de N organique dans les sols. Gutser et al. (2005) distinguent également les PRO qui contribuent essentiellement à la valeur fertilisante immédiate, de ceux dont la valeur fertilisante passe par l'augmentation de la MO dans le sol (compost, fumier).

1.4. IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX POTENTIELS LIES A LA DYNAMIQUE DU N APRES APPORT DE PRO

Les PRO peuvent cependant engendrer également des problèmes environnementaux importants. Un des problèmes majeurs est la lixiviation des nitrates, qui risquent de polluer les eaux souterraines, et la volatilisation du NH_3 et de N_2O, qui ont un impact sur la valeur fertilisante azotée des PRO et sur l'environnement (gaz à effet de serre). Il existe également des risques liés à la présence de contaminants minéraux, organiques ou biologiques dans les PRO.

1.4.1. Les risques de lixiviation de l'azote des PRO

Dans le raisonnement de l'insertion des PRO dans la fertilisation azotée des cultures, il est important de connaitre la dynamique de minéralisation de l'azote afin que qu'elle coïncide avec les besoins des cultures fertilisées (Singh et al., 2003). La méconnaissance de cette dynamique de minéralisation peut avoir pour conséquences des quantités insuffisantes de N disponible pour les cultures ou, à l'inverse, trop de N minéral dans le sol par rapport aux besoins des cultures, ce qui peut se traduire ensuite par des risques de lixiviation de l'azote et la contamination des eaux profondes par les nitrates. Plusieurs travaux ont mis en évidence ce risque majeur. Ces pertes sont conditionnées par les pratiques de fertilisation, les conditions climatiques, les cultures en place, les pratiques agricoles et le type de sol.

Les PRO caractérisés par une disponibilité potentielle importante de leur azote (forte teneur en N minéral, minéralisation rapide du N organique) seront épandus préférentiellement au printemps ou si l'épandage se fait à l'automne, il faudra assurer un couvert végétal immédiatement après l'apport pour prélever le N minéral disponible (Parnaudeau et al., 2009). Cependant il est plus facile d'ajuster les apports de PRO aux besoins des plantes quand la disponibilité du N est importante, limitant ainsi les risques de sur-fertilisation et perte par lixiviation de nitrates.

En cas d'apport répétés de composts, les flux de minéralisation de N augmentent les flux de nitrates lixiviés (Mamo et al., 1999), le risque de perte étant diminué quand le C/N des composts augmente. En revanche, Hartl et Erhart (2005) signalent que des apports répétés de composts de biodéchets, en doses raisonnées par rapport aux besoins des plantes, n'augmentent pas le risque de lixiviation en comparaison à des engrais minéraux. Pour limiter ces risques de lixiviation de nitrates, il sera important de tenir compte dans le calcul de la fertilisation azotée de l'augmentation de fourniture en N par le sol suite aux augmentations de MO (Hartl et Erhart, 2005). De même, Chalhoub et al. (2013) montrent que les applications répétées d'un compost bien stabilisé augmentent la disponibilité en N pour les plantes mais aussi les risques de lixiviation pendant la période hivernale après apport, nécessitant donc l'implantation d'une culture intermédiaire.

Des résultats similaires ont été observés par Goulding et al (2000) sur l'essai de longue durée de Rothamsted. En effet, l'application de fumiers de bovins depuis 150 ans augmente les quantités d'azote lixiviées quand l'épandage est fait en automne. Les quantités lixiviées varient entre 12 et 140 kg N/ha en fonction des conditions climatiques. Ces quantités, qui peuvent être très importantes, sont largement supérieures à celles d'un témoin fertilisé.

Kleber et al (2000) ont aussi démontré que l'épandage de boues de stations d'épuration en automne peut contaminer les nappes souterraines.

Après épandage de fientes de volailles en période automnale, Machado et al (2010) ont montré que les quantités d'azote lixiviées peuvent être importantes mais l'apport simultané de balle de riz à fort C/N permet non seulement de limiter les pertes de N, mais augmente aussi la valorisation du N par les cultures.

1.4.2. Les risques d'émission gazeuse de l'azote des PRO

En seconde position en termes de pertes de valeur fertilisante azotée, après la lixiviation des nitrates, vient la volatilisation ammoniacale.

Les pertes par volatilisation sous forme d'ammoniac sont très fréquentes lors de l'épandage de PRO et réduisent considérablement la valeur fertilisante d'une matière organique exogène.

Plusieurs synthèses ont été réalisées donnant des références de proportions de NH_3 volatilisé après apport (tableau 1.11). Les risques de volatilisation de NH_3 sont plus importants quand le pH est élevé (effluent/déchet basique, sol calcaire). Un enfouissement immédiat, soit *via* le mode d'apport (pendillard par exemple pour les effluents liquides) soit immédiatement après l'apport, diminue les pertes par volatilisation.

Tableau 1.11 : Synthèse des volatilisations de NH_3 des différents types de PRO (ADEME, 2005)

Famille PRO	Origine PRO	volatilisation NH_3 (g NH_3 émis/kg Ndes PRO)
Fumiers	Bovin	30 à 490
Lisiers	Bovin	1,4 à25,3
	Porcin	0,8 à 14,8
Boues de STEP	Digérées déshydratées chaulées	160 à 175
	Digérées déshydratées séchées thermiquement	83 à 166
Composts	Boues	20
	Biodéchets	8
	Ordures ménagères résiduelles	7
	Déchets verts	20

Les émissions de N_2O, gaz à effet de serre, sont impliquées dans le réchauffement climatique. Les émissions de N_2O sont fonction des conditions anaérobies du sol (saturation en eau du sol). Les apports au sol de substrats organiques peuvent stimuler l'activité des microorganismes dénitrifiants. Les émissions de N_2O représentent de faibles proportions du N total apporté par les PRO, mais ces émissions participent aux impacts environnementaux de la pratique. Les quantités émises varient, selon une étude de l'ADEME (2005), entre 0 et 10 g N_2O/kg de N des PRO épandus. Les facteurs d'émission peuvent représenter 1% du N apporté par des digestats (Cayuela et al., 2010), et sont signalés comme similaires à ceux observés en cas de fertilisation minérale classique, en cas d'apport de boue (Ambus et al., 2001). Pour des niveaux de fertilisation similaires en N minéral ou organique (300 kg N/ha an), Meng et al. (2005) montrent que les flux de N_2O sont multipliés par 6 (856 g N_2O/ha an contre 150 g N_2O/ha an) après apport de résidus organiques à base de déchets agro-industriels et de pailles. Laville et al. (2013) trouvent des facteurs d'émission variant entre 0.5 et 6% du N apporté pour des boues, composts et fumiers de cheval, ces facteurs d'émission étant en général plus faibles que pour l'engrais minéral. Alluvione et al. (2010) confirment que la fertilisation d'un maïs avec des composts diminue les émissions de N_2O par rapport à une fertilisation avec de l'urée (0.11% versus 3.4% pour l'urée).

1.4.3. Les risques de contamination des sols voire des plantes par des polluants contenus dans les PRO

Les pertes par volatilisation et lixiviation de l'azote ne constituent pas le seul problème à affronter lors de l'utilisation des PRO. En effet, la contamination des sols par les éléments traces métalliques (ETM), les polluants organiques et les pathogènes peuvent constituer des dangers pour les êtres humains et sur l'environnement.

Les teneurs en ETM dans les PRO sont souvent supérieures aux teneurs en ETM dans les sols, ce qui implique une contamination qui peut être importante en cas d'apports fréquents de PRO (Zhang et al, 2006). Ainsi, après 10 ans d'épandage de composts d'ordures ménagères, les teneurs en Cu, Zn, Pb et Cd ont significativement augmenté dans les sols selon une étude effectuée par Businelli et al (2009).
Ce risque existe aussi pour les effluents d'élevage. L'épandage consécutif d'un compost de fumier porcin durant 6 ans, a augmenté les teneurs en Cu de 102.8 à 127.4 mg/kg sol et les teneurs en Zn de 111.9 à 165.7 mg/kg sol (Zhao et al, 2006).
Lors d'une expérimentation effectuée sur 10 ans avec épandage de boues de STEP, Saviozzi et al (1999) ainsi que Kunito et al (2001) ont observé une accumulation importante de Zn, Cu et Cr dans l'horizon de surface, qui est due aux teneurs initiales importantes en ETM dans les produits épandus.

D'autres types de contaminations *via* des polluants organiques tels que les PCB, les HAP et les antibiotiques sont également possibles.

1.5. INTERET DE LA MODELISATION POUR APPREHENDER LE DEVENIR DU C ET N APPORTES PAR LES PRO:

On distinguera les modèles décrivant la dynamique de la matière organique dans le sol, de ceux décrivant les dynamiques conjointes du C et de N après apport de PRO au sol.

1.5.1. Simulation de l'augmentation de la matière organique dans les sols

Le premier modèle de l'évolution de la matière organique d'un sol est celui établi par Henin & Dupuis (1945). Ce modèle (Figure 1.5) ne considère qu'un seul compartiment de la matière organique du sol, et utilise le coefficient isohumique K_1, défini comme le taux de matière organique d'un PRO apporté au sol contribuant à alimenter le stock de matière organique du sol. L'évolution du taux de matière organique du sol est donnée par l'équation suivante :

$$\mathbf{dy = (K_1\omega - K_2 y)\, dt}$$

Avec - ω : apport de matière organique exogène ($T.ha^{-1}.an^{-1}$)
- y : le taux de matière organique du sol ($T.ha^{-1}$)
- K_1 : coefficient isohumique de la substance apportée, défini comme la proportion de la MO apportée alimentant le stock de MO du sol
- K_2 : constante de destruction de la matière humique du sol (an^{-1})
- Le temps t est exprimé en année

Le coefficient K_2 varie suivant le type de sol mais également suivant les conditions climatiques. Voisin de 0.02 dans les régions tempérés, il est de l'ordre de 0.03 sous climat méditerranéen (Henin & Dupuis, 1945; Le Villio *et al.,* 2001).

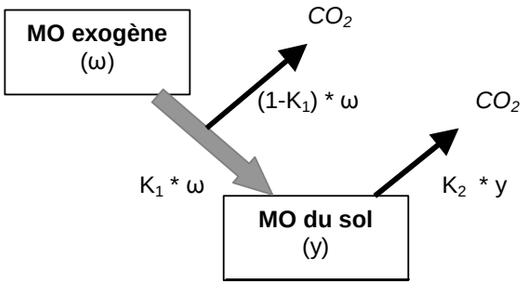


Figure 1.5: Description du modèle Henin & Dupuis, 1945

Le modèle AMG (Andriulo et al., 1999) dérive du précédent mais ajoute un compartiment de C organique stable, dont la taille ne change pas au cours du temps et ne participe pas à la dynamique du C organique dans les sols (Figure 1.6).

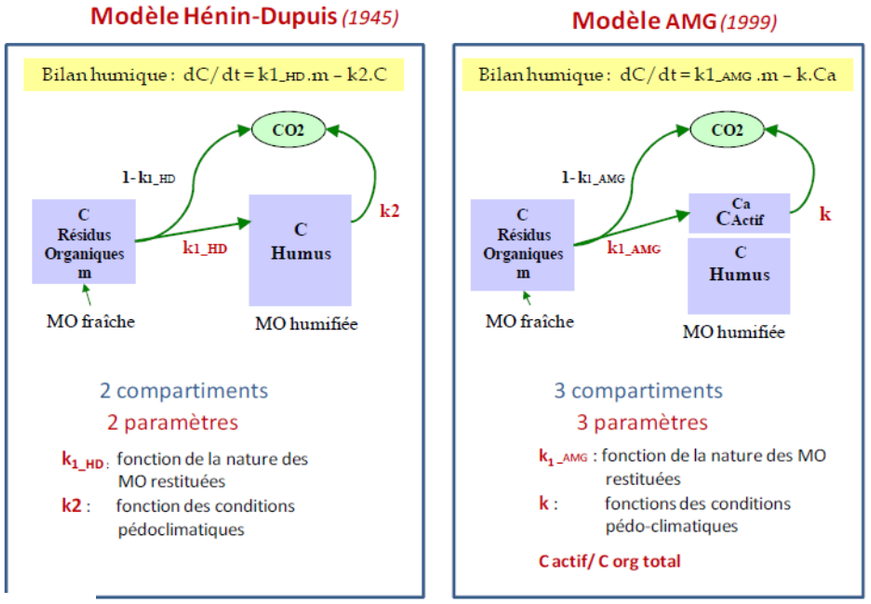


Figure 1.6 : **Structures générales des modèles Hénin-Dupuis et AMG**

Paramètres des deux modèles : k1_HD et k1_AMG : Coefficients isohumiques (rendement en carbone de l'humus, du carbone des MO fraîches) pour les modèles Hénin-Dupuis et AMG respectivement ; k2 et k et coefficient de minéralisation annuelle des modèles Hénin-Dupuis et AMG respectivement. Cactif / Corg total : coefficient de partition du Carbone des MO du sol pour AMG

Ce modèle est largement documenté pour décrire les effets des pratiques culturales sur la dynamique du C dans les sols. L'outil Simeos-AMG est ainsi proposé aux praticiens en charge de conseiller des pratiques ne diminuant pas les teneurs en C organique des sols.
L'indice ISMO semble être un bon indicateur du coefficient k_1 dans AMG (Jousseaume, 2012) permettant de simuler les évolutions de stocks de C organique dans les sols amendés avec des PRO.

Peltre et al. (2013) ont utilisé le modèle RothC largement utilisé dans le monde pour simuler également les augmentations de C dans des sols soumis à épandage répétés de PRO. Là encore, l'indice ISMO permet de prédire les paramètres de partitionnement du C des PRO entre les compartiments DPM, RPM et HUM du modèle. Le modèle ainsi paramétré simule bien les évolutions des stocks de C organique dans les sols.

1.5.2. Simulation des dynamiques conjointes du C et du N après apport de PRO.

Plusieurs modèles existent pour la prédiction de la dynamique du carbone et de l'azote des PRO, qui sont plus ou moins complexes.
Certains modèles ne décrivent que la dynamique de minéralisation du C et du N après apport de PRO à un sol. Ces modèles sont en général des modèles où la matière organique des PRO et du sol sont représentées sous la forme de plusieurs compartiments qu'on suppose homogènes au plan biochimique et dynamique. Dans ces modèles, la dynamique du C est d'abord décrite et celle du N suit celle du C, *via* le C/N des compartiments.

Plusieurs de ces modèles ont été utilisés pour décrire la dynamique de minéralisation de PRO dans un sol :
- NCSOIL (Beraud et al., 2005 ; Gabrielle et al., 2004; Hadas & Portnoy, 1997; Antil et al., 2011)
- CANTIS (Garnier et al., 2003; Chalhoub et al., 2013)
- STICS résidus (Nicolardot et al., 2001 ; Lashermes, 2005)

Ces modèles sont en fait des modules inclus dans des modèles de culture dans lesquels sont décrits : la croissance des plantes, la dynamique de la MO dans les sols, la dynamique de l'eau et de solutés en particulier les nitrates. Ces modèles sont très utiles pour décrire l'ensemble des transformations du C et du N après apport de PRO au sol et permettent d'approcher les flux de C et de N nécessaires au calcul du bilan environnemental de la pratique de recyclage des PRO en agriculture. Ces modèles de culture sont plus ou moins complexes et décrivent la dynamique de la matière organique ou de l'eau, la croissance des plantes, de manière plus ou moins précises et mécanistes et en prenant en compte les conditions climatiques. On citera quelques exemples de ces modèles :

- LIXIM : ce modèle couple le module STICS résidus de minéralisation d'une matière organique avec des flux hydriques. Il permet de calculer la lixivitation des nitrates associée à un apport (Parnaudeau et al., 2009)
- Ceres–EGC utilisé pour décrire la dynamique C et N après apport de composts au champ (Gabrielle et al., 2005).
- PASTIS (Garnier et al., 2003). Chalhoub et al. (2013) ont utilisé ce modèle pour distinguer les flux de N associés à un apport de compost de ceux liés aux apports précédents
- DAISY (Hansen et al., 1991). Gerke et al. (1999) ont utilisé ce modèle pour simuler et comparer des apports de composts dans différentes situations pédoclimatiques. Ce modèle a également été utilisé pour tester différents scenarios d'apports de PRO et leurs conséquences sur les flux de C et N (Bruun et al., 2006)
- STICS (Brisson et al., 2003). Ce modèle est largement utilisé en France. Il a été utilisé pour tester différents scenarios de périodes d'épandages de fertilisants et pour faire des recommandations en vue de minimiser la lixiviation des nitrates (Butler, 2012).

1.6. INSERTION DES PRO DANS LES SYSTEMES DE CULTURE

1.6.1. Les systèmes de culture

Les systèmes de culture sont définis par Sebillotte (1990) comme *«l'ensemble des modalités techniques mises en œuvre par un agriculteur sur des parcelles traitées de manière identique. Le système de culture se définit par (i) la nature des cultures et leur ordre de succession (ii) les itinéraires techniques appliqués à ces différentes cultures, ce qui inclut le choix des variétés pour les cultures retenues ».* Les systèmes de culture sont donc le reflet des décisions techniques des agriculteurs concernant, une fois décidées les cultures à faire figurer dans l'exploitation, les façons de les agencer dans le temps (les *successions de culture*) et de les conduire techniquement (les *itinéraires techniques*).

Selon les travaux de Sebillotte (1978), l'itinéraire technique se définit par *« la combinaison logique et ordonnée de techniques culturales appliquées à une culture pour contrôler le milieu en vue d'une production donnée ».* Ces couples successions de culture*itinéraires techniques sont attribués spatialement par les agriculteurs au sein de leur exploitation, avec, souvent, la nature du terrain (type de sol, pente, pierrosité etc.) jouant comme déterminant majeur de cette affectation.

La connaissance des systèmes de culture est indispensable pour pouvoir valoriser des PRO en agriculture. En effet, les successions de culture déterminent les *fréquences possibles d'apport de certains PRO*: c'est ainsi qu'en systèmes de grandes cultures, la « tête d'assolement », la première culture de la succession précédant le plus souvent une céréale noble comme le blé tendre, est la culture privilégiée avant laquelle les PRO ayant un rôle amendant sont épandus. En systèmes maraîchers, qui enchainent souvent plusieurs cultures à cycle court le long d'une saison culturale, les agriculteurs peuvent décider, ou non, d'apporter un PRO avant chaque cycle cultural. Les itinéraires techniques intègrent la conduite actuelle de la fertilisation des différentes cultures, c'est-à-dire le choix des fertilisants (engrais chimiques et/ou PRO), les doses appliquées, le ou les moments d'apport dans le cycle cultural, ainsi que les modalités de ces apports (en solide, en liquide, etc.) en lien avec le matériel utilisable. Ainsi, ils

déterminent le raisonnement des éventuelles substitutions des engrais chimiques par des PRO, par exemple, en dessinant le champ des possibles pour les quantités, périodes et modalités d'apports.

En termes d'utilisation de PRO, tout système de production agricole peut être représenté par un ensemble de stocks reliés par des flux de deux types (Guerrin, 2004) : flux « agissables » de PRO, qui n'ont lieu qu'en présence d'intervention humaine ; flux « biophysiques », qui ont lieu même en l'absence d'intervention humaine. Ces deux types de flux interagissent par l'intermédiaire des activités humaines : celles-ci génèrent les flux agissables qui détermineront les flux biophysiques conduisant, d'une part, aux produits agricoles, d'autre part, aux émissions vers l'environnement. La gestion du système de production peut être vue comme le contrôle, dans un environnement dynamique, d'un ensemble de stocks et de flux de PRO par les activités de l'exploitant. La modélisation des pratiques des agriculteurs est, par conséquent, indispensable si l'on veut évaluer par simulation les systèmes de production. C'est précisément le point manquant dans la quasi-totalité des modèles d'aide à la décision en agriculture existant à ce jour (Garcia et al, 2005).

Pour l'agronome, valoriser des PRO en agriculture signifie les introduire dans des systèmes de culture pour répondre à certaines demandes (nutrition des plantes, amélioration des propriétés physiques et chimiques des sols par exemple). En effet, on considère que ces PRO ont des propriétés favorables à tout ou partie de ces fonctions, et la question est alors de savoir à quelles conditions les PRO sont intégrables par les agriculteurs dans leurs systèmes de culture.
Par ailleurs, pour l'agriculteur et la société, des fonctions économiques sont aussi en jeu, car l'utilisation de PRO permet de réduire les achats d'engrais minéraux, de limiter l'exploitation des gisements de phosphates par exemple et de réduire la charge énergétique de transport des engrais minéraux. De plus, en lien avec les fonctions décrites précédemment, l'apport de PRO permet de préserver le capital sol agricole, voire d'améliorer son potentiel.

1.6.2. Insertion des PRO dans les systèmes de culture à l'échelle territoriale

Le concept de systèmes de culture s'utilise le plus souvent à l'échelle de l'exploitation agricole, pour appuyer la compréhension et l'évaluation de pratiques individuelles, mais sa définition intègre aussi des territoires plus vastes. Pour notre propos, c'est cette échelle territoriale qui est la plus intéressante. En effet, d'une part, un territoire composé d'un certain nombre d'exploitations agricoles présente une diversité, plus ou moins grande, de systèmes de culture, donc d'utilisations actuelles et potentielles de PRO. D'autre part, la disponibilité en PRO de différentes natures dépend fortement de la répartition des activités sur le territoire: la spécialisation croissante en grandes cultures des plateaux limoneux du nord de la France, dont la Plaine de Versailles sur laquelle nous travaillerons plus spécifiquement, se traduit par une diminution drastique des élevages, donc des effluents d'élevage utilisables comme PRO dans les exploitations du territoire ; à l'inverse, l'urbanisation croissante de ces mêmes zones crée un gisement croissant en PRO d'origine urbaine, éventuellement mobilisables dans certains systèmes de culture (boues de station d'épuration, compost de déchets verts , autres biodéchets etc.).

On se focalise ici sur les « puits » privilégiés de PRO que sont les systèmes de production agricole, en s'appuyant sur des expériences antérieures (Guerrin et Paillat, 2003 ; Aubry et al, 2008). La connaissance des modes de gestion actuels des PRO dans les exploitations agricoles, des règles sous-jacentes et des formes d'échanges, entre exploitations ou entre une structure de production de PRO et des exploitations utilisatrices, sont une base indispensable pour raisonner des gestions territoriales nouvelles ou optimisées de PRO. Cette connaissance permet de définir les conditions d'insertion de nouveaux PRO dans les systèmes existants, ainsi que les évolutions possibles de ces systèmes ou des échanges entre eux (Aubry et al, 2003 ; N'Diénor, 2006).

En terme de méthodologie, la réalisation (i) de typologies orientées par l'utilisation de PRO (Guerrin et Paillat, 2003), (ii) de modèles conceptuels des décisions techniques concernant la gestion des PRO (Aubry et al, 2006) ou la conduite des cultures (Aubry et al., 1998) et (iii) de modèles informatiques simulant la gestion des PRO (Guerrin, 2001, 2007) permettent d'évaluer les stratégies actuelles des agriculteurs ou groupes d'agriculteurs et d'en simuler de nouvelles sur des cas types représentatifs du territoire (Guerrin et Paillat, 2003; Vayssières & Lecomte, 2007).

Plusieurs études ont été effectuées sur la disponibilité de l'azote des PRO en utilisant des essais aux champs et des incubations en conditions contrôlées. Ces études ont montré qu'il est possible de substituer les engrais minéraux *via* l'épandage de ces matières organiques en gardant des rendements corrects. Mais, ces études n'ont pas été effectuées à l'échelle d'une exploitation agricole et les successions de culture sur lesquels les auteurs ont effectués les tests sont généralement caricaturaux. Enfin, l'insertion des PRO dans les systèmes de culture ne doit pas occulter le fait que ces apports de PRO peuventt provoquer également des contaminations *via* les pertes azotées vers les nappes souterraines et/ou les pollutions *via* les éléments traces métalliques et autres polluants organiques (antibiotiques, HAP, PCB etc).

Les chapitres suivant vont présenter les résultats obtenus au cours du travail de thèse. Pour chacune des parties, on commencera par présenter la méthodologie utilisée, puis les résultats. Les chapitres que nous allons présenter sont :

Chapitre 2. Présentation du territoire d'étude
Chapitre 3. Inventaire et caractérisation des PRO et des systèmes de culture sur le territoire
Chapitre 4. Paramétrage de STICS pour simuler à long terme la dynamique du C et du N après apports répétés de PRO : Bilan des flux en fonction du type de PRO
Chapitre 5. Scénarios de substitution des engrais azotés par des PRO

Nous terminerons cette thèse par un Chapitre 6 de discussion et de perspectives, avant de conclure.

Chapitre 2 :
PRESENTATION DU TERRITOIRE D'ETUDE

CHAPITRE 2 : PRESENTATION DU TERRITOIRE D'ETUDE

Dans cette partie nous allons présenter notre territoire d'étude en précisant le contexte physique (sols et climats) l'agriculture qui y est pratiquée puis nous justifierons ce choix. Nous donnerons également quelques éléments sur le contexte réglementaire et sociologique dans la zone d'étude.

2.1. PRESENTATION DU TERRITOIRE D'ETUDE : LA PLAINE DE VERSAILLES ET LE PLATEAU DES ALLUETS (PVPA)

Nous avons retenu dans cette étude, pour des raisons que nous justifierons (2.1.3), le territoire de la Plaine de Versailles et du Plateau des Alluets en Ile de France (département des Yvelines). A une vingtaine de kilomètres de Paris, la Plaine de Versailles fait partie de la ceinture verte parisienne. Le territoire est délimité à l'Ouest par la vallée de la Mauldre, à l'Est par Versailles, au Nord par la forêt de Marly-le-Roi et au sud par la ville nouvelle de Saint-Quentin-en-Yvelines. La figure 2.1 situe le territoire et présente les communes concernées dans leur contexte géographique. Notre terrain d'étude regroupe 25 communes qui sont : Saint Cyr l'école, Bailly, Noisy le roi, Fontenay le Fleury, Rennemoulin, Villepreux, Saint Nom la Bretèche, Chavenay, Les Clayes sous bois, Plaisir, Feucherolles, Davron, Thiverval Grignon, Saint Germain de la Grange, Beynes, Crespières, Orgeval, Les Alluets le roi, Herbeville, Mareil sur Mauldre, Montaiville, Andelu, Jumeauville, Maule et Bazemont

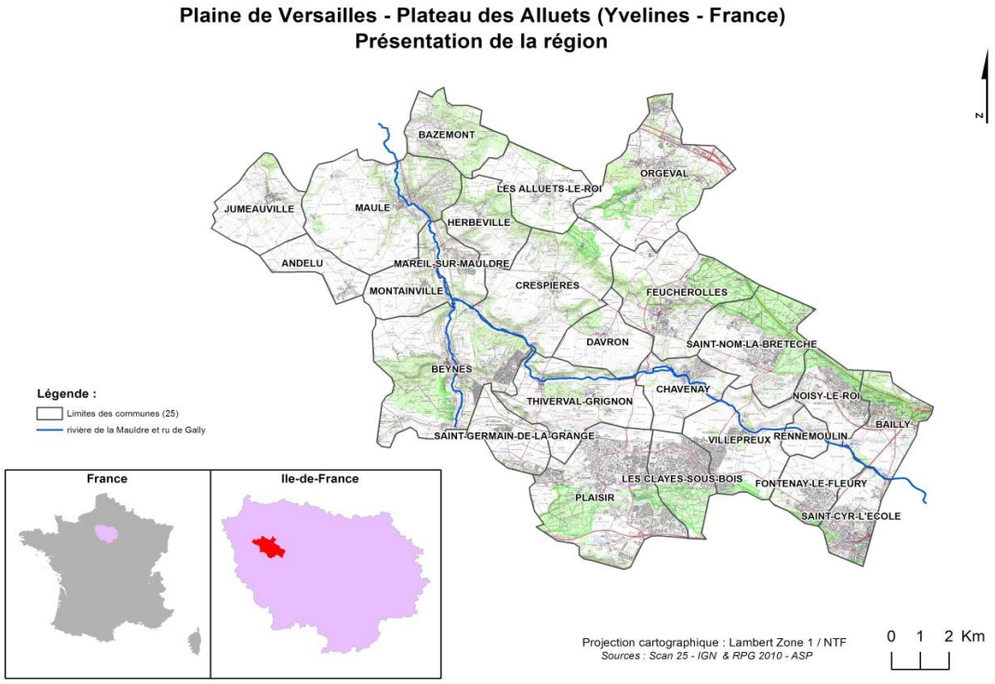


Figure 2.1: Positionnement géographique du territoire (Plaine de Versailles et Plateau des Alluets, PVPA) en France et en ile de France; présentation des communes concernées et de la topographie du territoire.

2.1.1. Le contexte physique de la plaine de Versailles et du plateau des Alluets : sols et climat

Il s'agit d'un ensemble de plateaux (Figure 2.1) alignés dans un axe sud-est/nord-ouest, situés autour de 120 m d'altitude, que bordent de part et d'autre des plateaux dits supérieurs d'environ 170 m d'altitude, armés par des argiles à meulière et surmontant des sables et grès de Fontainebleau : le Plateau de Ste Apolline au sud ; le plateau des Alluets au nord. Le Ru de Gally, qui prend sa source au Grand Canal à Versailles, incise d'est en ouest les plateaux inférieurs puis se jette dans la Mauldre, affluent de la Seine. De même, le Ru de Maldroit qui prend sa source à Plaisir, incise les plateaux inférieurs au sud-ouest de la Plaine de Versailles.

Au plan géologique (Figure 2.2), la plaine de Versailles repose sur un substratum de craie blanche à silex du Crétacé supérieur qui affleure dans certains fonds de vallées, surmonté de marnes et/ou d'argiles plastiques yprésiennes, puis de calcaires, faluns puis de calcaires grossiers du Lutétien (Megnien et al., 1980). L'assise des plateaux supérieurs est formée des calcaires et marnes bartoniens, puis de formations oligocènes : argile verte et marnes (stampien), surmontés par les sables de Fontainebleau, eux-mêmes couronnés par des argiles à meulière que l'on peut voir à l'affleurement sur les rebords de ces plateaux. Une majeure partie de la région est couverte de formations superficielles quaternaires, soit éoliennes sur les plateaux (loess), soit colluviales sur les pentes (remaniements de loess et dépôts soliflués de pente).

Des sols limoneux épais décarbonatés ou luvisols, issus des loess, se développent sur les plateaux (sols dits « limoneux » par les agriculteurs) (Figure 2.3): luvisols et luvisols-rédoxisols sur argile à meulière sur les plateaux supérieurs, luvisols et néoluvisols sur calcaires sur les plateaux inférieurs. Sur les bordures de ces plateaux inférieurs et les versants des vallées, on trouve des sols calcaires peu épais issus de substrats calcaires ou crayeux : rendosols, calcosols et colluviosols, qualifiés localement de sols « argilo-calcaires » par les agriculteurs. En fond de vallée et dans les talwegs, des sols calcaires généralement épais, colluviosols et fluviosols se développent. Un cortège de sols hétérogènes de pente, à dominante sableuse, généralement acides, principalement podzosols et colluviosols, caractérise les versants entre plateaux inférieur et supérieur.

Les sols les plus étendus en surface, surtout lorsque l'on privilégie la surface agricole utile (SAU), sont les luvisols issus des loess, ainsi que les sols dits argilo-calcaires (Crahet, 1992 ; Vaudour et al, 2012). On peut ainsi distinguer 2 pôles contrastés pour les sols agricoles du territoire, les sols limoneux et les sols dits « argilo-calcaires » : cette dichotomie sera reprise dans les scenarios de substitution des engrais minéraux par des PRO pour en évaluer les conséquences.

Le climat est océanique, tempéré, avec des précipitations annuelles moyennes d'environ 600 mm et une température moyenne de 10°C. Les précipitations sont bien réparties durant l'année (Figure 2.4), mais ces cumuls mensuels moyens masquent des périodes contrastées, sèches ou humides, et d'amples variations interannuelles. L'évapotranspiration potentielle varie beaucoup plus que la pluie durant l'année. Ce sont surtout ces variations, et la dynamique des cultures, qui déterminent le bilan hydrique au cours des saisons ; la période de drainage, ou d'excès d'eau, se situe en hiver et début du printemps. Mais des orages estivaux peuvent aussi s'infiltrer, ou ruisseler, en fonction des conditions locales.

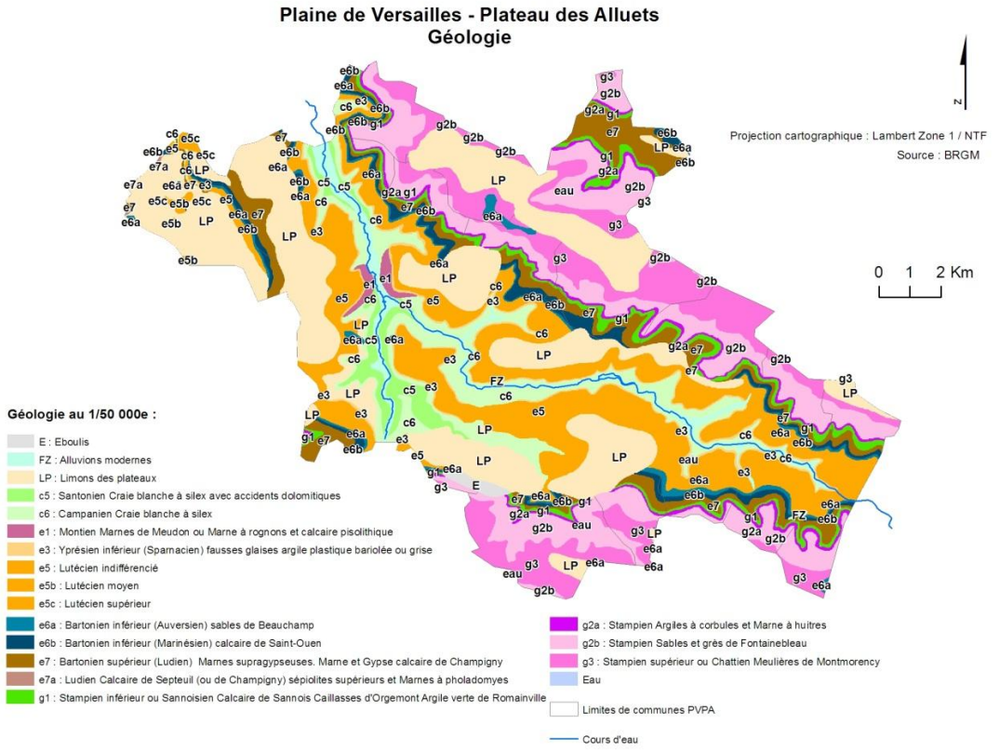


Figure 2.2 : Carte géologique du territoire d'études

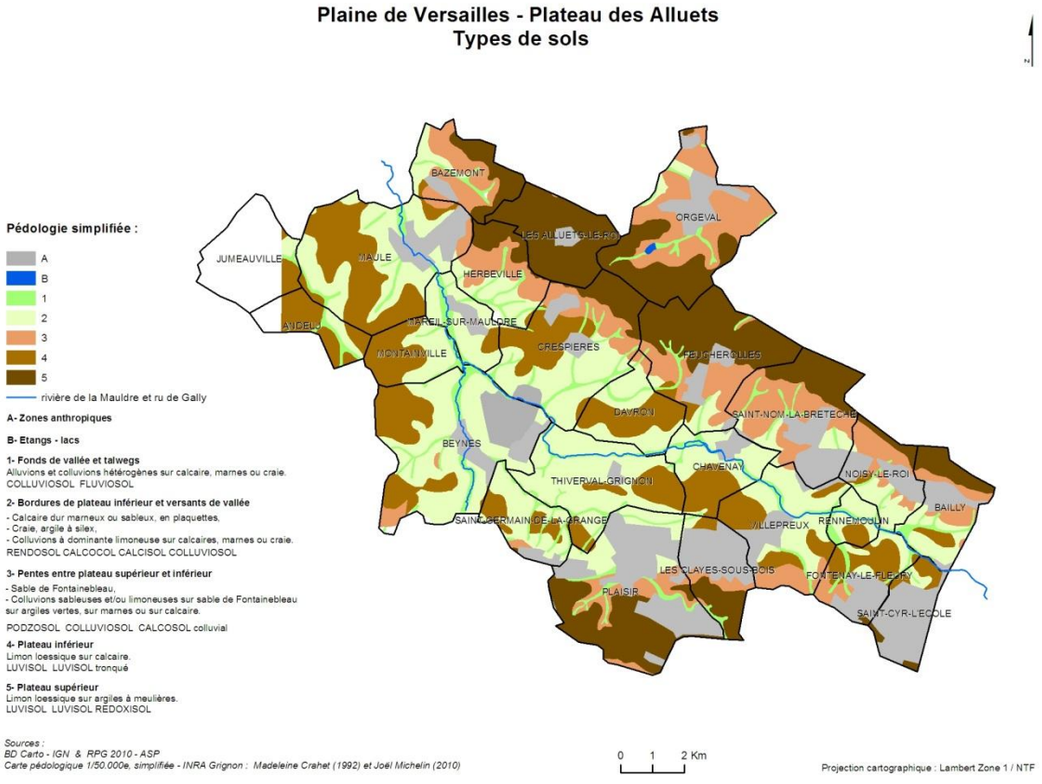


Figure 2.3 : Carte pédologique simplifiée du territoire d'études

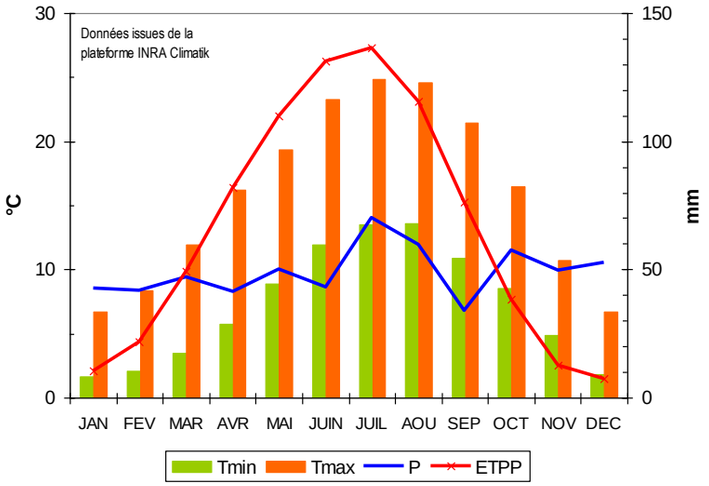


Figure 2.4 : Données climatiques du territoire d'études (Station météo de la Ferme de Grignon) : Moyennes de la température max et min, la pluviométrie et l'ETP Pennman sur 12 ans ou cumuls mensuels moyennés sur cette même période (2000-2011)

2.1.2 L'agriculture sur le territoire :

Le territoire est une zone à la fois fortement urbanisée et particulièrement protégée par le Château de Versailles, dans la perspective duquel le bâti est très sévèrement réglementé. Il s'étend sur près de 22 000 ha, et compte quelques 140 000 habitants, soit une densité de 640 habitants par km². Un quart de ce territoire est classé en zone vulnérable, ce qui implique des mesures de prévention pour limiter au maximum la pollution des eaux souterraines par les nitrates, basées sur la loi sur l'eau de 1992 et la directive nitrates de 2001. Dans ce cadre, les agriculteurs doivent déclarer les quantités d'engrais épandus chaque année. En ce qui concerne les apports organiques, les agriculteurs ne peuvent pas épandre plus de 170kg Ntot/ha/an, calculé sur la surface totale épandable.

L'agriculture occupe 9900 ha (soit environ 45% de ce territoire) et compte, en 2010, 82 exploitations agricoles. Cette agriculture est essentiellement consacrée aux grandes cultures (blé orge, colza, maïs), avec 60 exploitations sur 90% de la SAU, et ces exploitations sont de grande taille, 130 ha en moyenne. Elle est aussi, par l'intermédiaire d'une vingtaine d'exploitations maraîchères, arboricoles ou mixtes, couvrant 10% de la SAU, productrice de fruits et légumes. L'élevage est rare sur le territoire et compte un élevage bovin-ovin-caprin à statut particulier (Ferme de l'école d'agronomie AgroParisTech) et deux éleveurs de volailles, dont un en agriculture biologique.
Comme de nombreuses zones périurbaines en Europe, l'équitation est un loisir urbain développé, et ici particulièrement développé pour des raisons historiques. L'élevage de chevaux, les pensions, les centres équestres sont nombreux, au nombre de 23 sur le territoire (environ 910 chevaux).

2.1.3. Justifications du choix du territoire:

Ce territoire a été choisi dans notre étude pour plusieurs raisons :

- Il s'agit d'un territoire dynamique connu pour ses projets de développement : les 25 communes se sont regroupées en 2006 dans un projet de dit de « territoire agri-urbain » (Poulot, 2008) intitulé APPVPA[1], dont l'objectif premier est d'œuvrer pour le maintien d'une agriculture dynamique dans cette zone périurbaine et de retisser des liens entre agriculteurs, collectivités locales et les habitants. En particulier, c'est au travers du

[1] Association Patrimoniale de la Plaine de Versailles et du Plateau des Alluets. L'association regroupe trois collèges (i) les agriculteurs (ii) les élus (iii) les associations représentant les habitants

développement de circuits courts entre producteurs et consommateurs locaux que l'APPVPA a souhaité retisser ces liens : De fait, l'agriculture locale est très dynamique de ce point de vue : 18 fermes commercialisent fruits et légumes, œufs, plus rarement produits laitiers et huile de colza, en circuits courts très diversifiés[2] (Aubry et al, 2013). La multifonctionnalité de cette agriculture périurbaine est revendiquée, avec notamment l'orientation vers les loisirs des urbains (développement des activités équestres, labyrinthes végétaux, fermes cueillettes) et l'accueil des touristes (hébergements à la ferme, gîtes, fermes-auberges). L'APPVPA a été retenue en 2009 comme l'un des trois sites franciliens redevable d'un projet européen LEADER[3]. Dans ce cadre, elle poursuit son travail sur la promotion des circuits courts (signalétique, diffusion), la valorisation des ressources locales dans une démarche d'écologie territoriale et le renforcement de l'identité territoriale (dont l'élaboration d'une charte paysagère).
La thématique de la valorisation agricole des PRO (dont le fumier de cheval et plus largement les déchets organiques urbains) sur le territoire, si elle est nouvelle pour l'APPVPA, entre ainsi en résonance avec les orientations de l'association et de son projet Leader et a ainsi été très bien accueillie au démarrage de cette thèse.

- Zone périurbaine par excellence, l'une des zones agricoles les plus proches de Paris, la Plaine de Versailles est susceptible de pouvoir utiliser et valoriser les PRO *a priori* nombreux issus de son entourage urbain. Mais sa situation périurbaine en fait aussi un lieu de résidence, où les habitants, tout en recherchant la proximité de la « campagne » peuvent aussi redouter, voire refuser des pratiques agricoles qui ne correspondent pas à ce qu'ils attendent de cette « campagne » (Donadieu, 1998 ; Donadieu et Fleury, 2003). On fait l'hypothèse que l'utilisation de PRO par les agriculteurs peut faire partie de pratiques pouvant rencontrer des obstacles de cet ordre. Si nous ne les étudierons pas en tant que tel, n'étant pas sociologues, nous repèrerons néanmoins, dans les utilisations actuelles ou potentielles de PRO, ce qui pourrait faire débat avec les habitants voisins.

- Zone agricole essentiellement de grandes cultures avec peu d'élevage, représentative par ses sols et ses grands systèmes de culture, de nombreuses zones du Bassin Parisien, la Plaine de Versailles montre des teneurs en matière organique des sols qui peuvent être basses (Arrouays et al, 2001). Ces faibles teneurs en MO des sols peuvent inquiéter certains agriculteurs et rendre dès lors pertinent de s'intéresser à l'utilisation de PRO pour contrer cette baisse (Le Villio et al, 2001 ; Peltre et al, 2012)

- Incluant le site de Grignon, donc un accès facile aux installations de laboratoire, comprenant sur son territoire l'essai Qualiagro[4] (Houot et al., 2002), le territoire de l'APPVPA présente ainsi des caractéristiques intéressantes du point de vue du test possible à terme de solutions techniques incluant des PRO : on dispose notamment, grâce à l'essai de longue durée Qualiagro, de nombreuses données de qualité concernant les effets sur les cultures et les sols d'applications répétées de PRO. Ceci nous sera tout particulièrement utile pour paramétrer nos outils d'évaluation dans le cadre de scénarios de substitution entre PRO et engrais chimiques et/ou d'utilisation de PRO pour amender les sols.

2.1.4. Contexte réglementaire:

Comme toute la région Ile-de-France, la Plaine de Versailles est classée en zone vulnérable, ce qui impose des contraintes réglementaires supplémentaires à prendre en compte concernant les périodes et les surfaces possibles, ou les doses maximales d'épandage de matières fertilisantes, dont les matières organiques (cf Chapitre 1 : Etat de

[2] Boutique à la ferme, cueillettes, AMAP, paniers en gare, vente Internet, vente directe en GMS etc. 4 producteurs vendent en outre dans les neuf marchés que compte la zone

[3] LEADER : Liaison Entre Actions de Développement de l'Economie Rurale ; Ces programmes européens financent essentiellement du développement rural, leur application au périurbain est très récent. Avec l'APPVPA le projet court de 2009 à 2013 pour un montant total de près d'1 million d'euros

[4] Qualiagro : site expérimental du SOEREPRO pour observer les impacts agro-environnementaux d'apports répétés de PRO.

l'art). Cela justifiera l'attention à porter concernant les pertes par lixiviation de nitrates dans les scénarios proposés de substitution des engrais chimiques.

La problématique de la gestion des déchets impacte directement l'agriculture dans ce territoire. Contrairement au reste de la France où il est organisé politiquement à l'échelle des départements, le plan d'élimination des déchets est ici régional. Cela tient à la proximité de Paris, principale productrice de déchets mais sans espaces propices à leur gestion. En matière de déchets organiques, le PREDMA[4] prévoit une augmentation conséquente des volumes de boues et de composts d'ordures ménagères résiduelles d'ici la fin de ce plan en 2019 et s'engage dans leur valorisation. En vertu du principe de proximité, qui régit la gestion des déchets, les zones périurbaines où l'agriculture est présente, telles que la plaine de Versailles et le plateau des Alluets, sont appelées à contribuer à la valorisation agricole des produits résiduaires organiques des agglomérations voisines (Versailles, Saint Quentin en Yvelines ou même Paris).

2.1.5. PROBLEMATIQUES POLITIQUES ET SOCIALES LIEES A L'UTILISATION AGRICOLE DES PRO

Les fonctions sociales du recyclage des PRO sont aujourd'hui à considérer, par le rapprochement entre l'agriculture et la société, notamment car la substitution des produits de synthèses par des PRO donne une image de production plus «écologique», même si dans ce cas il est difficile d'en faire une généralité[5]. Par ailleurs, l'utilisation de PRO en agriculture peut générer la création d'emplois dans le bassin pour la transformation des déchets organiques en produits organiques bénéfiques aux systèmes de culture, même s'il n'est pas dans nos compétences d'évaluer cet effet.

La valorisation agricole des PRO ne concerne pas que les exploitants agricoles. Elle peut être orientée par les politiques publiques à différentes échelles (dont locales), par la rentabilité économique, par l'acceptabilité sociale des déchets pour les groupes sociaux concernés par leur gestion, mais également, plus globalement, par la société locale. Le contexte socio-économique est important à connaître pour mieux comprendre les logiques existantes et possibles de valorisation agronomique des PRO. Quatre volets complémentaires sont importants : (i) l'analyse des politiques publiques globales et locales, (ii) l'analyse économique des filières, (iii) l'acceptabilité sociale par les acteurs impliqués (producteurs, utilisateurs potentiels) dans le processus de valorisation des PRO, et (iv) l'analyse de la société locale faisant émerger l'organisation sociale sous-jacente.

L'analyse des politiques publiques comprend une caractérisation de la réglementation dans chaque contexte ainsi que l'étude des positionnements institutionnels par rapport à la gestion des PRO à l'échelle territoriale : locale, régionale, nationale (voire supranationale).

L'analyse de l'intérêt économique d'une filière (par rapport à une autre) s'appuie par exemple sur l'étude de la viabilité de la filière du compost des boues de stations d'épuration urbaines en Ile de France, en privilégiant l'analyse du marché des composts : y-a-t-il une meilleure stabilité du marché d'épandage agricole de compost ? Si oui, pourquoi (statut de produit et pas de déchet) ? Est-ce que les composts sont des biens « non controversés » entre producteur et agriculteur ou existe-t-il des points de tension qui peuvent remettre en cause le fonctionnement de ce marché (Lupton, 2005) ?

D'un point de vue sociologique, la problématique posée par le recyclage des PRO suppose de s'interroger sur les conditions d'acceptabilité sociale de l'idée d'accorder de la valeur à ces PRO (Alter, 2002) et sur les modalités de

[4] Plan Régional d'Elimination des Déchets Ménagers et Assimilés

[5] l'utilisation de boues d'épuration a pu avoir tendance à dégrader l'image des produits agricoles par exemple, même si les exigences accrues aujourd'hui quant à leur innocuité en épandage devraient corriger cette vision négative

réception du projet de valorisation (Joncoux, 2013), par toute la chaîne des acteurs supposés être « enrôlés » (Latour, 1993) dans sa diffusion. Le recyclage rencontre des freins à identifier, car la nouveauté est toujours associée par les acteurs aux notions de contraintes et de risques (Peretti-Watel, 2000) et la mise en place de politiques environnementales fait souvent l'objet de résistances (Padioleau, 1982).

En tant qu'agronome, nous n'avons pas les compétences nécessaires pour analyser, dans notre étude, ces questions relatives à l'acceptabilité politique et sociale de l'utilisation des PRO. Par contre, nous resterons vigilants quant à la faisabilité réelle des scénarios de substitution des engrais azotés par les PRO vis-à-vis des oppositions que l'on peut rencontrer sur le territoire. Ce n'est ainsi pas parce qu'un PRO aura pu montrer de grands intérêts en termes de substitution qu'il sera automatiquement acceptable par les agriculteurs ou leur entourage.

Chapitre 3 :
INVENTAIRE ET CARACTERISATION DES PRO ET DES SYSTEMES DE CULTURE SUR LE TERRITOIRE

CHAPITRE 3 : INVENTAIRE ET CARACTERISATION DES PRO ET DES SYSTEMES DE CULTURE SUR LE TERRITOIRE

On rappelle que dans ce chapitre, nous commencerons par présenter la méthodologie utilisée pour réaliser ces inventaires, avant de présenter les résultats. Nous aurons donc les parties suivantes : **3.1. INVENTAIRE ET CARACTERISATION DES PRO DISPONIBLES SUR LE TERRITOIRE**. **3.2. INVENTAIRE ET CARACTERISATION DES SUCCESSIONS DE CULTURE ET DES MODES DE FERTILISATION DES CULTURES**. **3.3.** Un **RECAPITULATIF** des successions et modes de conduites sur les différents types de sols, pratiques de fertilisation.

3.1. INVENTAIRE ET CARACTERISATION DES PRO DISPONIBLES SUR LE TERRITOIRE

3.1.1. Matériels et Méthodes

3.1.1.1. Inventaire des PRO

Les différents types de PRO ont été inventoriés et quantifiés sur notre territoire d'étude afin de connaître les potentialités de substitution des engrais par les matières organiques existantes. Les modes d'estimation des tonnages disponibles sur le territoire sont résumés dans le tableau 3.1. Ils sont décrits dans les paragraphes suivants.
Les PRO locaux sont essentiellement d'origine agricole et urbaine. Parmi les premiers, on trouvera les effluents d'élevage produits localement ou importés, de même que les fumiers de chevaux issus des activités d'équitation. Parmi les seconds, on trouvera les boues de station d'épuration (celles du territoire, voire à ses franges), les composts de déchets verts des différentes communes du territoire et les ordures ménagères dont la fraction fermentescible est susceptible d'être compostée (compost de biodéchets). Les méthodes d'approches pour faire l'inventaire de ces PRO variés ont été différentes.

3.1.1.2. PRO d'origine agricole :

Les 3 éleveurs du territoire ont été rencontrés pour recueillir les informations sur les ateliers d'élevage et les tonnages d'effluents d'élevage produits. Par ailleurs, certains agriculteurs rencontrés nous ont fait part du fait qu'ils utilisent des PRO d'origine animale importés sur le territoire :

- Humival qui est un lisier de porc séché importé de Bretagne et vendu par la coopérative agricole ;
- Fertilys qui est un compost de déchets verts mélangé avec 1/5 de Farine animale et vendu également par la coopérative agricole ;
- Fientes de volailles importées de Bretagne ;
- fumier de bovins provenant d'une commune à proximité de Versailles.

La coopérative agricole nous a renseignés sur les tonnages importés et commercialisés de ces PRO d'origine animale.

3.1.1.3. PRO de « loisir »

Concernant les fumiers de chevaux, il existe 23 éleveurs de chevaux sur le territoire qui ont été tous enquêtés. Les éleveurs n'étaient pas tous capables de nous donner des quantités produites de fumier mais plus facilement des volumes produits. En effet, les agriculteurs qui fournissent les pailles de blé ou d'orge aux centres équestres (contrat d'échange paille/fumier), doivent récupérer les volumes de fumiers produits une fois par semaine en général. L'agriculteur facture au centre le nombre d'allers-retours effectués en rapport avec le volume de la benne

dont il dispose. Afin d'estimer ces quantités, notre hypothèse était que la densité du fumier équivaut à peu près à 400kg/$m^{3,}$ ce qui correspond à une mesure que nous avons effectuée, cette valeur étant par ailleurs proche des valeurs trouvées par la chambre Régionale d'agriculture du Languedoc-Roussillon (2011). Ces valeurs varient entre 270 kg/m^3 et 400 kg/m^3. Les fumiers de chevaux sont très pailleux en général, car les pailles sont utilisées comme litière pour les chevaux. Les éleveurs nous ont donné les volumes de fumier produits par semaine ou par mois. Le calcul est fait sur une production de 36 semaines soit environ 8 mois sur 12. En période estivale (juin à septembre) en effet, les chevaux restent à l'extérieur de l'écurie et il n'y a donc plus de fumier récupérable. Les estimations de quantités de fumier produites ont été vérifiées auprès de certains producteurs, qui constatent que ces quantités calculées correspondent bien. Pour les fumiers produits sur litière de copeaux, les quantités ont été données par les 2 éleveurs utilisant ce genre de litière. En effet, les entreprises qui livrent les litières de copeaux de bois récupèrent les fumiers. Les volumes de ces fumiers sur copeaux sont beaucoup plus faibles que ceux de fumiers pailleux.

3.1.1.4. *PRO d'origine urbaine :*

Concernant les boues d'épuration urbaine, les stations d'épuration ont été recensées sur le territoire. Nous avons effectué une enquête auprès de la Direction départementale de l'Equipement et de l'Agriculture des Yvelines (DDEA) afin d'obtenir les quantités de boues produites et leurs flux. Deux stations d'épuration ont été enquêtées afin de vérifier les quantités et les flux des boues produites par ces stations.
Tous les déchets verts (DV) du territoire sont collectés pour être compostés sur 3 plates-formes de compostage qui ont été visitées. Les tonnages sortant ont été communiqués par ces stations ou issus d'un recensement par l'ADEME (ADEME, 2005). Une partie des composts de DV produits est convertie en produit commercial Fertilys par ajout de farines animales importées du département du Loiret. Les quantités de farine animale utilisées pour former le produit Fertilys sont données par la coopérative agricole.
Toutes les ordures ménagères du territoire sont collectées puis acheminées à Thiverval-Grignon pour y être incinérées. Les quantités de fraction fermentescible ou biodéchets provenant des ordures ménagères ont été estimées sur la base du tonnage d'ordures ménagères (OM) collectées sur le territoire, calculé à partir de la moyenne de production des OM par habitant en Yvelines (ORDIF, 2006). Ces quantités estimées ont été vérifiées auprès de l'usine d'incinération de Thiverval-Grignon. Des caractérisations des ordures ménagères au niveau national ont été réalisées par l'ADEME : la fraction fermentescible représente 30% des OM produites (ADEME, 2007). Sous hypothèses que la totalité de cette fraction fermentescible soit compostée et que la production de compost représente 30% de la masse entrante en compostage et d'une teneur en matière sèche (MS) de 60% dans les composts finis, le calcul de la quantité de composts de biodéchets en tonnes de matière sèche se réalise selon la formule: tonnage total OM (t MB) * 30% de biodéchets* 30% de compost après compostage*60% de MS dans les composts.

3.1.1.5. Autres PRO:

Il existe d'autres PRO comme les tourteaux de colza, qui sont produits dans une usine de trituration du colza. Les quantités sont données par le producteur. Les quantités sont faibles et non épandues en agriculture pour l'instant, ce produit a une vocation pour l'alimentation animale. Il existe également des PRO comme le mulch de bois, compost de feuilles de platane, le terreau de déchets verts (utilisés dans les pépinières). Les quantités de ces PRO sont faibles également mais ces matières organiques ont été quand même échantillonnées. Le tableau récapitule les informations obtenues et les méthodes de calculs des quantités des différents PRO. Nous ne présenterons pas, par contre, les résultats de ces PRO qui sont produits en quantités très faibles et qui sont peu ou pas utilisés sur le territoire tels que les tourteaux de colza, le mulch de bois, le compost de feuilles de platane et le terreau de déchets verts.

Tableau 3.1 : Recensement des sources de PRO : origine des informations collectées et méthode de calcul et de vérification des quantités de PRO

PRO	Source d'information	Type d'information	Nombre d'unités de production	Calcul	Vérification
Effluents d'élevage	Eleveurs	T MB/an donnés par l'éleveur	3 éleveurs : 1 bovin et 2 volailles	= T MB/an* teneur en MS des différents PRO (fientes de volailles, fumier et lisier de bovin, fumier ovin, fumier caprin)	Pas de vérification possible
Humival (Lisier de porc séché)	Coopérative agricole	Quantités commercialisées sur le territoire (T MS/an)	Bretagne		Pas de vérification possible
Fumiers de chevaux	Centres équestres	Volume Fumier/mois donné par les éleveurs	23 (912 chevaux mais seulement 755 boxes)	Volume Fumier/ semaine* 36 semaines où le fumier est récupérable * densité du fumier (=0,4 : Densité mesurée)*50% MS (Source : Ziegler et Heduit, 1991)	Pas de vérification possible mais cohérence testée auprès des éleveurs
Boues	DDEA	T MB/an	7 stations d'épuration sur le territoire + 3 stations hors territoire traitant les eaux usées de 6 communes du territoire	t MS/an	2 Stations d'épuration
Composts de Biodéchets issus des Ordures Ménagères	INSEE (2009) + (ORDIF, 2006)	Nombre d'habitants/commune * production d'OM par habitant en ile de France (ORDIF, 2006)	25 communes	nombre d'habitants * production d'OM par habitant en ile de France (296 kg MB/habitant/an) * 30% de biodéchets * 30% de compost produit * 60% (teneur en MS)	Incinérateur
Composts de Déchets verts	Plateformes de compost.	T MB/an donnés par les plateformes de compostage	3 plateformes de compostage	T MB/an* 60% (teneur en MS)	Pas de vérification possible
Fertilys (compost de déchets verts + Farine animale)	Coopérative agricole	Quantités Commercialisées et produits sur le territoire (T MB/an)	1 plateforme de déchets verts	= T MB/an* 50% (teneur en MS)	1 Plateforme de compostage de déchets verts
Tourteaux de colza	Usine de tritur ation	T MB/an donnés par l'usine	1 usine	T MB/an* 88% (teneur en MS)	Pas de vérification possible
Mulch de bois	Plateforme de compostage de Versailles	T MB/an donnés par les plateformes de compostage	1 plateforme de compostage	T MB/an* 54% (teneur en MS)	Pas de vérification possible
Compost de feuilles de platane	Plateforme de compostage de Versailles	T MB/an donnés par les plateformes de compostage	1 plateforme de compostage	T MB/an* 53% (teneur en MS)	Pas de vérification possible
Terreau de déchets verts	Pépinière	T MB/an donnés par la pépinière	1 pépinière	T MB/an* 44% (teneur en MS)	Pas de vérification possible

3.1.2. Echantillonnage des PRO

L'ensemble des PRO susceptibles d'être disponibles sur le territoire a été échantillonné pour caractérisation analytique. En tout, 16 échantillons de PRO ont été collectés. On exclura de cette liste, comme dit précédemment, les tourteaux de soja, le mulch de bois, le compost de feuilles de platane et le terreau de déchets verts. Nous avons donc retenu :

- 2 fumiers de chevaux pailleux qui se différencient par leurs proportions apparentes de paille plus ou moins élevées.
- un fumier de chevaux sur copeaux
- un compost de fumier de chevaux pailleux

- un fumier de bovins (vache laitière sur litière accumulée)
- un fumier de caprins sur paille
- un fumier d'ovins sur paille (litière accumulée)
- un compost de déchets verts de la plateforme de Thiverval-Grignon
- un compost de déchets verts de la plateforme de Versailles
- le produit Fertilys (issu du compost de déchets verts de la plateforme de Thiverval-Grignon auquel est ajouté de la Farine animale)
- un compost de fientes de volailles provenant de l'éleveur de volailles en agriculture biologique, qui composte les fientes produites dans son exploitation
- des fientes de volailles séchées provenant de Bretagne
- un échantillon d'Humival (Lisier de porc séché)
- la boue digérée séchée de la station d'épuration de Plaisir
- une boue chaulée provenant de la station des Mureaux

L'échantillonnage a été fait de façon à obtenir un échantillon représentatif de chaque PRO. Plusieurs prises d'échantillons à différentes profondeurs des stocks disponibles sont effectuées pour constituer un échantillon intermédiaire à partir duquel sera réalisé l'échantillonnage pour analyse.
Le fumier de chevaux composté a été échantillonné dans une pépinière. Ces composts n'existent pas aujourd'hui sur le territoire mais pourraient être amenés à se développer au cas où on chercherait à centraliser les flux de ces fumiers afin de les composter et les valoriser sur le territoire.
Pour chacun des PRO, une quantité d'au moins 10 kg est échantillonnée pour avoir un échantillon représentatif du gisement. Ensuite la totalité est mise à sécher puis est broyée.

3.1.3. Caractérisation physico-chimique et agronomique des PRO

3.1.3.1. Analyses faites sur échantillons frais :

Les mesures d'humidité et de teneur en matière sèche (MS) des PRO sont faites au laboratoire EGC à Grignon. Trois échantillons de 100 g environ sont séchés à l'étuve à 105°C pendant 48h.
La teneur en N minéral des échantillons frais est également mesurée en triplicat à Grignon. L'azote minéral sous ses deux formes NO_3 et NH_4 est extrait au KCl 1N (100g d'échantillon et 400ml de KCl) après agitation pendant 1h. Les surnageants sont ensuite filtrés et le N minéral est dosé par colorimétrie (méthode Griess pour la mesure des nitrates et méthode Berthelot modifiée pour la mesure de l'ammonium, Flux continu : SKALAR).

3.1.3.2. Analyses faites sur échantillons séchés et broyés :

Les échantillons sont séchés à 40°C à l'étuve pendant une semaine environ puis broyés à 1mm à l'aide d'un broyeur à végétaux (Gondard).

- Caractérisations chimiques :

Les échantillons, une fois séchés et broyés, sont envoyés au laboratoire de l'INRA-ARRAS pour caractérisation chimique globale. La liste des éléments et les méthodes de mesures sont explicitées dans le tableau 3.2.

Tableau 3.2 : Méthodes de caractérisation chimique des PRO

Caractérisation	Méthode
Carbone organique	Combustion sèche
Azote (N) total	Combustion sèche
Azote nitrique (N de NO_3^-)	Extraction KCl et colorimétrie
Azote ammoniacal (N de NH_4^+)	Extraction KCl et colorimétrie
pH eau	NF ISO 10390
Compost et fumiers: Al, Ca, Fe, K, Mg, P_2O_5 totaux	solubilisation HF et mesure en ICP
Boue : Al, Ca, Fe, K, Mg, P_2O_5 totaux	extraction EAU REGALE et mesure en ICP
Mise en solution Sulfonitrique pour P et K	Méthode INRA
Hg, AS, Se	Combustion sèche
Cr, Cd, Cu, Ni, Pb, Zn extractible à l'EDTA	Méthode BCR Extraction à l'EDTA

- Fractionnement biochimique et calcul de l'indice de stabilité de la MO :

Le fractionnement biochimique de la matière organique est fait selon la méthode normalisée XP U 44-162 (AFNOR, 2009). Le fractionnement Van Soest, mis au point pour l'analyse de la digestibilité des fourrages (Van Soest, 1963; Van Soest & Wine, 1967) a été adapté pour caractériser la stabilité de la matière organique d'amendements organiques (Linères & Djakovitch, 1993). Cette méthode sépare successivement 4 fractions de MO assimilées à des fractions biochimiques présentes dans des résidus végétaux (fraction soluble (SOL), l'hémicellulose (HEM), la cellulose (CEL) et les lignines (LIG) à l'aide d'un extracteur de fibres, déterminées ensuite par différence pondérale après attaque puis exprimées en % de la MO totale ou en % du C organique total des matières organiques.
Cinq échantillons de 1g sec et broyé à 1mm sont placés dans des creusets auxquels on ajoute 1g de sable calciné. Quatre extractions sont réalisées successivement :

- Extraction de la fraction soluble dans l'eau chaude (SOL eau) (extraction dans 100ml d'eau bouillante pendant 30minutes).
- Extraction de la fraction soluble dans l'eau + détergent neutre (SOL NDF) (extraction dans 100ml d'eau bouillante pendant 30 minutes puis dans 100ml de détergent neutre chaud pendant une heure, NDF).
- Extraction la fraction hémicellulosique (HEM) (1heure dans 100ml dans un détergent acide chaud, ADF).
- Extraction de la fraction cellulosique (CEL) (3 heures dans une solution d'acide sulfurique concentrée, ADL).

Le résidu est considéré comme étant la fraction lignines (LIC).
Après chaque extraction, la fraction organique résiduelle à été calculée en fonction de la perte en masse de l'échantillon (l'échantillon est séché à 105°C pendant au moins 16 heures puis calciné à 480°C durant 6 heures). Les calculs des différentes fractions se font selon :

SOL_{eau} (%MO) = 100 – MO_{eau}
SOL_{NDF} (%MO)= MO_{eau} – MO_{NDF}
HEM (%MO) = MO_{NDF} – MO_{ADF}
CEL (%MO) = MO_{ADF} – MO_{ADL}
LIC (%MO) = MO_{ADL}
Avec MO_{eau} , MO_{NDF} , MO_{ADF} , MO_{ADL}, les proportions de MO mesurée dans les résidus après extraction
En raison de la lourdeur du protocole d'analyse, de la reproductibilité de la méthode démontrée sur un même broyat de PRO, *un seul fractionnement est effectué par échantillon broyé*. La quantité séchée et broyée étant suffisamment importante, on considérera que nous avons des résultats représentatifs des gisements de PRO.
A partir des résultats de fractionnement biochimique, l'Indice de Stabilité de la Matière Organique ISMO est calculé en utilisant l'équation suivante (Lashermes et al, 2009 ; AFNOR, 2009) :

ISMO (%) = 44,5 + (0,5*(SOL_{eau} + SOL_{NDF})) - (0,2* CEL) + (0,7* LIG) - (2,3*(% de Carbone minéralisé à 3jours d'incubation))

- Cinétiques de minéralisation du C et du N en conditions contrôlées de laboratoire

Afin d'estimer la valeur fertilisante azotée (capacité d'un PRO à fournir du N minéral pour les cultures au cours du temps) et de caractériser la biodégradabilité de la matière organique des PRO qui conditionne leur valeur amendante (capacité d'un PRO à augmenter et entretenir les teneurs en MO des sols) estimée à partir de l'indice ISMO, nous utilisons la méthode la plus courante qui est le suivi de la minéralisation du C et du N des PRO au cours d'une incubation en mélange dans un sol en conditions contrôlées de laboratoire, en conditions d'azote et d'oxygène non limitantes.
Les incubations se font en conditions contrôlées de laboratoire sur la base de la méthode normalisée XPU44-163 (AFNOR, 2009). Des mélanges sol + PRO sont préparés. Le sol provient d'un horizon de surface d'une parcelle témoin du dispositif Qualiagro. Le sol est de texture limoneuse (80% limon, 15% argile, 5% sable) avec un pH de 6,9. L'horizon labouré (0-30cm) est prélevé puis tamisé à 4mm et a été conservé dans une chambre froide à 4°C avant utilisation.
Les incubations, pour le suivi de la minéralisation du C, sont réalisées dans des bocaux de 500 ml hermétiquement fermés. Les mélanges sol + PRO sont réalisés avec l'équivalent de 25 g de sol sec et une masse de PRO broyée et séchée telle que le C ajouté corresponde à 0.2% de la masse de terre. Trois répétitions par type de PRO sont réalisées. L'humidité des mélanges est ajustée à 24% massique correspondant au pF 2.5 proche de la capacité au champ. Les incubations sont réalisées à 28°C dans l'obscurité. Afin d'éviter tout déficit en N minéral qui pourrait ralentir la minéralisation du C, 1 ml d'une solution de KNO_3 (la concentration de la solution dépend de la quantité d'eau à rajouter pour atteindre le pF 2,5) est ajouté dans chaque flacon. La quantité d'azote minéral dans le sol visée est de 35mg/kg de sol sec en sachant que le sol initial en contient environ 25 mg/kg de sol sec. Des incubations de sol seul sont réalisées dans les mêmes conditions (témoin).
Un pilulier contenant 10ml de soude à 0,5N est placé dans chaque bocal d'incubation pour piéger le CO_2 dégagé. Un autre pilulier rempli d'eau permet de maintenir humide l'air du bocal. Trois bocaux supplémentaires sont incubés vides avec seulement le pilulier de soude afin de connaître la teneur en CO_2 de l'air du bocal et la carbonatation initiale de la soude. Après 1, 3, 7, 14, 21, 28, 49, 70, 91 jours d'incubation, les piluliers de soude sont changés. Le dosage du C-CO_2 dans la soude a été effectué par colorimétrie à l'aide d'un analyseur à flux continu (SKALAR).
Pour le suivi de la minéralisation du N, des incubations similaires sont effectuées dans des flacons en plastique. Trois flacons de mélange sol+ PRO et 3 flacons de sol témoin sont préparés par date de mesure (0, 7, 14, 28, 49, 70, 91 jours). A chaque date, le N minéral est extrait par agitation pendant 1 heure dans 100ml de KCl (1M), puis filtration. Les extraits sont conservés congelés jusqu'à analyse. Le N minéral est analysé par colorimétrie à l'aide d'un analyseur en flux continu (SKALAR).

3.2. RESULTATS : SOURCES DE PRO SUR LE TERRITOIRE, INVENTAIRE ET CARACTERISATION :

Dans cette partie, nous présenterons :
- les résultats d'inventaire des PRO,
- La caractérisation des valeurs fertilisante et amendante des PRO.

3.2.1. Inventaire de l'offre territoriale en PRO :

L'objectif de cette étape est d'identifier, de localiser et de quantifier les PRO produits sur le territoire de la PVPA. Ce travail est nécessaire pour connaitre les potentialités du territoire en termes de production de PRO et savoir, en analysant les différents flux de PRO, si le recyclage des MO d'origine résiduaire (y compris les effluents d'élevage)

est optimal ou non. D'autre part, en localisant les différentes sources de PRO, nous pourrons éventuellement optimiser l'utilisation des PRO en gardant un bilan environnemental intéressant et en limitant les distances entre les sources de PRO et leurs utilisateurs qui sont, dans notre cas, les exploitations agricoles. Nous n'irons cependant pas dans cette thèse jusqu'à réaliser ces optimisations de flux. Par contre, nous proposerons les données de base pour pouvoir le faire à l'avenir.
Les figures 3.1 à 3.5 localisent les sources de PRO, dont les quantités (en tonnes de matières sèches produites par an) et leur devenir sont synthétisés dans le tableau 3.3. Rappelons que sur le territoire d'étude, l'activité équestre est particulièrement développée avec 23 éleveurs et que les autres types d'élevage sont rares.

Tableau 3.3 : Quantités produites et flux sur le territoire des PRO produites et/ou consommés

Origine des PRO	Type de PRO	Quantités totales produites, potentiellement produites ou importées	Quantités restant sur le territoire	Quantités exportées
		t MS/an		
PRO produits sur le territoire	Lisier de Bovins	400	400	0
	Fumier de Bovins	750	750	0
	Fumier d'Ovins	200	200	0
	Fumier de Caprins	150	150	0
	Fientes de volailles	210	35 (compostées et épandues dans la même exploitation)	175
	Fumiers de chevaux sur copeaux	468	0	468
	Fumiers de chevaux pailleux	3672	2 644	1028
	Boues de STEP	3515	943 : épandues 273 : incinérées	2299
	Compost de biodéchets*	4080 (potentiel)	4080 (incinérées)	0
	Composts de déchets verts sans compter le compost utilisé dans Fertilys	10520	5680	4840
	Fertilys (Compost DV + Farine animale)	6480 dont 1300 de Farine animale*	Variable	Variable
PRO importés	Humival (Lisier de porc seché) provenant de Bretagne	700	700	
	Boues chaulées (provenant des Mureaux : 1430 t MS au total)	311	311	
	Fumier de Bovins de la région parisienne	350	350	
	Fientes de volailles de Bretagne	200	200	
	Farine animale	1300	Variable	Variable
	TOTAL	29145 +2861**	16716 + X1***	8810 + (qt Fertilys - X1)

* : Estimé sur la base de la collecte des OM sur le territoire * 30% de biodéchets* 30% de compost après compostage*60% de MS dans les composts
**: somme des quantités d'Humival, boues chaulées, fumiers bovins, farines animales et fientes de volailles produites hors territoire et importées
**** X1 : quantités de Fertilys épandues sur le territoire

La quantité totale de tous les PRO produits ou potentiellement produits ou importés sur le territoire est de **32006 t MS/an dont au moins 16716 t MS/an** restent sur le territoire (épandues ou incinérées), ce qui représente environ **52% de la quantité totale potentiellement disponible**, le reste étant exporté en dehors du territoire. La quantité totale des PRO importés et potentiellement utilisable (exemple de la farine animale : elle est mélangée avec le

compost de déchets verts pour avoir le produit Fertilys mais n'est pas épandue que sur le territoire) est de l'ordre de 2861 t MS/an.
Le cas des boues chaulées nécessite d'être précisé. En effet, les boues de STEP produits sur le territoire sont majoritairement chaulées à l'extérieur du territoire, essentiellement dans la station des Mureaux. Les stations du territoire ne récupèrent généralement pas les boues une fois chaulées pour les épandre chez les agriculteurs. Du coup, ces boues sont prises en charge par la station des Mureaux et sont épandues en dehors du territoire. Cependant simultanément, des quantités non négligeables (311t MS/an) de boues chaulées sont importées sur le territoire et sont épandues. Ces boues proviennent de la station des Mureaux. Ces quantités sont considérées comme importées, car les boues produites dans cette STEP proviennent à la fois des stations du territoire mais aussi probablement des boues de STEP d'autres communes importées pour le chaulage localisées en dehors du territoire.
Notons que ces quantités de PRO sont obtenues avec des précisions variables selon la catégorie de PRO et parfois selon la source d'information. Par exemple, les quantités de boues produites sont relativement précises et faciles à obtenir au niveau des STEP, de même que les quantités d'ordures ménagères produites, par contre il est délicat d'obtenir des chiffres précis concernant les fumiers de chevaux. En effet, les informations données par les éleveurs de chevaux qui sont, en majorité, des volumes de fumiers de chevaux par semaine ou par mois, ne permettent pas d'avoir une idée précise sur les quantités de fumiers produites. Ces volumes sont donnés à partir d'une estimation faite par l'éleveur basée essentiellement sur les bases du contrat paille/fumier fait avec l'entreprise qui collecte ces fumiers. Les densités utilisées dans les calculs des quantités de fumiers peuvent probablement varier d'un éleveur à un autre, ce qui rend les calculs moins précis.
Pour la plupart de ces PRO (hormis bien sûr les effluents d'élevage largement utilisés sur la ferme elle-même), la localisation des centres de traitements ou de valorisation est indépendante de la proximité des zones agricoles. La localisation de ces centres est liée directement aux sources des déchets à valoriser ou traiter. Exception faite des fumiers de chevaux qui constitue aujourd'hui un problème de gestion majeur sur le territoire, en l'absence de centres de traitements et de circuits bien définis.

3.2.1.1. *Effluents d'élevage*

Les effluents d'élevage (Figure 3.1 et Tableau 3.4) sont moins nombreux que les fumiers de chevaux car seuls trois élevages existent dans le territoire. Néanmoins, plusieurs catégories sont produites en particulier dans la ferme expérimentale de Grignon.

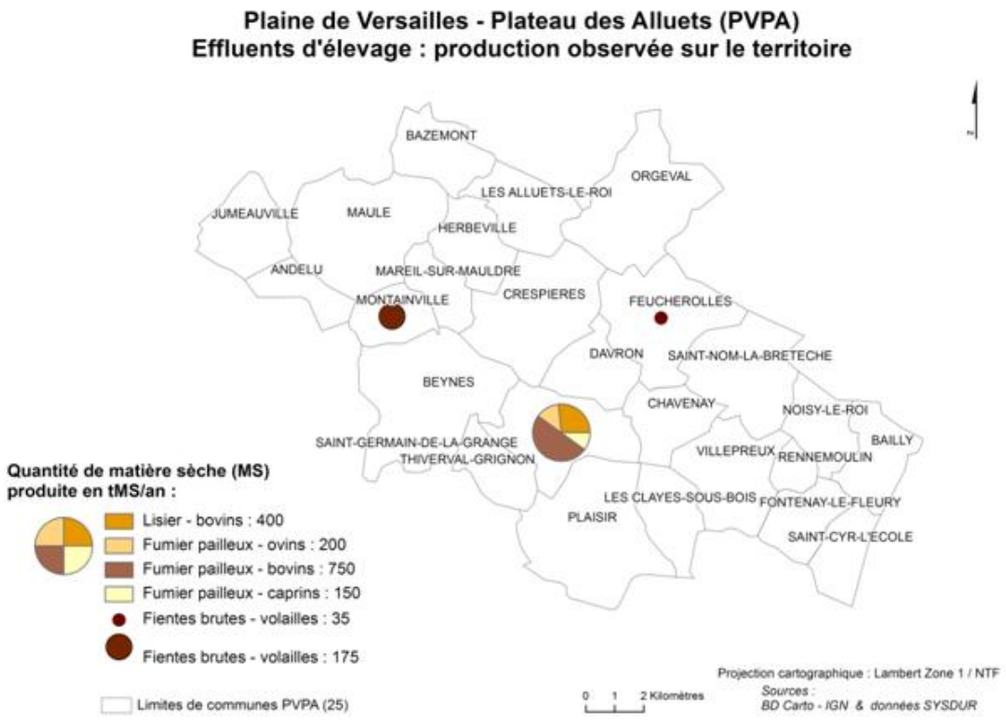


Figure 3.1: Quantités d'effluents d'élevage (hors fumiers de chevaux) produites sur le territoire et emplacement des différentes fermes

Tableau 3.4 : Synthèse des types d'élevage et les quantités d'effluents produits par les différentes sources

Eleveurs	Élevage	type d'élevage	Cheptel	Type d'effluents	Qt produites	teneur en MS	Qt produites	utilisation
					t MB/an ou m^3/an	%MB	t MS/an	
Ferme de Grignon	bovin	vaches laitières	120	Lisier	4000	10	400	sur place
	bovin	vaches laitières	120	Fumier Pailleux	2080	36	750	sur place
	ovin	brebis mères	500	Fumier Pailleux	400	50	200	sur place
	caprins	chèvres (fromage)	120	Fumier Pailleux	300	50	150	sur place
Feucherolles	volaille	poules pondeuses Bio	3000	Fientes Brutes	70	50	35	sur place
Montainville	volaille	Poules pondeuses	X	Fientes brutes	350	50	175	hors territoire
TOTAL					7200		1710	

3.2.1.2. *Fumiers de chevaux* :

L'estimation des flux de fumiers de chevaux est difficile. D'une part, les organismes producteurs sont variés, tant en statut (centre équestre *sensu stricto*, pensions de chevaux, fermes) qu'en taille (Figure 3.2). D'autre part, cette difficulté est due au mode de gestion de ces effluents par les centres équestres qui ont généralement des contrats pailles/Fumiers avec des agriculteurs ou des entreprises. En effet, les centres équestres changent assez souvent de prestataires selon les opportunités. Pour ce qui est des prestataires, les éleveurs de chevaux ne connaissent souvent pas les localisations des exploitations ou entreprises où leurs fumiers sont épandus et qui peuvent être situées en dehors du territoire. Nous disposons des informations nécessaires sur les volumes de fumiers produits par tous les éleveurs de chevaux, par contre, nous n'avons d'informations précises sur les lieux de valorisation de ces fumiers que pour 13 centres équestres qui, soit sont des éleveurs-agriculteurs, soit ont des contrats paille/fumier avec des agriculteurs voisins. Pour les autres, nous savons seulement que les quantités de fumiers produites par 11 centres équestres sont valorisées en dehors du territoire, sans savoir exactement où ces PRO sont épandus (Tableau 3.5).

Remarquons qu'aujourd'hui, les fumiers sur copeaux qui correspondent à certains types d'activités équestres (type chevaux de course) sont tous exportés grâce aux contrats qui lient les éleveurs aux entreprises qui fournissent les copeaux de bois.

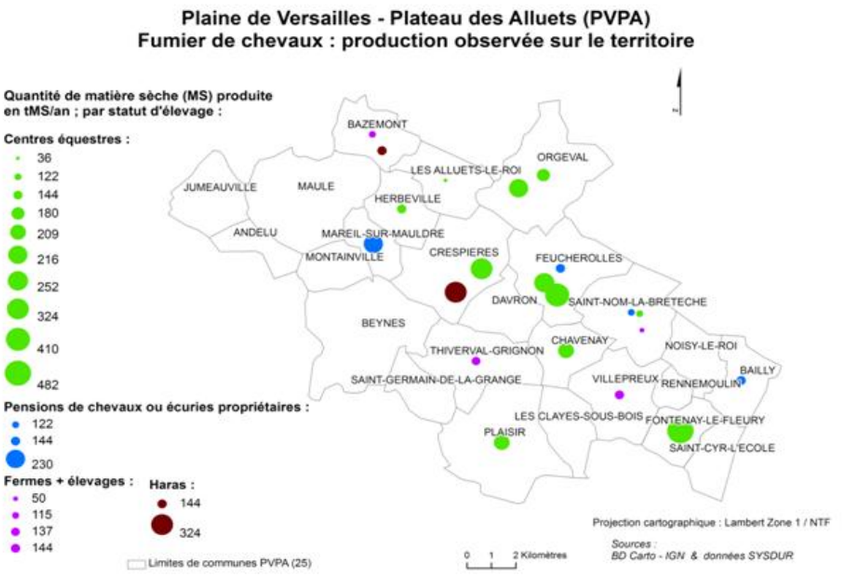


Figure 3.2: Quantités de fumiers de chevaux produites sur le territoire et emplacement des différents centres équestres

Tableau 3.5. : Inventaire détaillé des quantités de fumiers de chevaux produites. Les calculs sont faits sur la base de 36 semaines de présence en box, une densité de 0.4 pour les fumiers frais et une teneur en MS de 50%

Statut	Lieu	Type fumier	Nbres chevaux	Nbres boxes	Volumes déclarés par les éleveurs ou estimé	Quantités estimées	
					m^3/semaine	tMB/an	tMS/an
Centre équestre	Les Alluets le Roi	Fumiers très pailleux	10	10	5	72	36
	Plaisir		95	35	29	418	209
	Chavenay		45	34	29	418	209
	Orgeval		30	30	25	360	180
	Orgeval		37	37	30	432	216
	Fontenay		80	80	67	965	482
	Feucherolles		70	70	57	821	410
	Crespieres		60	60	45	648	324
	Feucherolles		50	50	35	504	252
	Herbeville		25	25	20	288	144
	Saint Nom		30	22	17	245	122
pension de chevaux ou écurie de propriétaire	Saint Nom	Fumiers très pailleux	22	22	17	245	122
	Mauldre		46	46	32	461	230
	Bailly		25	25	20	288	144
	Feucherolles		25	25	20	288	144
Ferme + élevage	Bazemont	Fumiers très pailleux	57	22	16	230	115
	Saint Nom		50	15	7	101	50
	Grignon		25	25	19	274	137
	Bailly		10	4	0	0	0
	Villepreux		30	28	20	288	144
	Crespieres		5	5	0	0	0
Haras	Bazemont	Fumier sur copeaux	25	25	20	288	144
	Crespières	Fumier sur copeaux	60	60	45	648	324
Total			**912**	**755**	**575**	**8280**	**4140**

3.2.1.3. Boue d'épuration urbaine :

Les eaux usées sont collectées dans 7 stations d'épuration (STEP) dispersées sur le territoire (Figure 3.3) à l'exception de :

- 4 communes (Rennemoulin, Andelu, Davron et Herbeville) où le traitement des eaux usées est fait individuellement en fosses septiques, les quantités produites par ces communes seront considérées comme restantes sur le territoire.
- 6 communes (Maule, Mareil sur Mauldre, Montainville, Orgeval, Les Alluets le Roi et Bazemont) dont les eaux usées sont traitées dans des stations périphériques au territoire.

Par ailleurs les stations du territoire collectent et traitent des eaux usées de communes hors territoire :

- La station de Bailly collecte les eaux de Versailles

Dans notre inventaire (tableau 3.6), est comptabilisée la totalité des boues produites par les stations qui traitent les eaux des communes du territoire ; cela inclut des boues provenant de communes hors territoire et traitées dans les stations du territoire (cas de Versailles), mais aussi la totalité des boues des stations hors territoire, mais qui traitent les eaux d'une ou plusieurs communes du territoire (cas de Morainvilliers par exemple).

Les 7 stations d'épuration ont des capacités très différentes. Le système de production des boues sur le territoire se base cependant toujours sur le processus de digestion aérobie. Le produit est donc une boue digérée qui subit

ensuite, après déshydratation, soit un chaulage soit un séchage en fonction du mode de fonctionnement de chaque station. Le chaulage est fait sur la station des Mureaux ou de Villiers Saint Frédéric.

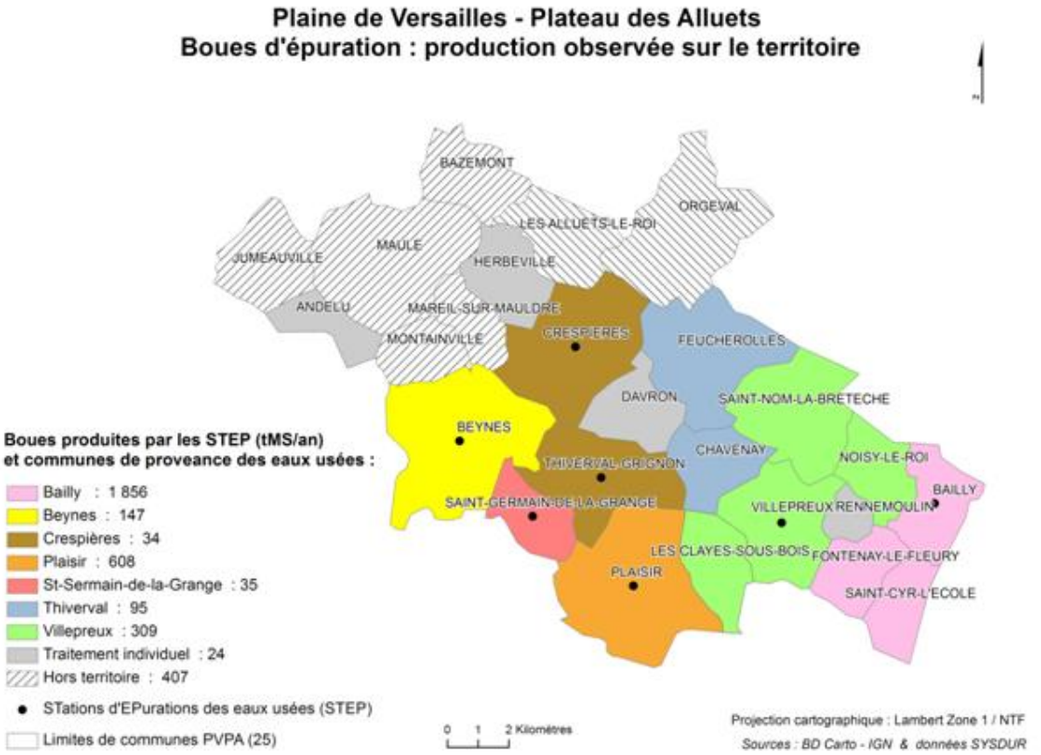


Figure 3.3: Organisation des communes dans la gestion des boues et les quantités produites par station d'épuration

Les quantités de boues produites sur le territoire sont assez importantes, en y incluant celles issues du traitement des eaux de villes comme Versailles, mais seulement 27% sont épandues. Les importations de boues sur le territoire sont cependant équivalentes voire supérieures à la production locale : ce qui peut paraitre paradoxal provient du fait qu'io s'agit de boues chaulées importées de la station d'épuration des Mureaux (hors territoire *sensu stricto*). Les boues produites sur la PVPA ne sont généralement pas chaulées puisque les STEP, de petite taille, ne peuvent pas se permettre de faire les investissements nécesssaires. Certaines STEP comme Villepreux envoient leurs boues à la station d'épuration des Mureaux pour les chauler. Une fois chaulées, les quantités de boues, sont ensuite soient reprises en charge et valorisées par les stations du territoire, soit valorisées par la station sous-traitante.

Tableau 3.6 : Synthèse des productions de boue sur le territoire

Commune du territoire ou limitrophe	Station	Type de Boues	Tonnage produit	Quantité restant sur le territoire	Quantités sortant du territoire			
				Qt épandue	Qt incinérée	Qt compostée	Qt chaulée et épandues à l'extérieur du territoire	Qt séchée
			T MS /an	T MS /an	T MS /an	T MS /an	T MS /an	T MS /an
Maule, Mareil sur Mauldre, Montainville	Aulnay sur Mauldre*	Boues Pâteuses chaulées	168	66	0	0	102	0
Plaisir, Les Clayes sous bois	Plaisir	Boues séchées	608	608	0	0	0	0
Villepreux, Les Clayes sous bois, Saint Nom la Breteche, Noisy le roi	Villepreux	boues pâteuses chaulées	309	245	0	64	0	0
Morainvilliers*, Orgeval, Les Alluets le Roi	Morainvilliers*	boues pâteuses chaulées	195	0	180	0	15	0
Bazemont, Nezel*, La Falaise*	Nezel*	boues pâteuses chaulées	33	0		0	33	0
Beynes	Beynes	Boues pâteuses	147	0	93	0	0	54
Crespieres, Thiverval Grignon	Crespieres	boues pâteuses chaulées	34	0	0	0	34	0
Saint Germain de la Grange	Saint Germain de la Grange	boues pâteuses chaulées	35	0	0	0	35	0
Chavenay, Feucherolles	Thiverval Grignon	Boues séchées	95	0	0	0	0	95
Bailly, Saint Cyr l'école, Fontenay le Fleury, Versailles*	Bailly	Boues pâteuses	1856	0	0	0	0	1856
Davron			6	6	0	0	0	0
Herbeville	Pas de STEP	Fosses sceptiques	6	6	0	0	0	0
Andelu			10	10	0	0	0	0
Rennemoulin			2	2	0	0	0	0
Jumeauville	Arnouvilles les Mantes*	Boues pâteuses	11	0	0	0	11	0
TOTAL			3515	943+ 311**	273	64	230	2005

*Communes ou step hors territoire

** Quantités de boues chaulées épandues et importées de la station des Mureaux

Les boues produites sur le territoire sont donc chaulées dans la plupart des cas mais ne sont pas nécessairement prises en charge par les stations locales. Il nous est donc impossible de quantifier avec exactitude, le devenir des boues produites sur le territoire, qui sont ensuite chaulées, et épandues sur le territoire ou en dehors. Donc, une partie des quantités importées de boues chaulées (311t MS/an) pourrait provenir des stations traitant les eaux usées du territoire (230 t MS/ha). Les boues chaulées sont préférées par les agriculteurs grâce à leur apport en chaux qui permet d'augmenter ou entretenir le pH de sols comme les luvisols très abondants sur le territoire. Ces sols limoneux décarbonatés ont en effet tendance à s'acidifier et nécessitent des chaulages d'entretien. Pour subvenir à ces besoins, les agriculteurs vont donc chercher à épandre des boues chaulées provenant de la station sous-traitante.

3.2.1.4. Ordures ménagères et composts de biodéchets :

Les ordures ménagères sont centralisées sur le territoire (Figure 3.4), même si leur collecte relève de différents gestionnaires. Elles ne sont par contre pas valorisées en agriculture. Elles sont aujourd'hui complètement incinérées. On rappelle que l'objectif à atteindre par le Grenelle de l'environnement est de 45% de déchets recyclés en 2015.
Le tonnage potentiel de composts de biodéchets résulte du calcul suivant :
255169 (Nombre d'habitants du territoire en 2010) * 296 kg MB/habitant-an * 0.3 (30% de biodéchets dans les OM) * 0.3 (rendement de 30% de compost à l'issue du compostage) * 0.6 (teneur en matière sèche du compost final)= 4080 t MS/an de compost de biodéchets potentiellement produits. La réception de 75550 t MB/an provenant des communes du territoire à l'usine d'incinération confirme les résultats calculés.

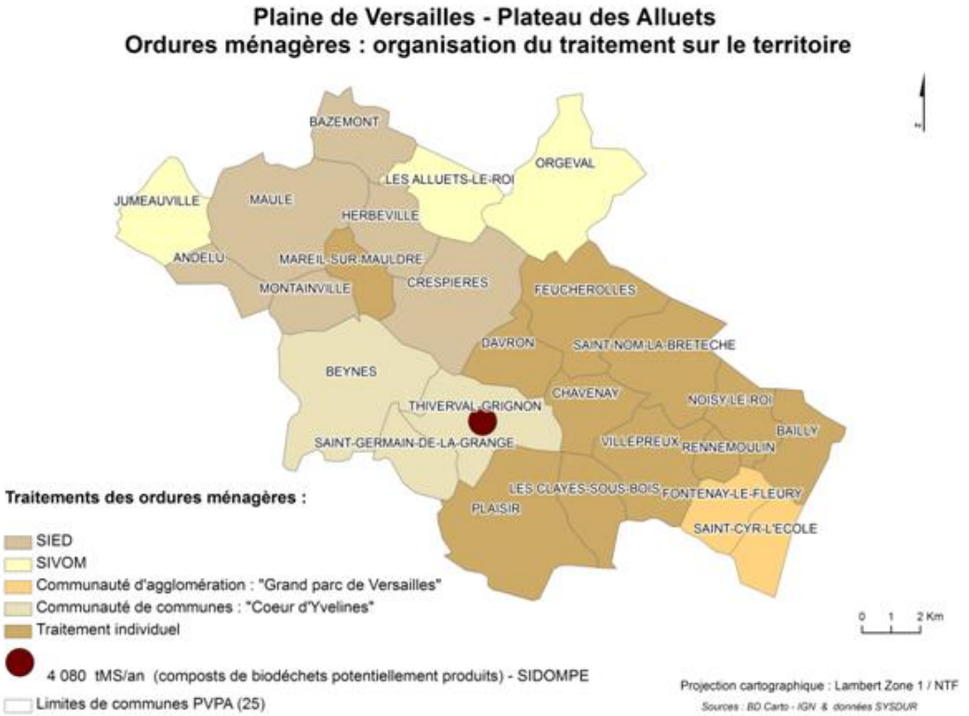


Figure 3.4: Organisation des communes dans la gestion des ordures ménagères et les quantités produites sur le territoire

3.2.1.5. Composts de Déchets verts et Fertilys:

Les déchets verts (Figure 3.5) sont également collectés et traités dans 3 plateformes de compostage de capacités variables (Tableau 3.7). Les deux plateformes de compostage de Versailles et de Saint-Nom la Bretèche ont un mode de gestion différent de la plateforme de compostage de Grignon. En effet, cette dernière dispose d'un système d'aération forcée. Le tas de déchets verts est aéré de l'intérieur, ce qui accélère le processus du compostage. La durée de compostage dans cette plateforme est d'environ deux mois.
Les quantités de déchets verts compostées par an dans cette plateforme sont deux fois plus importantes que les quantités traitées à la plateforme de Saint-Nom la Bretèche et quatre fois plus importantes que les quantités produites à la plateforme de Versailles. Un criblage est fait à la fin du procédé de compostage.
Pour les deux autres plateformes de compostage, le procédé de compostage est classique. Deux à trois retournements avec arrosage sont faits pendant la durée du traitement, qui varie entre 8 et 12 mois. Un criblage est effectué entre la phase de fermentation et de maturation.

La totalité des composts produits sur le territoire représente 15250 t MS. La plateforme de Thiverval utilise 4730 t MS de compost pour produire du Fertilys, d'où un total de 10520 t MS de composts de DV restant sur le territoire. Le Fertilys est un mélange de farine animale et de compost de DV (1/5 farine + 4/5 compost). La production totale de Fertilys est de 6480 t MS soit 1300 t MS de farine et 5180 t MS de compost de DV provenant du territoire (4730 t MS) et d'autres plates-formes (450 t MS).

Tableau 3.7 : Caractéristiques des procédés de compostage des déchets verts et tonnages produits

	Versailles –St Cyr	Saint Nom la Bretèche	Thiverval-Grignon
DV traités (t MB/an)	6000	9025	25070
Composts produits tMB/an tMS/an (avec 60% MS)	3250 1950	5870 3520	16300 9780
Procédé: Durée, aeration	8-12 mois, 2-3 retournements	8-12 mois, 2-3 retournements	2 mois, Aération forcée

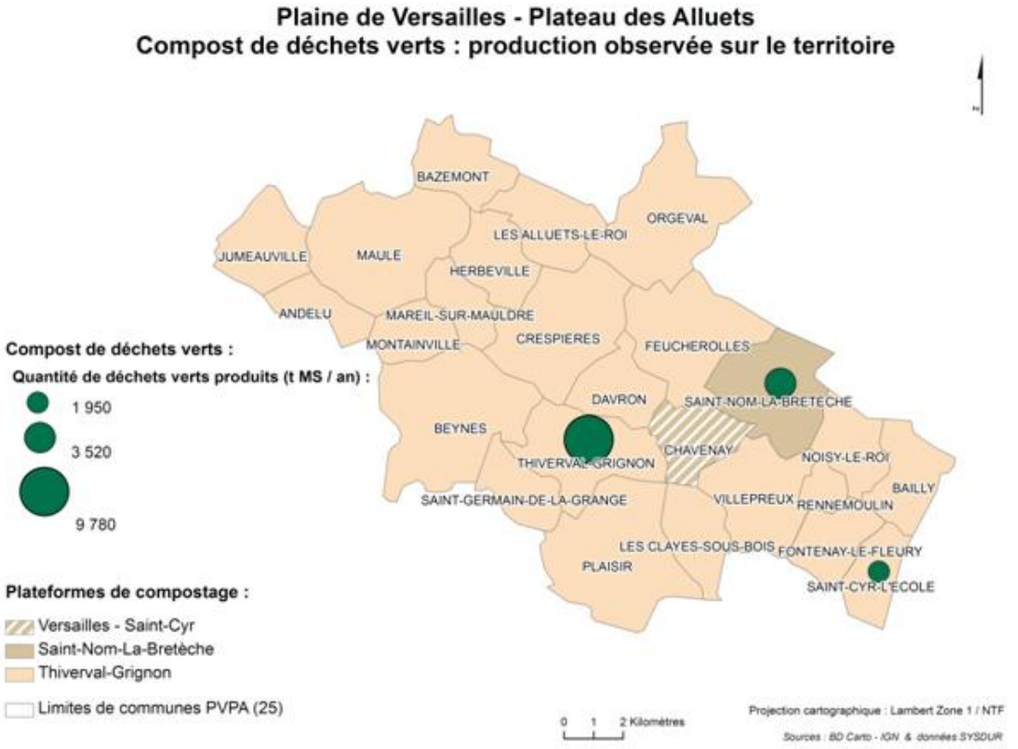


Figure 3.5 : Organisation des communes dans la gestion des déchets verts et les quantités de composts produites sur le territoire

3.2.2. Résultats de caractérisation des PRO produits et/ou consommés sur le territoire :

Dans l'objectif de réduire l'utilisation des engrais azotés par l'utilisation de PRO, il est primordial d'étudier la qualité des PRO utilisés ou potentiellement utilisables en agriculture. Il est donc important de voir si ces PRO sont utilisables ou pas (innocuité) et d'estimer leurs valeurs agronomiques c'est-à-dire estimer leurs valeurs fertilisantes (disponibilité des éléments fertilisants, en particulier leur azote) et amendantes (capacité à entretenir les stocks de matière organique dans les sols). Les caractérisations devraient permettre d'aboutir à une typologie locale des différents PRO. Certains, ayant une valeur fertilisante azotée intéressante, devraient être utilisés dans nos scénarios

de substitution des engrais par les PRO. Ceux qui ont une valeur amendante intéressante seront privilégiés pour les scénarios d'entretien et d'augmentation des teneurs en MO des sols.
Nous détaillerons dans ce paragraphe les caractéristiques importantes des matières organiques des PRO.

3.2.2.1 Innocuité des PRO :

L'innocuité des PRO n'est basée ici que sur leur teneur en éléments traces métalliques (ETM). Un seul échantillon composite est broyé et analysé. Les concentrations sont comparées aux critères réglementaires (Tableau 3.8) : (i) Arrêté du 8 Janvier 1998 pour la boue ; (ii) Norme 44-051 pour les fumiers et composts

La boue chaulée n'a pas pu être échantillonnée en quantité suffisante pour analyser les ETM et seules les analyses agronomiques de cette boue chaulée ont été effectuées. En effet, nous avons eu des problèmes pour avoir des échantillons de ces boues du fait d'un refus de la part de la station d'épuration productrice de ces boues.

Nous ne présenterons également pas des résultats d'analyse des fumiers ovins et caprins. Ces deux types de fumiers n'ont pas été analysés puisque les quantités produites sur le territoire sont très faibles et ne sont pas utilisés en dehors de la ferme productrice de ces PRO. Mis à part ces 3 matrices, les ETM ont été analysés sur tous les autres PRO disponibles sur le territoire qui ont été échantillonnés. Leurs teneurs en ETM sont conformes aux critères réglementaires, ce qui tendrait à établir leur innocuité (Tableau 3.8).

Tableau 3.8 : teneurs en ETM dans les différents PRO ; concentrations maximales autorisées pour les amendements organiques (NFU 44 051) et les boues d'épuration (arrêté du 8 Janvier 1998).

	Cr	**Ni**	**Pb**	**Zn**	**Hg**	**Cu**	**Cd**	**As**	**Se**
	(mg/kg MS)								
Norme NFU 44-051	*120*	*60*	*180*	*600*	*2*	*300*	*3*	*18*	*12*
Fumier bovin	4.8	2.7	6.81	377	0.0	40.3	0.0	0.0	0.0
Fumier de chevaux pailleux	3.7	0.0	0.0	56.4	0.0	12.4	0.0	0.0	0.0
Fumier de chevaux composté	27	12.6	43.7	169	0.1	35.6	0.0	0.0	0.0
Fumier de chevaux sur copeaux	3.91	2.9	0.0	81.9	0.0	28.1	0.0	0.0	0.0
Fientes volailles Bretagne	10.0	5.7	0.7	381.3	0.0	66.9	0.0	0.6	0.8
Fientes volailles compostées	18.1	11.3	3.6	514.3	0.0	105.6	0.43	1.04	1.1
Humival	33.4	16.5	15.5	659.0	0.2	177.7	0.0	2.7	1.7
Fertilys	25.4	10.9	155.6	165.3	0.1	39.3	0.0	4.9	0.4
Compost DV Versailles	25.1	10.8	118.5	177.8	0.2	43.7	0.0	3.5	0.2
Compost DV Grignon	20.8	8.9	49.4	131	0.1	34.8	0.0	0.0	0.0
Arrêté 8 janvier 1998	*1000*	*200*	*800*	*3000*	*10*	*1000*	*10*	*Pas de restriction*	*Pas de restriction*
Boue séchée	232.5	32.5	31.6	581.3	0.7	265.0	0.44	1.5	2.5

3.2.2.2. Caractérisation agronomique des PRO :

✓ *Caractéristiques générales:*

Les résultats des caractéristiques physico-chimiques des PRO sont présentés dans le tableau 3.9. Les boues séchées sont les PRO les plus pourvus en N total avec une teneur de 7.8 % MS. Ensuite viennent le lisier de porc séché (Humival) et les boues chaulées avec des teneurs de 5.2 et 4.5% MS. Les fientes de volailles ont également des

teneurs en azote total importantes. Ces effluents d'élevage sont connus pour être des sources d'azote importante pour les cultures (Hacala et al., 2001). Le fumier de bovins présente une teneur en N total classique également (3% MS). Les autres PRO ont des teneurs inférieures, ceci étant attendu puisque les composts et fumiers sont considérés surtout comme des amendements organiques. De plus les résultats de teneurs totales en N sont insuffisants pour prédire la valeur fertilisante de ces PRO qui dépend de la vitesse de minéralisation de cet azote.
Les boues sont également les PRO les plus concentrés en phosphore, ainsi que les fientes de volailles. Ces fientes sont également très pourvues en potassium et surtout après compostage. Les fumiers de chevaux et le fumier de bovins sont également riches en potassium. Même si ces éléments ne font pas encore l'objet, du moins dans notre région, d'une limitation des quantités à épandre, il reste que cette richesse en phosphore des fientes est un élément dont il faut tenir compte lors des scénarios de substitution en particulier. Exception faite des boues séchées et d'Humival, tous les PRO ont un pH basique. Les boues chaulées restent celles qui ont le pH le plus élevé puisqu'elles sont les plus riches en calcium.

Parmi les PRO commercialisés, Humival (lisier de porc séché) a des teneurs en MO, Corg et en éléments majeurs (exception faite du potassium) plus importantes que Fertilys (4/5 compost de DV+1/5 Farine animale).
Les teneurs en matières sèches des fumiers de chevaux de nos échantillons sont relativement basses par rapport aux teneurs en matières sèches indiquées dans la littérature. Les échantillons ont été collectés dans des conditions humides ce qui aurait pu avoir un impact sur les teneurs mesurées.

Les fumiers de chevaux et les fumiers de bovins sont les PRO ayant les teneurs en matières organiques les plus importantes. Les teneurs en MO et Corg sont très variables selon les litières utilisées dans les boxes des chevaux (paille ou copeaux) et du degré de maturité des fumiers (composté ou frais). De façon générale, le compostage diminue les teneurs en matière organique. Ceci s'observe bien dans le cas du fumier de cheval. De même, les composts de DV ont des teneurs plus faibles en MO que les matières non compostés. En revanche, le procédé de compostage permet une concentration des éléments majeurs dans le produit. Les teneurs en azote total et minéral, en phosphore et potassium sont plus importantes pour le compost de fumiers de chevaux que le reste des fumiers frais dans notre cas.

Les deux composts de déchets verts ont des compositions différentes. Les teneurs en matière organique et en Corg du compost prélevé à la plateforme de compostage de Versailles sont moins importantes que dans celui prélevé à Grignon. Par contre, les teneurs en azote total, minéral, en phosphore et en potassium sont plus importantes. Ceci est très probablement dû à la durée de compostage : 8 à 12 mois pour le compost prélevé à la plateforme de compostage de Versailles et 2 mois pour le compost de la plateforme de compostage de Grignon.

Les teneurs en MO, Ntotal et Corg sont plus importantes pour les boues séchées que pour les boues chaulées. Ces différences sont dues probablement au procédé de chaulage des boues qui dilue les teneurs en éléments dans les boues.

Tableau 3.9 : Caractéristiques générales des PRO échantillonnés (3 échantillons analysés par PRO)

PRO	MS	Corg	Norg	$N\text{-}NO_3$ PRO frais	$N\text{-}NH_4$ PRO frais	Ntot	MO	C/Norg	P_2O_5	K	$CaCO_3$	pH
	%MB	%MS	%MS	mg/kg MS	mg/kg MS	%MS	%MS		%MS	%MS	%MS	
Fumier bovin	36.5 (1.4)	40.0 (2.4)	2.9 (0.3)	0.8 (0.2)	204.8 (20.6)	3.0 (0.0)	75.1 (0.1)	13.8 (0.8)	1.9 (0.1)	4.3 (0.8)	0.7 (0.0)	8.7 (0.9)
Fumier de chevaux sur copeaux	34.0 (1.7)	42.8 (1.5)	1.3 (0.2)	0.0 (0.0)	300.6 (15.9)	1.3 (0.0)	81.2 (0.2)	32.9 (1.2)	1.0 (0.0)	2.7 (0.2)	5.0 (0.2)	8.7 (0.3)
Fumiers chevaux pailleux	35.0 (0.0)	40.6 (2.6)	1.6 (0.3)	0.5 (0.1)	56.5 (2.8)	1.6 (0.0)	73.9 (0.7)	25.4 (1.8)	0.9 (0.1)	2.5 (0.5)	0.6 (0.0)	9.1 (0.2)
Fumier de chevaux composté	44.3 (6.0)	19.4 (0.1)	1.4 (0.0)	0.8 (0.3)	168.9 (48.6)	1.4 (0.0)	36.6 (0.2)	13.9 (0.1)	1.3 (0.0)	3.0 (0.1)	1.7 (0.0)	8.3 (0.1)
Fientes volailles Bretagne	48.7 (0.9)	34.4 (0.6)	3.7 (0.2)	0.0 (0.0)	2331.1 (168.5)	4.0 (0.2)	70.0 (0.2)	9.3 (0.4)	4.4 (0.3)	2.7 (0.3)	8.8 (3.6)	7.6 (0 .4)
Fientes volailles compostées	41.9 (2.6)	23.8 (2.0)	2.7 (0.5)	0.0 (0.0)	1111.1 (102.8)	2.8 (0.6)	35.3 (0.6)	8.8 (1.8)	5.5 (1.5)	5.7 (2.6)	21.5 (4.7)	9.2 (0.7)
Humival	88.0 (3.2)	40.7 (0.1)	5.1 (0.3)	5.7 (0.1)	575.8 (27.1)	5.2 (0.3)	73.4 (0.1)	8.0 (0.5)	4.7 (0.2)	1.2 (0.4)	3.2 (1.5)	6.5 (0.1)
Boues séchées	88.5 (0.1)	39.9 (7.9)	6.9 (1.5)	43.9 (0.0)	2380.9 (37.5)	7.2 (0.2)	76.6 (0.1)	5.8 (0.1)	5.2 (2.4)	1.0 (0.0)	1.1 (0.5)	5.9 (0.1)
Boues chaulées	67.1 (5.9)	26.3 (0.0)	4.4 (0.0)	1.3 (0.9)	140.8 (34.4)	4.5 (0.0)	53.0 (0.6)	6.0 (0.0)	8.5 (0.0)	2.1 (0.0)	35.3 (0.0)	10.5 (0.0)
Fertilys (Compost DV+Farine animale)	48.9 (0.2)	25.6 (1.2)	1.5 (0.1)	9.7 (0.5)	2.0 (0.2)	1.5 (0.1)	47.1 (0.2)	17.1 (1.5)	2.0 (0.5)	1.5 (0.4)	2.5 (0.9)	7.6 (0.3)
Compost DV Versailles	58.4 (0.9)	26.7 (3.9)	1.7 (0.1)	108.3 (4.2)	272.3 (19.4)	1.8 (0.1)	35.9 (0.4)	15.7 (2.8)	0.7 (0.1)	1.8 (0.1)	3.2 (1.3)	7.7 (0.1)
Compost DV Grignon	35.9 (0.3)	33.4 (1.6)	1.4 (0.4)	0.0 (0.0)	1.2 (0.3)	1.4 (0.0)	62.9 (0.5)	23.9 (2.3)	0.5 (0.0)	1.1 (0.0)	4.5 (0.2)	8.2 (0.5)

Comme précédemment pour l'azote, les teneurs en MO ne préjugent en rien de la valeur amendante des PRO, laquelle dépend du degré de stabilité de leur MO.

✓ *Valeur amendante des PRO (biodégradabilité du C et calcul de l'ISMO) :*

La valeur amendante des PRO est définie comme leur capacité à entretenir les teneurs et stocks de MO dans les sols. Elle dépend de la vitesse de dégradation du C organique des PRO dans les sols après leur épandage. Les PRO définis comme des amendements organiques dans les normes NFU 44 051 (amendements organiques), comme les fumiers et les composts, devraient avoir les propriétés amendantes les plus intéressantes.
Cette vitesse d'évolution dans les sols après épandage peut être appréhendée par la mesure de la minéralisation du C organique des PRO au cours d'incubations en mélange dans un sol en conditions contrôlées de laboratoire. Cette approche expérimentale fait l'objet d'une norme de caractérisation des amendements organiques (XPU 44 163) qui peut être étendue à tout type de PRO. La biodégradabilité de l'ensemble des PRO échantillonnés dans notre étude a été caractérisée selon cette méthode. Les résultats sont présentés dans la Figure 3.6. Pour l'ensemble des PRO, les cinétiques de minéralisation du C organique atteignent une asymptote de minéralisation après 30 jours d'incubation environ.

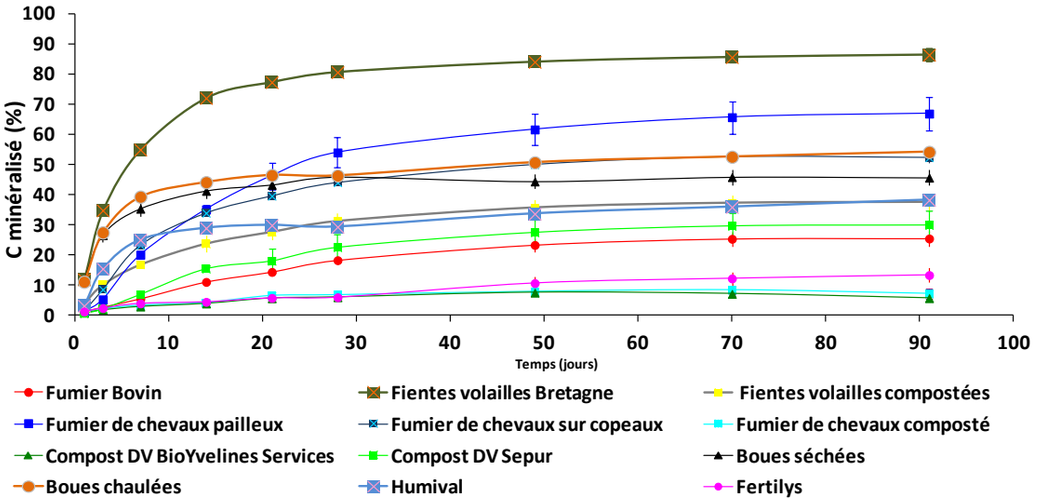


Figure 3.6 : Cinétiques de minéralisation du C des PRO au cours d'incubations en conditions contrôlées de laboratoire

Les boues d'épuration, les fientes de volaille, les fumiers de chevaux sur paille ou copeaux sont très rapidement minéralisables. En fin d'incubation, de 50 à 90% du C organique de ces PRO est minéralisé. Ces PRO sont caractérisés par une MO très peu stable qui contribuera peu à l'entretien humique des sols. En revanche, les produits compostés (fumier de chevaux composté, compost de DV, Fertilys) sont beaucoup plus stables (7 à 37% de C minéralisé en fin d'incubation), après que la fraction facilement biodégradable de ces PRO se soit minéralisée au cours du compostage. Le fumier de bovins est également assez stable avec 25% de C minéralisé en fin d'incubation.
L'indice ISMO calculé sur la base des résultats de fractions biochimiques et du C minéralisé après 3 jours d'incubation est un indicateur de la valeur amendante des PRO. Les valeurs trouvées s'étalent de 0 à 86% de la MO totale des PRO (Tableau 3.10). Cet indicateur dont le calcul est standardisé (XPU 44 162, AFNOR, 2009) est plus rapide à obtenir et permet de s'affranchir des incubations couteuses en temps. Ces valeurs d'ISMO sont bien corrélées négativement avec l'intensité de la minéralisation en fin d'incubation (R^2=0.75). C'est bien un indicateur du C restant à long terme dans le sol, donc de la valeur amendante des PRO. Cependant certains PRO se caractérisent par une fraction biodégradable assez importante mais présente un potentiel humique relativement important : c'est le cas par exemple des fumiers de chevaux.

Tableau 3.10 : Caractéristiques biochimiques (% MO) et indice de stabilité de la matière organique (ISMO) des PRO (% MO ou C)

	Soluble Eau	**Soluble NDF**	**Hemicellulose**	**Cellulose**	**Lignines**	**C minéralisé 3j**	**ISMO**
	%MO	%MO	%MO	%MO	%MO	% Corg	%MO ou Corg
Fumier bovin	50.1	9.6	12.2	16.6	11.4	2,8	72,5
Fumier de chevaux sur copeaux	55.0	3.9	6.5	26.3	8.3	8,6	54.7
Fumier de chevaux pailleux	39.4	4.5	47.2	1.9	7.0	5,4	58,7
Fumier de chevaux composté	41.8	18.0	6.1	12.6	21.5	2,2	81,9
Fientes volailles Bretagne	46.5	15.7	21.5	14.4	1.9	34,8	- 6,0
Fientes volailles compostées	34.3	23.5	12.0	18.9	11.3	10,3	53,9
Humival	72.2	10.6	7.3	5.6	4.2	15,5	52,1
Boue séchée	62.3	18.5	13.6	1.6	4.0	26,6	26,1
Fertilys	69.2	8.7	3.5	6.2	12.4	2,5	85,2
Compost DV Versailles	28.9	23.5	4.9	11.5	31.2	1,9	85,9
Compost DV Grignon	41.6	12.6	3.9	19.6	22.2	2,3	78

En résumé, les produits les plus efficaces en termes de propriétés amendantes des sols (ISMO >70% MO) seront :

- Les fumiers de chevaux compostés
- Le fumier de bovins
- Les composts de déchets verts
- Le Fertilys (compost DV+farine animale)

Certains PRO contribueront très peu à l'entretien humique des sols (ISMO<30) :

- Les boues
- Les fientes non compostées

Les derniers PRO ont des potentiels humiques intermédiaires (37 à 59%) :

- Les fumiers de chevaux pailleux ou sur copeaux
- Les fientes de volaille compostées
- L'Humival (lisier séché)

✓ *Valeur fertilisante azotée des PRO :*

La valeur fertilisante des PRO est estimée au cours d'incubations similaires à celles utilisées pour caractériser la biodégradabilité du C organique des PRO. Au cours de ces incubations en conditions contrôlées de laboratoire, est mesurée la cinétique de minéralisation du N organique des PRO (Figure 3.7). On distingue 3 types de PRO :

- Ceux dont le N organique se minéralise rapidement : on observe une augmentation de la quantité de N minéral en fonction du temps au cours des incubations. C'est le cas pour les boues d'épuration, les fientes de volailles, l'Humival (lisier séché). Ce sont les PRO qui ont les C/N les plus bas.
- Ceux qui provoquent une ré-organisation de l'azote. La courbe de minéralisation est entièrement négative. Pour dégrader la matière organique de ces PRO, les microorganismes du sol puisent dans les réserves de N minéral du sol dont la disponibilité diminue. C'est observé pour les PRO qui ont les C/N les plus élevés : les fumiers de chevaux pailleux ou sur copeaux et le compost de DV de Grignon.
- Ceux dont la minéralisation est très faible. La cinétique de minéralisation reste proche de l'axe des abscisses. C'est le cas des composts de DV, du fumier de bovin, du fumier de cheval composté, du Fertilys (mélange compost DV et farine animale). Ces PRO ont des MO plus stabilisées, en particulier à la suite du compostage.

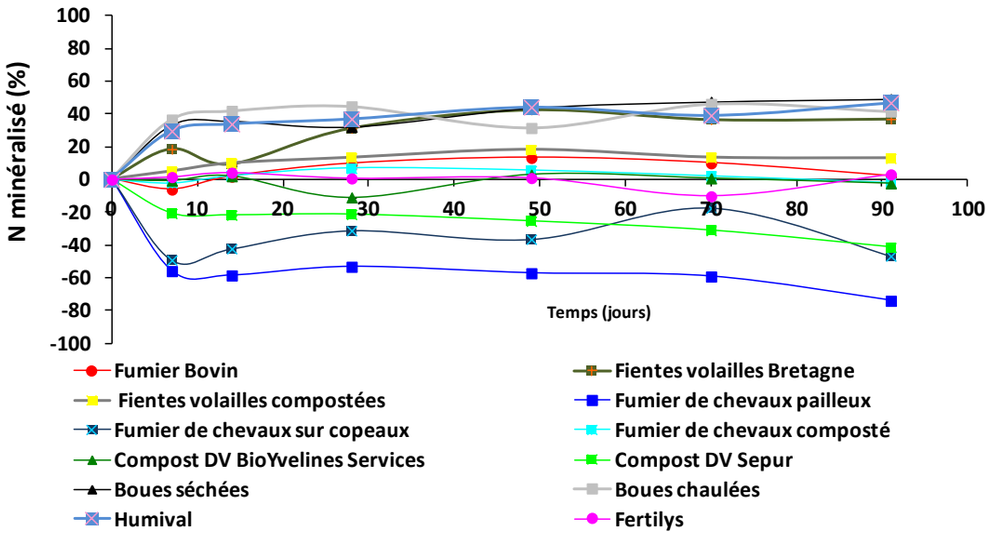


Figure 3.7. Dynamique de minéralisation de l'azote organique au cours d'incubation des différents PRO en mélange dans un sol et en conditions contrôlées de laboratoire

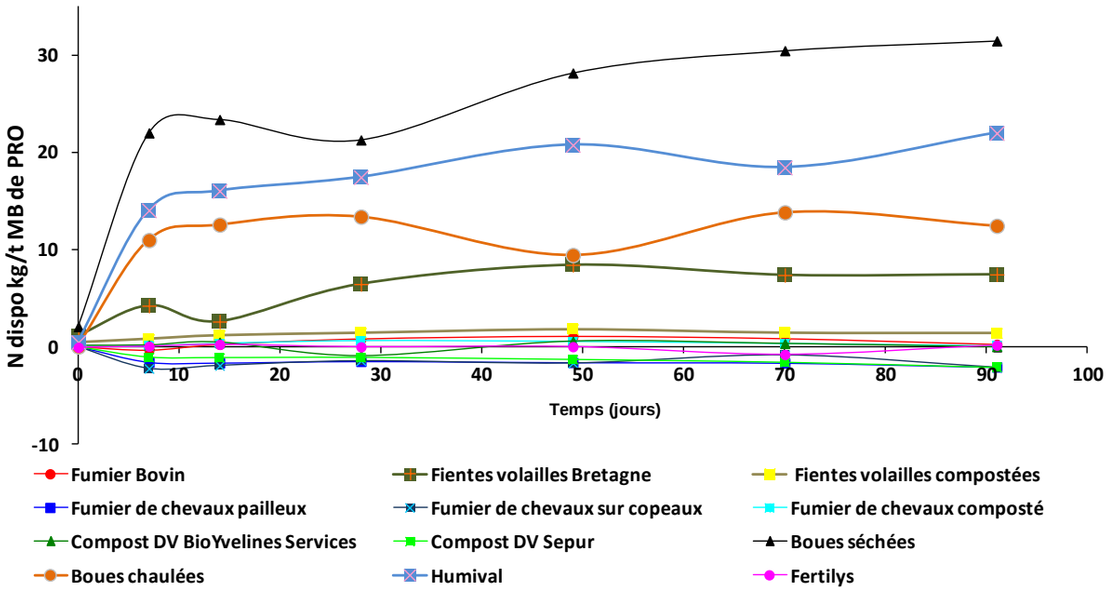


Figure 3.8. Evolution de l'azote disponible accumulée sur la période d'incubation des différents PRO

La figure 3.8 représente la véritable valeur fertilisante des PRO étudiés (N minéral initial + la minéralisation de l'azote organique). On constate que les quantités initiales d'azote minéral dans les différents PRO incubés sont faibles. La figure 3.8 représente donc la dynamique de production de N minéral pour une masse de PRO apportée. On retrouve :

- Les PRO qui se caractérisent par **une valeur fertilisante intéressante** : les boues, les fientes de volaille, Humival (lisier séché) qui vont ensuite servir à l'élaboration des scénarios de substitution des engrais azotés par les PRO :

- Les deux boues ont une forte valeur fertilisante azotée. Elles sont très intéressantes à utiliser pour les scénarios de substitution des engrais azotés par l'utilisation de PRO. La valeur fertilisante azotée est plus importante pour la boue séchée que pour la boue chaulée (32kg N/tMB pour la boue séchée et 13kg N/tMB pour la boue chaulée), ceci en raison de la dilution du N organique par l'apport de chaux au moment du traitement de la boue.
- Les fientes de volailles sont aussi très intéressantes comme substituants des engrais azotés. En effet, les fientes de volailles non compostées (fientes séchées) ont une forte valeur fertilisante azotée (8 kgN/tMB) soit 37% du Norg minéralisé (Tableau 3.11). Les fientes étudiées ici présentent un pourcentage de Norg élevé et relativement peu de Nmin (3% du Ntot). D'après la référence de l'institut de l'élevage, les formes minérales représentent la majeure partie du N total (70%) ce qui n'est pas notre cas. Les faibles proportions de N minéral sont probablement dues au procédé de séchage de ces fientes. Le pourcentage du Norg minéralisé est aussi moins important que trouvé dans les références. Le compostage diminue également la valeur fertilisante azotée des fientes de volailles, ce qui est en adéquation avec la référence de l'institut d'élevage (environ 20% du Ntot minéralisé).
- Humival a une forte valeur fertilisante azotée (22kgN/tMB), il minéralise 27% de son Norg. D'après la référence de l'institut d'élevage, le lisier de porc minéralise 20% du Ntot (valeur similaire aux données d'incubations que nous avons obtenues). Un lisier de porc est habituellement bien pourvu en Nmin, ce qui n'est pas notre cas car Humival est du lisier de porc séché.

- Les PRO qui ont une **valeur fertilisante très faible à nulle** immédiatement après un apport sont : les fientes de volailles compostées, Fertilys, le fumier de bovin, le fumier de cheval composté, le compost DV de Versailles :

- Le compostage des fientes de volailles diminue fortement leur valeur fertilisante.

- Le compostage supprime les risques d'immobilisation de l'azote pour les fumiers de chevaux dont la minéralisation reste très faible après apport au sol.
- Le fumier de bovins présente une phase fugace d'organisation du N immédiatement après apport, suivie d'une phase de minéralisation qui reste très faible
- Le produit Fertilys, bien qu'élaboré à partir d'un mélange de compost de DV et de farine animale, fournit peu d'azote disponible, avec un certain risque d'immobilisation à cause de sa composition importante en déchets verts.
- Les 2 composts de déchets verts se comportent différemment : celui de Versailles minéralise très peu d'azote, mais le second provoque une immobilisation de l'azote qui est expliquée par la durée plus faible du compostage dans ce dernier cas. En effet, la durée de compostage de ces déchets verts est de deux mois. Le compostage est accéléré par une aération forcée, ce qui reste insuffisant pour stabiliser la MO du compost. En revanche sur la plate-forme de Versailles, la durée de compostage est de 8 à 12 mois, ce qui permet de mieux stabiliser la MO du compost. Les épandages des composts de déchets verts pourront constituer un risque d'immobilisation de l'azote minéral du sol selon leur degré de maturité.

- Les PRO qui provoquent des **immobilisations transitoires du N** : les fumiers de chevaux, le compost DV de Grignon :

- Les fumiers frais immobilisent tous de l'azote, de façon très fugace pour le fumier de bovins. Il est donc conseillé de ne pas les épandre au moment où des cultures auraient besoin d'azote. D'après la référence de l'institut de l'élevage (Fertiliser avec les engrais de ferme, 2001), le compostage des fumiers permet de stabiliser les fumiers et d'avoir une minéralisation positive de l'azote (entre 0 et 20% du Norg), ce que nous observons pour le compost de fumiers de chevaux (environ 5% de Norg minéralisé).

- Comme dit précédemment, le compost de DV produit à Grignon immobilise une quantité non négligeable d'azote du sol, expliquée par le procédé et la durée de compostage.

Toutes les cinétiques d'évolution du N minéral au cours des incubations atteignent un plateau que nous considérerons comme la proportion du N organique ou la quantité de N potentiellement minéralisable et disponible pour les cultures après apport de PRO. Ces valeurs sont reportées dans le tableau 3.11.

Tableau 3.11 : Quantités d'azote disponible et de N org minéralisé des différents PRO en fin d'incubation

	Ntot	N potentiellement disponible N minéralisé	
	%MS	Kg N/t MS	% Ntot
Boues séchées	7.2	35.6	50,8
Humival	5.2	25.0	47,4
Boues chaulées	4.5	18.6	41,7
Fientes volailles Bretagne	4.0	15.4	40,6
Fientes volailles compostées	2.8	3.5	12,6
Fertilys (Compost DV+Farine animale)	3.0	0.9	3,2
Fumier bovin	1.5	0.5	2,6
Fumier de chevaux composté	1.4	0.4	3,0
Compost DV Versailles	1.8	0.1	0,6
Compost DV Grignon	1.4	-5.6	-41,4
Fumier de chevaux sur copeaux	1.6	-5,8	-43,3
Fumiers chevaux pailleux	1.3	-6.1	-73,3

En conclusion de cette partie consacrée à la caractérisation des PRO et en fonction des résultats détaillés auparavant, on sélectionnera :

❖ Les PRO intéressants en vue de l'élaboration des scenarios de substitution des engrais azotés dits PRO « Fertilisants »: *les deux boues séchées et chaulées, les fientes de volailles non compostées et Humival*. En effet, ces PRO peuvent fournir des quantités importantes d'azote disponible pour les cultures durant l'année de l'épandage. Ces quantités varient entre 15 et 36kgN/tMS. Ces PRO ont par contre des valeurs amendantes faibles voire nulles et ne peuvent contribuer au maintien des teneurs en matières organiques des sols. Il est probable que l'épandage de ces PRO, en particulier les fientes de volailles, pourrait contribuer à la baisse des teneurs en matières organiques des sols *via* le phénomène de « priming effect », activation de la minéralisation de la matière organique du sol via ces apports de substrats facilement minéralisables et très riches en azote.

❖ Les PRO intéressants en vue de l'élaboration de scénarios d'amélioration des teneurs en matières organiques des sols dits PRO « amendants » : les *fumiers de chevaux, Fertilys et les composts de déchets verts.* En effet, ces PRO, grâce à leur ISMO important variant entre 82 et 86, peuvent contribuer au maintien et à l'augmentation des teneurs en matières organiques des sols et donc contribuer à la substitution des engrais à long terme, *via* l'augmentation de la fourniture du sol en azote par la minéralisation de la matière organique du sol. Par contre, on ne peut envisager une substitution des engrais azotés à court terme à cause de leur valeur fertilisante azotée faible. Les cultures d'hiver semées après l'épandage de ces composts peuvent risquer une faim d'azote essentiellement durant la période de reprise de la phase végétative.

Pour finir, nous avons essayé de calculer les quantités d'azote potentiellement disponibles à partir de valeurs fertilisantes azotées estimées des PRO existants sur le territoire (Tableau 3.12). La quantité d'azote total apportée par les différents types de PRO potentiellement utilisables sur le territoire est de 803 t/an. Seuls 174 t Nminéral/an sont facilement disponibles pour les cultures à partir des PRO « fertilisants », ce qui représente 22% de l'azote organique minéralisé par rapport aux teneurs initiales en azote organique des différents PRO.

Tableau 3.12: Quantités d'azote disponibles des PRO fertilisants sur le territoire

	Quantités t/an	Ntot %MS	Ntot t/an	N dispo %N tot	Ndispo t/an
Humival (Lisier de porc séché)	700	5,3	37	47,4	18
Boues séchées	3515	7,0	247	50,8	125
Boues chaulées	1430*	4,5	65	41,7	27
Fientes volailles séchées	200	3,8	8	40,6	3
Fientes volailles compostées	210	1,8	4	16,3	1
Fumier de chevaux composté	4140	1,4	56		
Fumier bovin	1100	3,1	34		
Autres fumiers	350	3,0	10,5		
Lisier Bovin	400	3,1	12,6		
Fertilys (Compost DV+Farine animale)	6480	1,5	97		
Compost DV	10520	1,5	161		
Compost de biodéchets (Qualiagro**)	4080	1,7	71		
Total	33125		803		174

*La totalité des boues chaulées des Mureaux est considérée

** La caractérisation du compost de biodéchets de Qualiagro a été utilisée (cf chapitre 4)

3.3. CARACTERISATION DES SYSTEMES DE CULTURE SUR LE TERRITOIRE

Nous présentons maintenant comment nous avons analysé les systèmes de culture dans le territoire, pour retenir ceux qui seront l'objet des simulations de substitution par des PRO. Nous rappelons que nous considérerons à la fois i) les successions de culture (ii) les itinéraires techniques et notamment les itinéraires de fertilisation minérale et organique des cultures dont le blé (iii) l'utilisation actuelle globale ou pas de PRO. Nous montrerons d'abord comment nous analysons les systèmes de culture dans des exploitations enquêtées puis comment nous extrapolons à l'échelle du territoire les successions de culture qui seront finalement retenues. Comme précédemment nous commençons (3.3.1) par présenter les méthodes avant (3.3.2) de donner les résultats.

3.3.1. Matériels et Méthodes

3.3.1.1. Recensement des principaux systèmes de culture : identification des successions de culture et des Itinéraires techniques par culture

3.3.1.1.1. Recensement des principaux systèmes de culture par enquêtes

L'objectif ici est d'étudier les systèmes de culture céréaliers qui occupent, comme dit précédemment, 90% de la SAU totale. Le choix de ne pas analyser en détail les systèmes de culture actuels des maraîchers et leur utilisation actuelle ou potentielle de PRO vient du fait que la plupart des exploitations maraichères de ce territoire sont en circuits courts, et présentent donc des nombres de cultures maraichères importantes, des successions de culture particulièrement complexes et peu stables et des itinéraires techniques de fertilisation difficiles à représenter (Pourias, 2011). De plus, il s'agit d'exploitants ayant très peu de temps disponible et donc peu enclins à être l'objet d'enquêtes répétées.

La superficie en grandes cultures dans le territoire de la PVPA est occupée par 60 agriculteurs céréaliers qui ne peuvent pas être tous enquêtés dans le cadre de ce travail. Nous avons donc choisi de constituer un échantillon d'une quinzaine d'agriculteurs, chiffre compatible avec le temps pouvant être imparti à ces enquêtes.

Le choix des agriculteurs s'est fait sur la base de la variabilité de leur surface totale (de 80 à 300 ha), de leur localisation géographique sur le territoire et des types de sol sur lesquels se situent les exploitations, afin que soient représentés les deux grands types de sols précédemment identifiés. Nous avons aussi, étant *a priori* sans connaissance préalable précise des successions de culture ou des modes de fertilisation (utilisation de PRO ou non) pris l'avis du conseiller agricole local de la chambre d'agriculture pour identifier ces agriculteurs suivis. Ainsi, le choix s'est fait en combinant d'abord un choix des premiers agriculteurs en fonction de leur localisation géographique, puis en consultant le conseiller agricole de la chambre d'agriculture et en demandant aux premiers enquêtés de nous mettre sur la piste d'autres agriculteurs représentatifs des pratiques culturales les plus courantes du territoire, notamment en termes de successions de culture et d'utilisation actuelle ou non de PRO.

Nous remarquons dans la localisation résultante, que nous avons correctement représenté les deux grands types de sols, que nous avons des agriculteurs dans l'ensemble du territoire, sauf dans la partie Sud qui est de fait plus urbanisée (Figure 3.9). La superficie occupée par ces agriculteurs représente 22% de la SAU totale et environ 25% de la SAU occupée par les agriculteurs céréaliers.

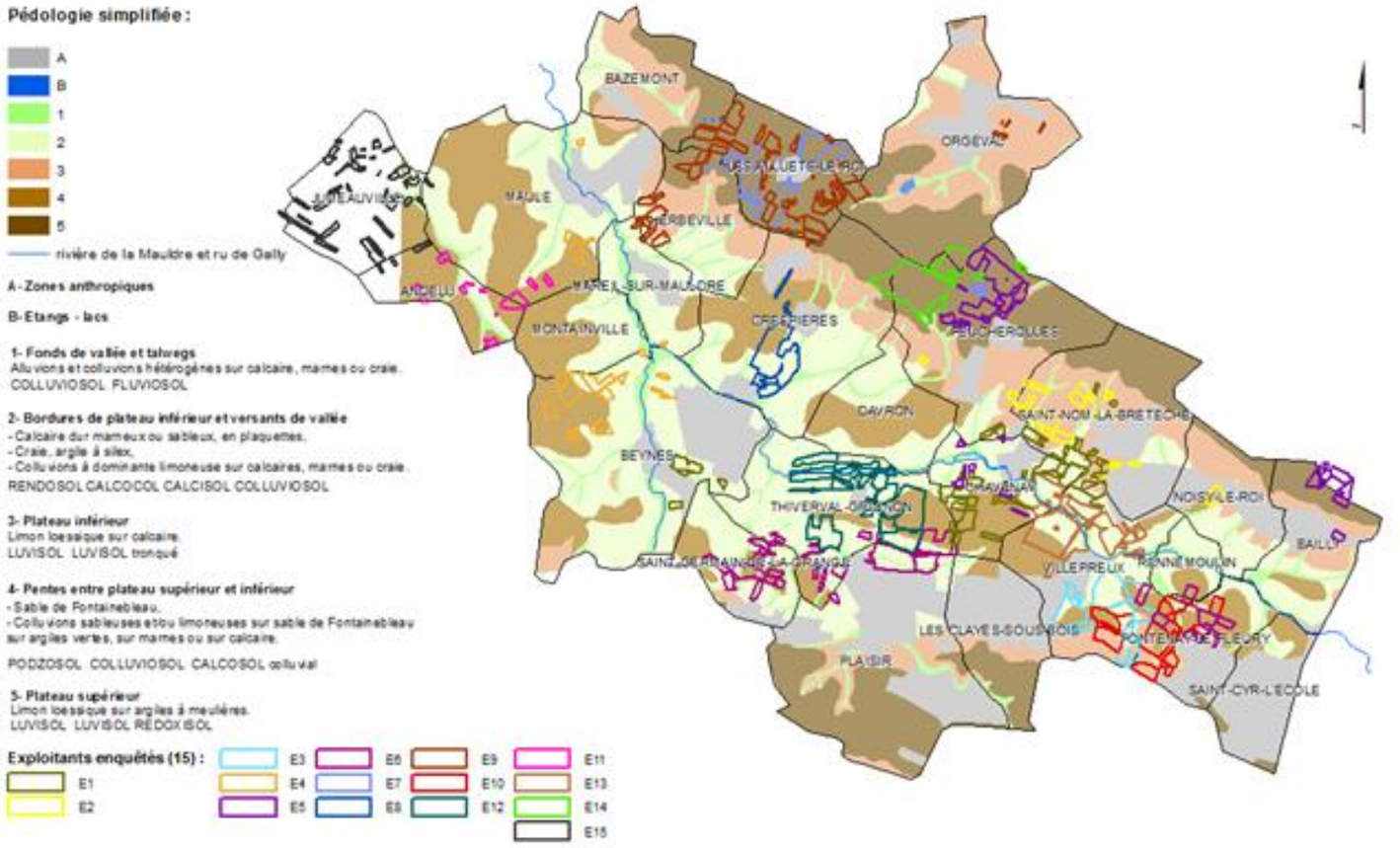


Figure 3.9 : Localisation des exploitations céréalières enquêtées sur le territoire par rapport aux grands types de sols (JM Gilliot et D. Hadjar)

Les enquêtes se sont déroulées en 2 étapes. En effet les entretiens durent assez longtemps (3 à 4h à chaque fois), d'où la nécessité d'avoir l'accord préalable de l'agriculteur sur sa disponibilité:

➢ La première étape a eu comme objectifs la compréhension fine des successions de cultures, l'importance de chaque culture dans la succession, le relevé parcellaire et l'affectation des successions des cultures, notamment en fonction des types de sols (mais aussi des critères de distances à la ferme, de forme des parcelles, de taille des parcelles, d'accessibilité etc.). Nous avons analysé aussi lors de ces enquêtes les règles de fertilisation minérale du blé tendre qui est la culture la plus répandue sur le territoire, en demandant à l'agriculteur non pas de nous décrire précisément les pratiques réalisées l'année n sur telle et telle parcelle, mais de nous tracer les regroupements qu'il fait entre parcelles pour la fertilisation azotée du blé (notion d'allotement, Aubry, 1995) et les grandes règles de décision concernant les moments d'apport, les doses totales et les fractionnements. Nous avons cherché à comprendre, lorsqu'elles existent, les pratiques de fertilisation organique : épandre ou pas ? pourquoi? Quels PRO ? quelle hiérarchisation des PRO déjà présents ou utilisés sur le territoire ? sur quelles cultures ? quelles fréquences ? à quel moment ? quelles doses ? Là encore nous avons demandé à l'agriculteur de nous donner ses règles de décision, pas de nous décrire ses pratiques réalisées l'année n. Par cette façon de faire, nous nous approchons des modes de raisonnement de l'agriculteur, ce qui sera ensuite utile pour raisonner les scénarios de substitution.

➢ Dans la seconde étape, nous avons procédé de même pour comprendre les pratiques de fertilisation minérale sur toutes les cultures de la succession, nous avons complété par l'identification des pratiques de travail des sols, l'inventaire des différentes variétés de toutes les cultures et les rendements objectifs que les agriculteurs

attendent de chaque culture en fonction, notamment du type de sol. Finalement nous avons recensé les pratiques d'enfouissement ou pas des résidus de cultures.

3.3.1.1.2. Distribution spatiale des successions de culture :

Ces données de systèmes de culture ont été obtenues sur 15 exploitations par enquêtes. Pour passer à une représentation des successions de culture à l'échelle du territoire, nous avons utilisé les données PAC spatialisées sur plusieurs années successives. Malheureusement, une telle extrapolation n'est pas possible concernant les itinéraires techniques de fertilisation, compte tenu qu'il n'existe pas pour cela de bases de données centralisées.
Une spatialisation des successions de culture sur le territoire a donc été faite à partir de données PAC auxquelles nous avons eu accès. Ces données sont aujourd'hui disponibles sur 5 années culturales à partir de 2008. Les successions de culture ont été reconstituées à partir des principales successions recensées précédemment et classées en fonction de leurs têtes d'assolement, et de leur longueur (délai de retour entre deux têtes d'assolement identiques). En effet, nous avions vu dans les premières enquêtes d'itinéraires de fertilisation que les agriculteurs épandent aujourd'hui les PRO uniquement sur les têtes d'assolement. Ce croisement entre les données PAC (dont nous montrerons dans les résultats, l'utilisation précise) et les données d'enquêtes a ainsi permis d'une part de disposer d'une représentation exhaustive de cet élément central du système de culture qu'est la succession sur le territoire, d'autre part de vérifier la bonne représentativité de nos enquêtes en termes de successions de culture .Il y a donc d'une manière générique, et dès lors que des données PAC spatialisées sont disponibles, intérêt à coupler ces analyses exhaustives et les enquêtes d'exploitations pour une bonne représentation des successions de culture sur un territoire, dans une optique d'analyse de l'utilisation actuelle ou potentielle de PRO.

3.3.2. Résultats

On rappelle que l'identification des successions de culture est importante pour connaître actuellement ou prévoir dans les scénarios les cultures concernées par l'éventuel épandage de PRO, ainsi que la fréquence temporelle de ces épandages possibles.

Dans cette partie, nous présenterons :
- l'inventaire et la caractérisation des successions de culture (3.3.2.1) ainsi que la gestion de la fertilisation (3.3.2.2) et l'utilisation ou pas de PRO sur les exploitations agricoles enquêtées (3.3.2.3). D'autres constatations sur d'autres pratiques comme l'irrigation et l'utilisation de produits phytosanitaires sont ensuite données (3.3.2.4).
- la représentativité de nos résultats d'inventaire des successions de culture par rapport aux données territoriales d'occupation du sol par les cultures issues des enregistrements PAC (3.3.2.5).

A la suite de ces analyses, des triplets : Type de sols*succession de culture*ITK seront définis qui serviront à la construction des scénarios testés pour la substitution des engrais azotés par les PRO.

3.3.2.1. *Typologie des successions de cultures de notre échantillon*

Le tableau 3.13 résume les superficies cultivées par les agriculteurs ainsi que les types de sols et les principales successions de culture conduites sur les différentes exploitations.
Nous avons essayé, après le premier et le second passage chez les agriculteurs enquêtés (localisation sur la figure 3.9), de faire une typologie des successions de cultures (Tableau 3.14). D'après les enquêtes, les agriculteurs raisonnent les successions de cultures en fonction surtout des types de sols. Ils essayent d'adapter les successions de cultures qu'ils estiment rémunératrices sur les « meilleurs » sols dont ils disposent (généralement les limons profonds des plateaux et les sols argilo-calcaire des bordures de plateaux). Ces successions sont généralement

courtes (3 à 4 ans). Pour ce qui est des autres types de sols (sols peu profonds à tendance argileuse majoritairement ou sableuse), les successions sont généralement beaucoup plus variées et à durée relativement longue (>5ans).
Les successions de cultures de courte durée sur les « bons » sols incluent généralement une culture de colza en tête d'assolement, puis un blé tendre ou 2 et finalement une culture de printemps (Orge de printemps ou Mais qui est alors suivi d'un blé).
Un agriculteur a en moyenne 2 types de sols différents mais certains peuvent avoir jusqu'à 4 types de sols qu'ils apprécient comme différents et donc 4 successions de cultures différentes, ce qui explique que le total du nombre d'agriculteurs n'est pas mentionné dans le tableau 3.14 car il est supérieur à 15.

Tableau 3.13 : récapitulatif des exploitations enquêtées

Code Exploitation	**Superficie Ha**	**Type de sols**	**Succession**
E01	150	Argilo calcaire	Colza/Blé/Blé/Orge de printemps
	30	Limon profond	Colza/Blé/Orge de printemps/Blé
E02	45	Limon profond	Colza/Blé/Blé/Orge de printemps
	35	Limon profond	Maïs/Blé/Blé/Orge de printemps
E03	90	Argilo calcaire	Colza/Blé/Blé/Orge de printemps
	72	Limon argileux	Colza/Blé/Maïs/Blé
E04	37	Argilo calcaire	Colza/Blé/Blé/Orge de printemps
	78	Limon profond	Colza/Blé/Maïs/Blé
	4	limon profond	Colza/Blé
	10	Argilo calcaire	Monoculture Blé
E05	110	Limon profond	Colza/Blé/Maïs/Blé
	10	Argilo calcaire	Colza/Blé/Blé/Orge de printemps
	5	Limon léger	Colza/Blé/Blé/Orge de printemps
E06	260	Argilo calcaire	Colza/Blé/Blé/Orge de printemps
E07	115	Limon profond	Colza/Blé/Maïs/Blé
	25	Argileux	Colza/Blé/ Colza/Blé/Maïs/Blé
E08	50	Argilo calcaire	Colza/Blé/Orge de printemps/Blé
	50	Limon profond	Colza/Blé/Maïs/Blé /Pois/Blé
E09	137.5	Limon profond	Colza/Blé/Escourgeon
	50	Argileux	Colza/Blé/Escourgeon
	62.5	Limon profond	Maïs /Blé/Blé
E10	70	Limon profond	Colza/Blé/Escourgeon
	18	Sableux	Colza/Blé/Escourgeon
	47	Sablo argileux	F/Bdur/Btendre/C/Btendre
	46	Argilo calcaire	F/Bdur/Btendre/C/Btendre
E11	12.5	Argilo calcaire	Colza/Blé/Escourgeon
	30	Limon profond	Pomme de terre/Blé/Colza/Blé/Lin/Blé
E12	266	Limon profond	Maïs /Blé/Blé
	100	Argilo calcaire	Luzerne/Colza/Triticale/Orge de printemps ou Maïs
E13	150	Limon profond	Monoculture Blé
	30	Argilo calcaire	Monoculture Blé
E14	160	Limon profond	Fèverole/Blé/Triticale/Maïs
E15	30.5	Argilo calcaire	Colza/Blé/Escourgeon /Maïs ou Pois/ Blé/Escourgeon
	57.5	Limon profond	Colza/Blé/Escourgeon /Maïs ou Colza/Blé/Orge de printemps

A noter : C = Colza, B= Blé tendre, Bd = Blé dur, Op = Orge de printemps, M = Mais, E = Escourgeon, P = Pois, F = Fèverole

Tableau 3.14: Typologie des successions de cultures en fonction des types de sols chez les agriculteurs

	Succession	Nombre d'agriculteurs pratiquant la succession	Superficie cultivée (ha)	Pourcentage de la superficie totale des agriculteurs enquêtés	Type de sols et superficie affectée (ha)
Successions de culture Dominantes selon les pratiques courantes sur le territoire	-C/B/B/Op -C/B/Op -C/B/Op/B	7	597	25	-Limon profond : 80 - Argilo-calcaire : 517
	-C/B/M/B	4	375	16	- Limon profond et limon argileux : 375
	-M/B/B -M/B/E	2	328	14	- Limon profond : 328
	-C/B/B -C/B/E	3	288	12	- Limon profond : 207,5 -Argilo-calcaire ou argileux : 12.5 - Sableux : 18 - Argileux : 50
Successions de culture Moins fréquentes	Successions très diverses incluant des légumineuses (Pois, fèverole et luzerne)	6	458.5	19	- Limon profond : 210 -Argilo-calcaire : 176.5 - Sablo-argileux : 47 - Argileux : 25
	Monoculture de blé (depuis 8 ans)	2	190	8	- Limon profond : 150 - Argilo-calcaire : 40
	Autres successions (>5ans)	4	126.5	6	- Limon : 126.5
Total			2364	100	-Limon profond : 1477 - Argilo-calcaire : 826 -Autres : 140

Les successions « dominantes » couvrent environ 67% de la superficie totale des agriculteurs enquêtés. Nous avons classé les successions incluant les légumineuses comme non dominantes malgré la superficie importante qu'elles couvrent dans l'échantillon pour les raisons suivantes :

- l'échantillon comprend *le seul céréalier en agriculture biologique* du territoire, dont la surface couvre 160 ha et qui inclut une légumineuse dans sa succession, et la ferme expérimentale de Grignon qui fait de l'élevage et qui inclut donc la luzerne utilisée comme culture fourragère pour l'alimentation animale. Sa superficie cultivée est de 100 ha.
- Pour le reste des agriculteurs enquêtés, ils intègrent de manière plus sporadique les légumineuses pour allonger le cycle cultural et l'adapter à leurs sols les moins « performants ».
- Néanmoins, les agriculteurs pensent à l'avenir intégrer plus de légumineuses à graines dans les successions de cultures car ils sont conscients des bénéfices agro-environnementaux de ces cultures (bonne tête d'assolement pour le blé qui suit, intégrer une deuxième culture non céréalière dans la succession à part le colza). Mais pour l'instant, cette volonté est freinée par les prix très faibles à la vente de ces cultures.

Pour s'assurer de la représentativité *a posteriori* des choix des agriculteurs sur le territoire par rapport aux successions de culture, nous avons eu recours tout d'abord à quelques entretiens avec le conseiller de la chambre d'agriculture. La chambre d'agriculture n'a pas de données statistiques élaborées concernant les successions de culture sur le territoire d'étude. Mais, grâce à l'expertise du conseiller agricole, nous sommes parvenus à avoir quelques chiffres globaux. Les successions de cultures dominantes sur le territoire sont C/B/Op, C/B/M/B et C/B/E avec respectivement environ 25%, 20% et 10-20% de la superficie potentiellement occupée par ces successions. Le reste serait composé de successions de cultures variées. Mais nous pouvons avoir une estimation plus précise en utilisant les données PAC (cf 3.3.2.5).

3.3.2.2 Pratiques de fertilisation minérale et organique et gestion des résidus de récolte

Les itinéraires techniques actuels de fertilisation (minérale et organique) pour les différentes cultures ont été relevés dans l'ensemble des exploitations enquêtées et classés en fonction des successions pratiquées. Les pratiques de gestion des résidus de récolte (enfouissement ou exportation) ont également été relevées.

Nous allons dans cette partie, exposer les pratiques de fertilisation azotée minérale et organique moyenne (dates et doses d'apport relevées en prévisionnel lors d'enquêtes) des différentes cultures au sein des successions de cultures dominantes de notre échantillon c'est-à-dire les successions C/B/Op, C/B/M/B et C/B/E. Nous exposerons également les modes de gestion des résidus de récoltes pour chaque culture. L'ensemble est récapitulé au tableau 3.15.

- ***Colza/Blé/Orge de printemps :***

Nous détaillerons les fertilisations minérales et organiques moyennes par culture, nous commencerons toujours par discuter la fertilisation minérale, ensuite on s'intéressera à la fertilisation organique :

✓ **Colza** : C'est la tête d'assolement la plus répandue sur le territoire.
Sur cette culture, 5 agriculteurs sur 6 ne font que deux apports d'engrais azotés variant entre 50 et 130 kg N/ha pour le premier apport (aux alentours du 15 février) et entre 80 à 100 kg N/ha pour le second (aux alentours du 15 mars). L'agriculteur restant rajoute un troisième apport de 70 kg N/ha début avril. La quantité d'azote minéral totale apportée sur cette culture est en moyenne de 180kgN/ha pour des objectifs de rendement autour de 45qx/ha. 5 agriculteurs sur 6 épandent des PRO sur le colza dans le cadre de la succession C/B/Op car le colza est la tête d'assolement (1 seul agriculteur épand aussi des PRO avant l'orge de printemps : boue séchée sur Colza et un mélange de fumiers de chevaux et un compost de déchets verts avant orge de printemps). Différents types de PRO sont utilisés : boues séchées à 3tMS/ha, fumiers de chevaux 7 tMS/ha et composts de déchets verts 15tMS/ha, Humival : 1tMS/ha. *A priori,* les agriculteurs ne prennent pas en compte la fourniture d'azote apportée par les PRO sur le colza et négligent l'arrière effet des épandages sur le reste de la succession de culture. Par contre, ils peuvent prendre en compte d'éventuelles « faim d'azote » que pourraient provoquer des apports de PRO. Ainsi, un agriculteur qui apporte 50kgN/ha d'engrais comme premier apport n'est pas un utilisateur de PRO, par contre, celui qui apporte 130kgN/ha en premier apport le fait par crainte du risque potentiel d'une faim d'azote pour la culture en place car il utilise des composts de déchets verts. Les résidus de colza sont tous enfouis à la récolte.

✓ **Blé** : C'est la culture la plus importante en surface chez les agriculteurs. Elle est considérée comme la culture la plus rémunératrice et la plus maitrisée techniquement et donc celle qui assure un rendement relativement stable variant entre 80 et 90qx/ha. 3 apports d'engrais azotés sont généralement réalisés :
- Le premier apport correspond à la reprise de végétation qui est aux alentours de mi-février (stade tallage). Les doses varient entre 20 et 60kgN/ha.
- Le second correspond au stade épi 1cm aux alentours de mi-mars. Cet apport est le plus important en termes de quantités variant entre 60kgN/ha et 100kgN/ha.
- Le dernier apport est aux alentours de mi-avril et sert à améliorer les teneurs en protéines. Les doses relatives à ce dernier apport sont relativement faibles variant entre 30kgN/ha et 60kgN/ha.
La dose totale moyenne est de l'ordre de 170 kgN/ha variant entre 140 et 210 kg/ha dans notre échantillon.
Il n'y a jamais d'épandage de PRO sur cette culture car les agriculteurs ne veulent pas prendre de risque (risque de verse si la minéralisation est très importante ou à l'inverse risque de faim d'azote) et que l'apport de PRO en cours de culture n'est pas aisé.
Les résidus de blé sont toujours enfouis, sauf pour un seul agriculteur qui exporte les ¾ des superficies de paille de blé pour vendre la paille à des éleveurs de chevaux (Contrat Paille/Fumier).

✓ **Orge de printemps** : c'est une culture qui peut être rémunératrice selon les années. Elle est valorisée en brasserie. Une teneur en azote des grains pas trop élevée (inférieure à 11%) est généralement demandée par les brasseurs, du coup la fertilisation azotée de cette culture doit viser à éviter l'excès d'azote

Un seul apport d'engrais azoté est pratiqué en pré-semis. Cet apport varie entre 80 et 110kg N/ha pour des objectifs de rendement aux alentours des 60qx/ha. Un seul agriculteur épand des PRO sur cette culture (mélange de fumiers de chevaux et de déchets verts). Les résidus de récolte sont enfouis.

- ***Colza/Blé/Maïs/Blé :***

✓ **Colza** : La culture de colza est conduite à peu près de la même façon que dans la succession précédente, exception faite du second apport d'engrais azotés. Pour cette culture, nous retrouvons les deux apports d'engrais azotés classiques avec des doses variant entre 70 et 90KgN/ha. Les doses pour le second apport varient entre 75 et 100kgN/ha. Un seul agriculteur sur les cinq, celui qui a adopté la première succession C/B/Op, met en premier apport 50kgN/ha et rajoute un troisième apport de 70kgN/ha. La moyenne d'engrais minéral total est de 170kgN/ha. Quatre agriculteurs sur cinq épandent des PRO essentiellement sur Colza (boues chaulées, fumiers de chevaux et Humival). Les résidus de cultures sont tous enfouis.

✓ **Blé** : Pour cette culture, nous distinguons les deux types de précédents Colza et Maïs car les précédents génèrent une différenciation des pratiques de fertilisation:
- Blé de colza : il est fertilisé de la même manière que le Blé précédemment décrit de la succession C/B/Op.
- Blé de Maïs : La fertilisation minérale de ce blé est un peu supérieure à celle du Blé de Colza. Les quantités d'engrais azotés apportés en premier apport sont plus élevées de 10kgN/ha en moyenne. Les doses varient donc entre 50 et 80kg N/ha. Pour ce qui est du second apport, les doses restent équivalentes à celles appliquées sur blé de colza, c'est-à-dire variant entre 60 et 100kgN/ha. Le troisième apport est également assez proche du Blé de colza précédent et les doses d'engrais azotés apportés varient entre 30 et 70kgN/ha et un agriculteur sur les cinq rajoute un quatrième apport de 40 kg N/ha. La dose moyenne totale est de 190kgN/ha.
Les agriculteurs n'apportent jamais de PRO sur les deux blés et les résidus de culture sont totalement enfouis.

✓ **Maïs** : C'est une culture moins appréciée par les agriculteurs. Pour eux, cette culture représente un risque à cause de sa demande en eau importante alors qu'ils n'ont pas d'irrigation, et elle ne donne des rendements intéressants que sur les sols profonds. Par contre, ils disent ne pas avoir le choix puisqu'il s'agit d'une culture rémunératrice. Comme pour le cas de l'orge de printemps, deux apports d'engrais azotés sont réalisés : un en pré-semis de l'ordre de 100kgN/ha et un second apport en post-levée de l'ordre de 50-70kgN/ha pour un objectif de rendement de 95qx/ha. La dose moyenne totale est de l'ordre de 150kgN/ha/an variant de 110kgN/ha/an à 170kgN/ha/an.
Un seul agriculteur apporte du Fertilys (Compost DV+ Farine animale) avant le maïs. Les résidus de récolte sont tous enfouis.

- ***Colza/Blé/Escourgeon:***

Les deux cultures de colza et de blé sont fertilisées de la même façon que les colzas et blés de colzas des deux premières successions de cultures. Un agriculteur sur les trois adoptant cette succession, épand des PRO sur la tête d'assolement. Il épand de l'Humival (lisier de porc séché) à une dose de 1tMS/ha. Même constat que précédemment, il n'ya pas d'adaptation des doses d'engrais azotés en fonction des apports de PRO. Les résidus de cultures sont totalement enfouis.

✓ **Escourgeon** : c'est une culture d'hiver moyennement rémunératrice par rapport à l'orge de printemps. Elle n'a pas d'exigence de réduction de la teneur en azote du grain, et est conduite avec 3 apports d'engrais azotés. Le premier apport correspond à la reprise de végétation qui est aux alentours de mi-février. Les doses varient entre 60 et 80kgN/ha. Le second apport correspond au stade épi 1cm aux alentours de mi-mars. Cet apport est le plus

important en termes de quantités variant entre 120 et 140kgN/ha. Les doses pour le troisième apport sont relativement faibles variant entre 30 et 50kgN/ha. La moyenne des doses de fertilisation est de l'ordre de 205 kgN/ha variant de 200kgN/ha à 210kgN/ha.

Tableau 3.15 : Récapitulatif de la gestion de la fertilisation des cultures des successions dominantes

Succession de culture	Exploitation	Superficie Ha	Type de sol	Utilisation PRO	Fertilisation minérale actuelle			
					1ère culture	2ème culture	3ème culture	4ème culture
C/B/B/O printemps C/B/O printemps	E1	150	Argilo-calcaire	Boues séchées sur colza + (Fumier de chevaux+Compost de déchets verts) avant orge	170	140	180	110
	E2	45	Limon	Compost de déchets verts sur colza	210	170	170	80
	E3	90	Argilo-calcaire	Fumier de Chevaux sur colza	160	185	210	110
	E4	37	Argilo-calcaire	Pas d'apport	200	190	Pas de culture	100
	E5	15	Limon	Humival sur colza	160	160	Pas de culture	100
	E6	260	Argilo-calcaire	Pas d'apport	170	140	180	110
C/B/M/B	E1	72	Limon	Fumier de Chevaux sur colza	160	185	210	160
	E4	78	Limon	Humival sur colza	200	190	160	190
	E5	110	Limon	Pas d'apport	160	160	160	220
	E7	115	Limon	Boues chaulées sur colza	150	135	130	190
C/B/E	E9	188	Limon	Fertilys sur Escourgeon	170	180	210	
	E10	88	Limon	Humival sur colza	130	160	200	
	E11	13	Argilo-calcaire	Pas d'apport	150	160	200	

FC : Fumier de chevaux, CDV : Compost de Déchets Verts

La gestion de la fertilisation des agriculteurs, d'après le tableau 3.15, *ne montre pas d'adaptation des doses de N apportées en fonction du type de sol*. Ceci a été également vérifié durant les enquêtes. Les agriculteurs adaptent par contre le choix des cultures et la durée de la succession de culture en fonction du type de sol.
A partir de ce tableau également, *on ne remarque pas d'influence nette de l'utilisation ou pas de PRO sur les pratiques de fertilisation*. Si on compare, à titre d'exemple, les quantités apportées sur la succession C/B/B/Op, des exploitations E01, E02, E03 et E05 qui épandent des PRO et des exploitations E04 et E06 qui n'en apportent pas, on remarque qu'il n'y a pas de différences sensibles d'apports d'engrais azotés sur les différentes cultures. Cette observation est vérifiable sur les autres successions de culture.
Les agriculteurs, aujourd'hui, ne prennent de fait pas en compte les effets fertilisants d'apports de PRO, même lorsqu'il s'agit de PRO que nous avons qualifié de fertilisants. Ces épandages servent, à leur avis, essentiellement à maintenir ou augmenter les teneurs en matières organiques de leurs sols y compris lorsqu'ils utilisent des Pro que nous avons classés comme fertilisants. La valeur fertilisante des PRO est encore négligée ou sous estimée par les agriculteurs aujourd'hui.

3.3.2.3 L'utilisation de PRO dans les exploitations

Contrairement aux successions de culture (cf ci-après), nous ne pouvons ici faire appel à aucune donnée enregistrée à l'échelle du territoire puisque les techniques culturales, en général, et l'utilisation des PRO en particulier, ne font pas l'objet de tels enregistrements de la part des chambres d'agriculture. Certaines données sont centralisées lors des déclarations PAC mais nous n'avons pas pu avoir accès à ces données confidentielles.
Nous nous fondons donc essentiellement sur nos données d'enquêtes (Tableau 3.16), comparées à des avis d'experts que sont les conseillers de terrains.
Dans les pratiques de fertilisation enregistrées sur nos exploitations, le recours aux PRO n'a lieu que pour environ la moitié des exploitations. Mais, en termes de superficie, les surfaces épandues dans notre échantillon concernent

63% des sols dont 37% reçoivent des PRO de nature amendante. Ce constat fait sur nos exploitations d'enquête a été confirmé par les conseillers techniques régionaux.

Tableau 3.16 : Utilisation des PRO dans les exploitations enquêtées

Exploitation	PRO utilisé	Superficie concernée Ha	Dose appliquée t MS/ha	Période d'apport	Culture sur laquelle le PRO est amendé	Succession
E01	Boues séchées	150	3	Début septembre	Colza	C/B/B/Oprtps
	Fumier de chevaux	30	3	Février	Orge de printemps	C/B/B/Oprtps
	compost de déchets verts	30	14	Février	Orge de printemps	C/B/B/Oprtps
E02	Compost de déchets verts	45	13	Début septembre	Colza	C/B/B/Oprtps
	Compost de déchets verts	35	13	Début septembre	Colza	M/B/B/Oprtps
E03	Fumier de chevaux	90	5	Début septembre	Colza	C/B/B/Oprtps
	Fumier de chevaux	72	5	Début septembre	Colza	C/B/M/B
E05	Humival	15	1	Début septembre	Colza	C/B/B/Oprtps
	Humival	110	1	Début septembre	Colza	C/B/M/B
E07	Boues chaulées	115	3	Début septembre	Colza	C/B/M/B
	Boues chaulées	25	3	Début septembre	Colza	C/B/C/B/M/B
E10	Humival	88	1	Début septembre	Colza	C/B/B
	Humival	46	1	Début septembre	Colza	F/Bd/B1/C/B2
	Fertilys	46	5	Début septembre	Blé 1	F/Bd/B1/C/B2
E12	Fumier bovin	266	15	Février	Mais	M/B/Escourgeon
	Lisier bovin	266	3	Avril	Mais	M/B/Escourgeon
	Fumier bovin	100	15	Février	Mais	Luz/C/trit/Mais
	Lisier bovin	100	3	Avril	Mais	Luz/C/trit/Mais
E14	Fientes volailles	160	5	Février	Blé	F/B/Trit/M
	Fientes volailles	160	5	Février	Triticale	F/B/Trit/M

Lorsque les PRO sont utilisés, *ils sont presque systématiquement apportés avant Colza et/ou avant Maïs,* leur fréquence d'apport étant ainsi le plus souvent *d'une année sur quatre ou sur trois*, plus rarement une année sur deux dans la succession Colza-blé-Maïs-blé. L'utilisation de PRO avant les céréales est pratiquée par la seule exploitation en agriculture biologique, qui apporte avant blé, triticale ou seigle des fientes de volailles (en partie autoproduites, en partie importées de Bretagne), donc trois années sur quatre dans une succession Fèverole-blé-triticale (ou seigle)-Maïs. Un deuxième agriculteur apporte des PRO sur l'orge (E01). Cette pratique est récente et l'agriculteur n'a pas suffisamment de recul pour décider sur le fait de continuer ou pas cette pratique. Les PRO ne sont pas épandus en cours de culture actuellement.

Les PRO apportés sont, selon les agriculteurs, et semble-t-il indépendamment de la succession de culture, des boues (2 cas), de l'Humival (2 cas) ou du Compost de déchets verts (2 cas), du Fertilys (1cas), des fientes de volailles (1 cas), du fumier de bovin et du lisier de bovin (1cas), du fumier de cheval (1cas) et un autre un mélange compost de déchets verts et fumier de cheval. Le recours à tel ou tel PRO semble fortement lié à la facilité d'approvisionnement à la fois physique et sociale (liens avec les fournisseurs d'intrants, service rendu au syndicat des eaux de la communauté de communes –épandage de boues-, connaissance et proximité d'un centre équestre etc.).
Humival et Fertilys sont des produits commercialisés par la coopérative agricole du territoire. L'utilisation de ces PRO est relativement récente (depuis 5 ans environ). Les agriculteurs n'ont pas assez de recul encore pour mieux

exploiter le potentiel de ces matières organiques exogènes. Ces PRO sont relativement chers puisque le produit Humival en particulier est importé de Bretagne sous forme de pellets séchées et cet inconvénient du prix parait majeur.

Le cas des boues est plus complexe. Leur épandage est soumis à une réglementation stricte (plan d'épandage). En plus de ces contraintes réglementaires, la perception de l'utilisation des boues sur le territoire par la population locale est relativement négative et contraignante pour l'agriculture. Durant la thèse, nous avons pu constater une opposition forte de la part de certaines collectivités locales ainsi que de certains habitants, qui est allée jusqu'à un moratoire de l'utilisation des boues dans une commune du territoire, qui a obligé les agriculteurs à ne pas utiliser de boues durant deux ans. Cette décision a été prise suite aux multiples plaintes des citoyens vivant à proximité des exploitations agricoles contre les nuisances olfactives causées par le stockage et l'épandage de ces produits. Un travail parallèle en sociologie (Joncoux, 2013) analyse plus en détail, sur l'ensemble des PRO et notamment sur les boues, les acceptabilités de ces matières dans le territoire.

Ces matières organiques potentiellement intéressantes au niveau agronomique sont ainsi relativement difficilement intégrables dans les systèmes de production et dans la gestion de la fertilisation, sauf à envisager des mesures particulières de stockage et d'épandage.

Les doses épandues des différents PRO sont celles conseillées par les vendeurs dans le cas des PRO commercialisés par les coopératives agricoles et les négociants (1t MS/ha pour Humival, 5t MS/ha pour Fertilys) ; on a relevé dans nos enquêtes ou obtenu des conseillers techniques de chambre d'agriculture des quantités par apport de 3t MS/ha pour les boues chaulées, 2.7 à 3t MS/ha pour les boues séchées, 5t MS/ha pour les fientes et le fumier de cheval, de l'ordre de 13t MS/ha pour les composts de déchets verts et de 15 t MS/ha pour le fumier bovin.

3.3.2.4 Autres pratiques :

✓ Labour :

La plupart des agriculteurs a opté pour des stratégies de simplification du travail du sol. Le semis direct n'est pas encore très répandu.

Le labour profond (25-30cm) est peu fréquent au cours de la succession culturale mais reste indispensable sur les têtes d'assolement (soit sur Colza ou sur les cultures de printemps) notamment pour enfouir les PRO apportés. Il est donc réalisé une année sur trois ou une année sur quatre pour au moins 8 exploitations sur les 15.

Généralement, en absence de labour profond, des déchaumages sont faits après la récolte des cultures. Deux à trois déchaumages à des profondeurs entre 10-15cm sont donc réalisés avant implantation des céréales.

✓ Irrigation :

Il n'y a pas d'irrigation sur le territoire, même pour les cultures de printemps comme le maïs car elles sont généralement affectées à des sols limoneux profonds ayant des réserves utiles importantes.

✓ Traitements phytosanitaires :

Nous n'avons pas approfondi les itinéraires techniques pour les conduites de désherbage ni pour les traitements insecticides et fongicides, même si ces techniques peuvent être liées à la fertilisation (classiquement des parcelles à fort objectif de rendement auront à la fois une fertilisation importante et une protection phytosanitaire élevée) mais de fait nous n'avions eu aucune information permettant de lier ces pratiques phytosanitaires à l'utilisation ou non de PRO. C'est pourquoi nous n'avons pas approfondi cet aspect dans nos enquêtes.

3.3.2.5 Typologie des successions de cultures dans le territoire

On a pu au cours du travail reconstituer sur le territoire, grâce à l'enregistrement pluriannuel des îlots PAC, les successions de culture pratiquées sur le territoire (Figure 3.10).
Précisons que cette méthode ne permet de repérer les successions que des îlots PAC qui restent inchangés au cours de 4 à 5 années d'enregistrement utilisées. Une carte exhaustive des successions de culture les plus pratiquées sur le territoire (successions de 3 et 4 années) a été réalisée[6]. Ces successions représentent 82% de la SAU totale du territoire (Tableau 3.17). Au préalable, nous avions croisé les données PAC avec les informations fournies par les agriculteurs enquêtés afin de mieux identifier les successions effectuées sur le territoire.

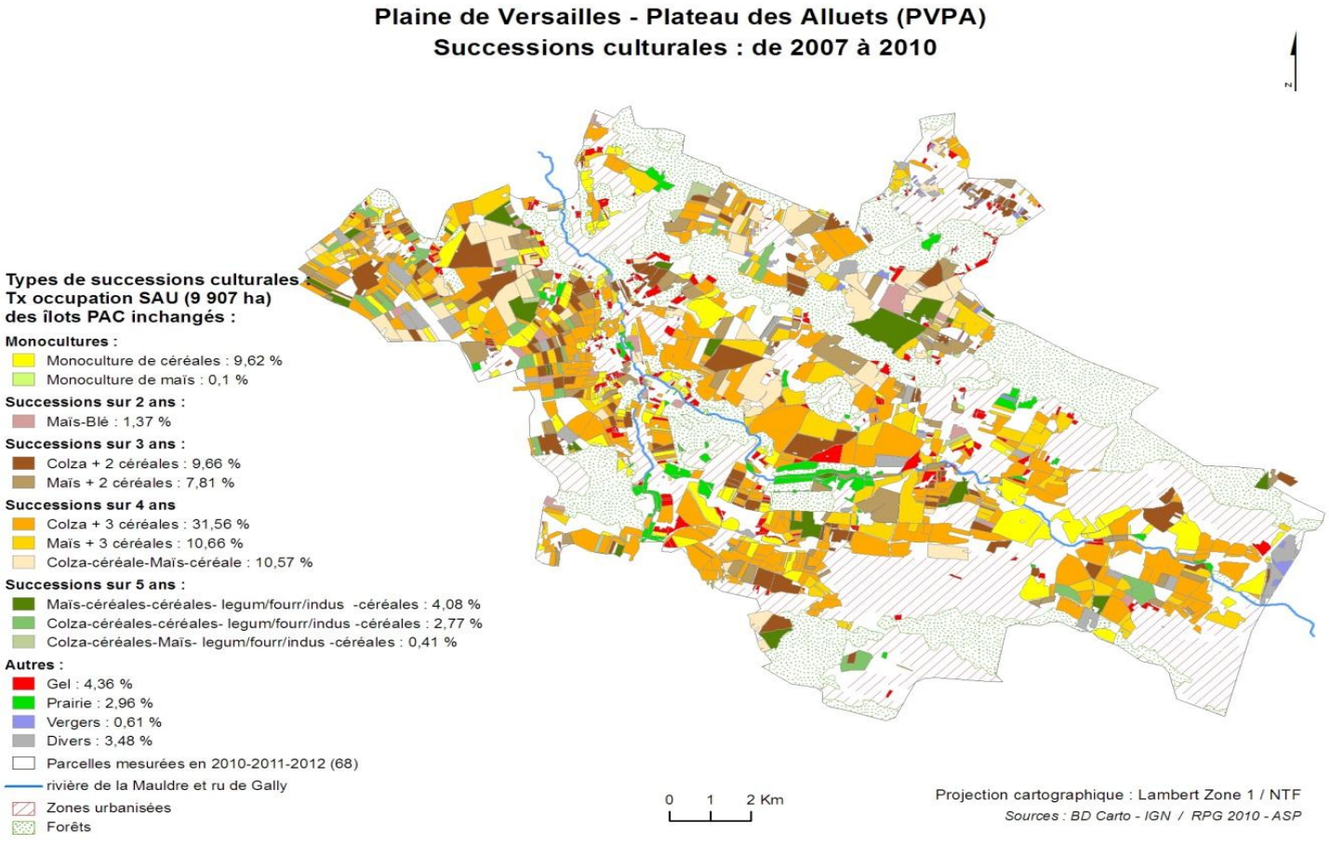


Figure 3.10 : Successions culturales reconstituées à partir des occupations du sol déclarées dans les îlots PAC

On constate que les successions de culture les plus fréquentes dans le territoire sont des successions sur trois ans et surtout quatre ans, à tête d'assolement colza (colza-blé-blé-orge ou colza-blé-blé-blé), qui occupent près du tiers de la SAU, ou à tête d'assolement Maïs, voire les deux (colza-blé-maïs-blé). Le blé dans la Plaine est ainsi cultivé derrière des précédents colzas, maïs mais aussi blés. Les autres successions, incluant par exemple des légumineuses, sont faiblement représentées, du fait de la faible part de l'élevage.

Ces successions de culture se trouvent cultivées, dans le territoire, sur les deux grands types de sols retenus, les limons profonds et les sols argilo-calcaires, avec toutefois une localisation préférentielle des successions incluant la culture de maïs sur les limons profonds pour une meilleure alimentation hydrique du maïs.

[6] Ce travail a été réalisé par Dalila Hadjar et Jean-Marc Gilliot : qu'ils en soient ici vivement remerciés !

Tableau 3.17. Récapitulatif des successions de cultures reconstituées à partir des données PAC du territoire

Type de succession	Successions	Superficie	Pourcentage de la SAU
M + 2 Céréales	M/B/O printemps ou Escourgeon	268	2.8
	M/B/B	489	5.0
C + 2 Céréales	C/B/ O printemps ou Escourgeon	232	2.2
	C/B/B	719	7.1
	C/ O printemps ou Escourgeon /B	25	0.3
C + 3 Céréales	C/B/B/ O printemps ou Escourgeon	1281	12.6
	C/B/ O printemps ou Escourgeon /B	453	4.5
	C/ O printemps ou Escourgeon / O printemps ou Escourgeon / O printemps ou Escourgeon	81	0.7
	C/B/B/B	1170	11.6
	C/B/ O printemps ou Escourgeon / O printemps ou Escourgeon	228	2.2
M + 3 Céréales	M/B/B/ O printemps ou Escourgeon	407	4.1
	M/B/ O printemps ou Escourgeon /B	122	1.1
	M/ O printemps ou Escourgeon / O printemps ou Escourgeon / O printemps ou Escourgeon	38	0.4
	M/B/B/B	437	4.3
	M/B/ O printemps ou Escourgeon / O printemps ou Escourgeon	94	0.8
C-Céréale-M-Céréale	C/B/M/B	1050	10.3
	C/B/M/ O printemps ou Escourgeon	46	0.3
Monocultures	B/B	607	6.0
	O printemps ou Escourgeon /B	167	1.7
	O printemps ou Escourgeon / O printemps ou Escourgeon	179	1.8
	M/M	8	0.1

Si on compare les pourcentages des superficies des successions de culture dominantes sur le territoire avec les pourcentages des superficies des successions dominantes dans notre échantillon, *nous constatons que notre échantillon est assez représentatif et reproduit bien les successions pratiquées à l'échelle du territoire*, car les pourcentages observés sont voisins de ceux obtenus grâce aux données reconstituées sur le territoire.

3.3.3. Récapitulatif : successions et modes de conduites sur les différents types de sols, pratiques de fertilisation

Rappelons que nous ne pouvons pas à l'échelle du territoire, obtenir une représentation des pratiques de fertilisation minérale et organique équivalente à ce que nous avons obtenu précédemment pour les successions de culture, compte tenu que ces données ne sont pas enregistrées de manière systématique à l'échelle de territoires. L'analyse des modes de fertilisation chimique des cultures dans les différentes successions de nos exploitations d'enquête montre cependant des *pratiques relativement voisines* pour une succession donnée entre exploitations, tant dans les doses apportées que dans les nombres et périodes d'apport prévues. Les agriculteurs apportent des quantités relativement importantes d'azote sur blé, sans réellement modifier leurs doses ni en fonction du type de sol, ni de l'apport ou non de PRO sur la succession. Seul le précédent cultural est réellement pris en compte, pour augmenter la dose d'azote sur blé quand il suit un maïs ou un blé. Les rendements-objectifs visés sont toujours élevés (de l'ordre de 90 qx/ha) et ce dans les deux types de sols et pour tous les précédents.

Même si tous les agriculteurs enquêtés déclarent suivre la méthode du bilan prévisionnel de l'azote pour déterminer leurs doses totales on constate qu'ils réalisent de fait un très petit nombre de mesures de reliquats d'azote en sortie d'hiver dans leurs exploitations, lorsqu'ils le font (1, voire 2 parcelles au maximum par an), et de fait modulent peu les doses apportées en fonction de ces niveaux de reliquats. Les successions de culture qui n'incluent pas une culture de maïs sont cultivées sur les deux types de sols les plus répandus sur le territoire. Par contre, les successions de culture incluant une culture de maïs sont exclusivement cultivées sur un sol limoneux profond chez les agriculteurs enquêtés.

On constate une pratique générale de l'enfouissement des résidus de culture, sauf dans les quelques cas où de l'échange paille-fumier a lieu, notamment avec les centres équestres.
Nous proposons donc à l'issue de cette analyse une identification des triplets successions, types de sols et fertilisation moyenne pour les cultures comme suit (Tableau 3.18).

Tableau 3.18. Triplets successions, types de sols et Fertilisation moyenne pour les successions principales à partir des agriculteurs enquêtés

Successions *(nombre d'agriculteurs)*	**Durée (ans)**	**Type de sol**	**Fertilisation azotée en kg N/ha/an par culture (ordre dans la succession)**				**Moyenne kg N/ha/an**
Colza+3Céréales *(6)*	4	Limon profond ou Argilo- calcaire	170	170	190	100 ou 90 (orge)	157
Maïs+3Céréales *(3)*	4	Limon profond	105	170	170	80 (orge)	131
Colza/blé/Maïs/blé *(5)*	4	Limon profond	170	162	150	190 (blé)	168
Colza+2Céréales *(3)*	3	Limon profond ou Argilo- calcaire	182	190	127	-	166
Maïs+2Céréales (1)	3	Limon profond	120	168	125	-	138
Monoculture Blé	1	Limon profond	200	190	-	-	195
Monoculture Orge (1)	1	Argilo- calcaire	80		-		80
Blé /Orge (1)	1	Argilo- calcaire	200	190	-		195

(n) = nombre d'agriculteurs présentant cette succession dans l'échantillon

Nous avons essayé en fonction de ces données et compte tenu des surfaces occupées par chaque type de succession de culture dans le territoire, d'avoir une estimation des quantités de N minéral nécessaires pour la fertilisation de ces cultures afin de les comparer ensuite aux quantités de N disponible provenant des PRO durant une année sur ce territoire. Les arrières-effets des PRO sont difficilement estimables. Il en résulte qu'il nous faut environ 1308 t N/an pour fertiliser les cultures avec les pratiques actuelles afin de permettre l'obtention des niveaux de rendements équivalents à ceux obtenus actuellement (Tableau 3.19).

Tableau 3.19: Apports moyens annuel en N minéral pour les cultures sur le territoire

	Superficie cultivée	**SAU**	**N min moyen**	**Apports moyen**
	ha	%	kgN/ha an	tN/an
Colza+3 céréales	3213	31.6	158	492
Maïs+3 céréales	1098	10.7	131	139
Colza/blé/maïs/blé	1050	10.6	168	176
Colza+2 céréales	976	9.7	172	164
Maïs+2 céréales	757	7.8	176	136
Monoculture blé	607	9.6	210	200
Monoculture maïs	8	0.1	150	1
Total		80		1308 tN

D'après les résultats de N disponibles dans les PRO à l'échelle territoriale calculées auparavant (Tableau 3.12), on remarque que les quantités d'azote minéral disponibles à partir des PRO sont faibles et **ne représentent que 13% des besoins des cultures en azote minéral**.

3.3.4. Perception des PRO par les agriculteurs (issue du travail de thèse de Steve Joncoux)

Nous n'avons pas mené nous mêmes de travaux sur la perception par les agriculteurs des PRO et de leur utilisation dans la fertilisation, car nous n'en n'avons pas les compétences. Mais nous savons que ces aspects d'ordre sociologique peuvent avoir des conséquences importantes sur les pratiques actuelles ou futures en matière

d'utilisation de PRO. Dans le cadre de la thèse en cours de Steve Joncoux menée dans le cadre du programme ISARD, nous pouvons tirer les éléments suivants (Joncoux, 2013)
Le choix des agriculteurs d'utiliser ou non des PRO, et éventuellement le choix de leur nature lorsqu'ils en utilisent, semblent, selon l'enquête sociologique, et conformément à d'autres travaux (Borraz 2000; Barbier et Lupton 2003; Nicourt et Girault 2003) être liés à cinq critères déterminants, non indépendants et qui se combinent pour induire des modes de décision complexes, plus ou moins explicites selon les agriculteurs :

- La *sensibilité personnelle à la qualité du sol* et à l'importance de maintenir cette qualité : elle est très variable entre agriculteurs et cette attention peut se « mesurer » notamment par la fréquence des analyses de sols que réalise l'agriculteur
- La *tenure de la terre* : les agriculteurs propriétaires, ou locataires au sein de la famille, semblent accorder plus d'importance que les locataires hors cadre familial, à l'entretien de la fertilité et de la qualité des sols, notamment à la teneur en matière organique.
- La *présence ou pas d'une double activité* de la part de l'exploitant : on constate que ceux qui ont une autre activité n'utilisent pas de PRO à l'exception notable des exploitants qui ont développé eux-mêmes une activité liée à la gestion des PRO (plate forme de compostage de déchets verts) : celle-ci les incite particulièrement à cette utilisation en quantité et en fréquence
- Le *mode de commercialisation* des produits semble jouer un rôle important, les céréaliculteurs en lien avec les négociants étant réticents, notamment à l'utilisation de boues d'épuration, évoquant une difficulté historique (cahiers des charges ayant un temps exclu les boues pour des légumes de plein champ). Ceux qui vendent en coopérative peuvent par contre être incités à acheter les PRO commercialisés par les coopératives (ici, Humival et Fertilys)
- Des *liens entre agriculteurs*, par exemple pour le prêt de matériel d'épandage, peuvent faciliter le choix de pratiquer une fertilisation organique. A l'inverse, la réalité ou la perception d'hostilités de la part de l'entourage de l'exploitation (habitants proches) peut inciter à ne pas pratiquer.

Quatre types d'agriculteurs sont distingués, hors agriculteurs en conduite biologique : les non utilisateurs, les opportunistes, ceux qui considèrent qu'ils utilisent des déchets et ceux qui considèrent qu'ils utilisent des produits organiques. Sans entrer dans le détail de ces catégories (dont Joncoux précise qu'elles ne prétendent pas à l'exhaustivité compte tenu du petit nombre d'agriculteurs enquêtés), signalons que les non utilisateurs se partagent entre ceux qui ne souhaitent pas utiliser des produits organiques (notamment par crainte de discréditer la production) et ceux qui considèrent que des produits organiques « fiables » sont trop chers. Les opportunistes peuvent épandre des PRO de façon occasionnelle, par exemple si une analyse a montré la baisse de teneur en MO dans une parcelle. Les utilisateurs de « déchets » sont le plus souvent eux-mêmes liées à des activités de gestion de PRO et/ou attirés par le caractère gratuit de certains PRO. Les utilisateurs de produits sont particulièrement sensibles aux questions de qualité des sols et choisissent les PRO d'abord en fonction de leur efficacité amendante et fertilisante.

Cette première typologie peut être une clé de compréhension pour la variabilité observée des comportements actuels. Il reste que nous n'avons pas pu analyser de façon fine dans chaque cas quel était le croisement entre les pratiques observées aujourd'hui et ces types de comportement. Dans l'hypothèse où, dans la suite de ce travail de thèse, des analyses plus systématiques de scénarios d'insertion de PRO seraient menés avec les agriculteurs, alors il faudrait très certainement mieux associer l'aspect sociologique à l'étude pour pouvoir comprendre les réactions des agriculteurs

3.4. CONCLUSION :

A partir des données d'enquêtes, nous avons pu réaliser un inventaire des PRO présents sur le territoire, qu'ils en soient issus ou qu'ils viennent de l'extérieur, et nous les avons caractérisé sur le plan agronomique, en distinguant valeurs fertilisantes et valeurs amendantes. Nous avons ainsi abouti à deux catégories de PRO quantifiées sur le territoire. Dans les enquêtes effectuées auprès des exploitants agricoles nous constatons que plusieurs successions de cultures existent dans les systèmes de grande culture, les agriculteurs construisant et affectant ces successions aux parcelles en fonction notamment des types de sols qu'ils ont dans l'exploitation. Au total environ 50% environ des agriculteurs du territoire épandent des PRO mais leurs pratiques de fertilisation restent inchangées par rapport aux agriculteurs qui n'apportent pas de PRO sur leurs parcelles. Les épandages de PRO, quand ils existent, sont souvent réalisés en tête d'assolement (colza généralement) et plus rarement sur les cultures de printemps (Maïs)

Une classification des successions de culture a été effectuée en fonction des superficies cultivées et du nombre d'agriculteurs les exerçant. Cette classification prend en compte les doublets : successions de culture*type de sol. Ces doublets ont été comparés aux données collectés à travers des enregistrements PAC afin de vérifier la représentativité de notre échantillon. Les pratiques de fertilisation ont été relevées et moyennées afin d'avoir des triplets : succession de culture* type de sol* gestion de fertilisation. Ces triplets vont ensuite servir à l'élaboration des scénarios de substitution des engrais azotés par les PRO existants sur le territoire.

Les apports aux cultures observés sur le territoire estimés à partir du relevé de ces successions sont largement supérieurs aux quantités d'azote disponibles via les PRO. Les quantités de N disponibles provenant de la minéralisation de l'azote organique des PRO et de leur fraction minérale ne représentent aujourd'hui que 13% des besoins des cultures. Cependant, on tentera néanmoins de raisonner des substitutions PRO-engrais chimiques dans différents scénarios, ce qui nous permettra en retour d'estimer les besoins du territoire en PRO pour mieux satisfaire ces substitutions.

Chapitre 4 :
INTERET ET CALAGE DU MODELE STICS POUR DECRIRE LA DYNAMIQUE DE L'AZOTE EN CAS D'APPORTS REPETES DE PRO : EXEMPLE DE L'ESSAI QUALIAGRO

CHAPITRE 4 : INTERET ET CALAGE DU MODELE STICS POUR DECRIRE LA DYNAMIQUE DE L'AZOTE EN CAS D'APPORTS REPETES DE PRO : EXEMPLE DE L'ESSAI QUALIAGRO

Ce Chapitre vise à mener un travail préliminaire à la construction et au test de scénarios de substitution d'engrais par des PRO, à savoir le *calage et la validation du modèle STICS*, qui nous servira à l'évaluation des scénarios. Ce modèle doit être paramétré de manière adéquate par rapport aux conditions pédoclimatiques du territoire.
C'est à travers l'essai de longue durée Qualiagro que ce calage sera fait.
Le chapitre sera présenté sous forme d'un article scientifique qui est cours de publication.

En France, l'intensification des systèmes de culture a pour conséquence la baisse de la fertilité des sols et ce à travers la baisse des teneurs en matières organiques des sols (MOS). Plusieurs études montrent que la MOS, et l'azote total dans le sol, sont les principaux déterminants de la fertilité et de la qualité des sols, et sont étroitement liés à la productivité des sols (Reeves, 1997, Susanne et Michelle, 1998, Al- Kaisi et al, 2005). L'appauvrissement en ces deux composants dans le sol diminue sa fertilité, ayant comme conséquence une diminution des quantités d'éléments nutritifs et de la productivité (Gray et Morant, 2003). L'apport d'amendements organiques sur les sols peut contribuer à augmenter leur teneur en matière organique, donc leur fertilité (Le Villio et al, 2001, Griffin et al, 2004).
L'une des conséquences de la spécialisation des systèmes agricoles en France depuis les années 70 est la disparition des élevages dans de grandes zones comme le Bassin Parisien. Dans ces régions, la production de composts provenant du traitement biologique des déchets urbains (boues, déchets de cuisine et de jardin, les déchets publics) fournissent des sources de matières organiques alternatives qui pourraient être utilisées pour restaurer les teneurs en matière organique dans les sols cultivés. Dans le territoire de la plaine de Versailles et du plateau des Alluets, nous avons montré que ces sources organiques sont abondantes et diverses et peuvent être valorisées en agriculture (cf chapitre 3). Peltre et al (2012) ont montré que l'utilisation dans les sols cultivés de divers amendements organiques, dont des composts de déchets urbains, permettait l'augmentation des teneurs en C organique de ces sols.
Ces amendements organiques sont aussi des sources d'azote organique et minéral. En général, les composts de déchets urbains ont une dynamique de minéralisation du N organique lente. Plusieurs études montrent que la disponibilité de l'azote durant l'année culturale suivant l'épandage de PRO amendants varie entre 0% et 15%, et diminue entre 1,5% à 5 % au cours des années suivantes (Schlegel, 1992 ; Diez et Kraus, 1997, Mamo et al 1999, Aichberger et al, 2000, Hartl et al, 2005). En revanche, les apports répétés de ces PRO augmentent la disponibilité en azote pour les cultures, variable en fonction des caractéristiques de ces différents types de PRO (Villar et al, 1998, Caravaca et al, 2003, Cellier et al, 2012). Cependant, des pertes d'azote minéral sont possibles *via* la volatilisation de l'ammoniac et/ou *via* la lixiviation des nitrates. Les eaux souterraines pourraient être contaminées en raison de la lixiviation des nitrates due à un bilan azoté excessif (Mamo et al, 1999). Réduire les pertes azotées par lixiviation permettant l'augmentation des quantités de N absorbées par les cultures demeure encore un défi (Singh et al, 2001).

Pour une meilleure compréhension des effets d'apports répétés de PRO et de leurs impacts agro-environnementaux, les *essais de longue durée* sont précieux, en particulier pour mieux comprendre la dynamique du N dans le sol, la fourniture en azote pour les cultures et les conséquences sur la productivité des cultures au fur et à mesure de ces apports répétés de PRO amendants (Amlinger et al, 2003, Guster et al, 2005). L'essai de longue durée Qualiagro est un essai de ce type, dans lequel sont apportés différents composts d'origine urbaine et un fumier de bovins laitiers de litière accumulée dans un système de culture simplifié (Houot et al, 2002).
Par ailleurs, la *modélisation* est un outil précieux pour comprendre l'influence des systèmes de culture sur la dynamique de N et la productivité des cultures dans le système sol-plante-atmosphère ; la modélisation peut

également prédire les pertes azotées, essentiellement *via* la lixiviation de l'azote vers les eaux souterraines (Gerke et al, 1999., Cabrera et al, 2005., Brun et al 2006). Les essais de longue durée permettent le développement, le calage et la validation de ces modèles de culture.

Plusieurs modèles de cultures ont été développés au cours des dernières décennies et validés à l'échelle de la parcelle agricole comme CERES (Ritchie et Otter, 1984) et STICS (Brisson et al 1998, 2002, 2003). Le modèle STICS a été développé par l'INRA et validé sur les cultures les plus utilisées en France (blé d'hiver, maïs etc) mais aussi dans plusieurs autres pays (Jégo et al, 2010., Rodriguez et al, 2004). De nombreuses études ont été effectuées en utilisant le modèle STICS. Ces études se sont intéressées essentiellement au calage et à la validation du modèle à l'aide d'essais au champ. Dans ces études, trois critères ont été utilisés pour la validation du modèle: les rendements des cultures, la dynamique du N minéral et la dynamique de l'eau dans le sol (Brisson et al, 2002, Houlès et al, 2004, Sierra et al, 2003, Corre - Hellou et al, 2009, Jégo et al, 2012). D'autres auteurs ont précisé certains paramètres du modèle. Nicolardot et al (2001) ainsi que Justes et al (2009) ont mis en évidence et intégré au *modèle STICS-résidus* une relation entre les caractéristiques biochimiques des résidus de culture et les paramètres de leur dynamique de minéralisation après leur apport au sol.

La validation du modèle en s'intéressant *à la fois à la comparaison des rendements simulés versus observés et à la dynamique du N minéral et organique dans le sol durant plusieurs années d'apports répétés de PRO* n'a cependant pas encore été effectuée. Or nous souhaitons utiliser ce modèle pour tester les scenarios de substitution des engrais minéraux par des apports organiques. Il est donc important de tester au préalable sa capacité à bien simuler des situations dans lesquelles de nombreuses données expérimentales sont disponibles, grâce à l'essai Qualiagro.

L'objectif de ce chapitre est donc de tester la capacité du modèle STICS à simuler les effets d'apports répétés de différents PRO amendants dans l'essai de longue durée Qualiagro situé dans le territoire d'étude. Les résultats des 11 premières années de cultures seront utilisés pour tester le modèle STICS. Les résultats sur lesquels sera testée la capacité du modèle à simuler les dynamiques de C et N dans un système de culture simplifié incluent l'évolution des stocks de matière organique dans le sol, les rendements des cultures et leurs exportations en N, les flux de N minéral lixiviés. Si le modèle STICS simule correctement ces grandeurs au fur et à mesure des apports, on pourra faire l'hypothèse qu'il peut être utilisé pour tester les différents scenarios de substitution du N minéral par des PRO, ce qui sera fait dans le chapitre 5. Les résultats de simulation seront utilisés pour faire le bilan des flux de N au sein d'un système de culture dans lequel les PRO substituent le N minéral.

4.1. MATERIEL ET METHODES

4.1.1. Essai de longue durée Qualiagro (1998 - 2009)

L'essai de longue durée Qualiagro (Figure 4.1) est situé à Feucherolles (latitude: 48°54'N ; longitude: 1°58'E) sur le plateau des Alluets. Il est donc situé dans le territoire d'étude. L'essai a une surface de 6ha.
L'essai est mis en place sur un Luvisol limoneux (> 200cm de profondeur) dont les caractéristiques initiales de l'horizon de labour (30 cm) sont : argile 152 g/kg, 787 g/kg de limon, 62 g/kg de sable, 10,5 g/kg de C organique et 1,11 g/kg N organique, pH eau de 6.90 (Houot et al , 2002). Quatre amendements organiques sont étudiés : un co-compost de boues d'épuration et de déchets verts (DVB), un compost de biodéchets (BIO), un compost d'ordures ménagères résiduelles (OMR) et du fumier bovin (FB). Les doses d'apport sont calculées pour apporter l'équivalent de 4t Corg/ha. Les doses exactes apportées sont mesurées ensuite lors de l'épandage. Un déchaumage est immédiatement réalisé après épandage des PRO pour les enfouir.

Le dispositif expérimental se compose de *5 traitements organiques* (4 amendements organiques et un traitement témoin sans apport organique) *croisés avec deux doses d'engrais minéral azoté complémentaire* (dose optimale et dose minimale), soit 40 parcelles au total de 450 m^2 chacune.

Avant chaque épandage, des prélèvements sont effectués dans l'horizon de surface du sol (horizon labouré assimilé à 30 cm) pour analyse. Les teneurs en C et N organiques seront présentés dans ce chapitre (microanalyse au CHN).

Les stocks de N minéral et d'eau dans le sol sont mesurés trois fois par ans sur 3 couches 0-30 cm, 30-60cm et 60-90 cm: en sortie d'hiver (fin janvier à mi-février), au moment du semis et après la récolte en novembre pour les années maïs ; en sortie d'hiver (fin janvier à mi-février), après la récolte et juste avant épandage (fin Aout) puis à la reprise du drainage fin Novembre lors des années à blé.

Comme dit précédemment, les mesures de N minéral dans le sol sont effectuées sur 90cm. Afin de comparer les données simulées et observées, nous allons considérer que les quantités d'azote minéral dans l'horizon 60-90cm sont équivalentes aux quantités de N dans l'horizon 90-120cm. Nous avons donc, pour calculer les quantités de N minéral mesurées dans le sol, additionné les quantités de N dans les deux premiers horizons (0-30cm, 30-60cm) avec la quantité de N dans la couche 60-90cm comptabilisée deux fois.

La moyenne des précipitations sur la région d'étude est d'environ 560 mm et la température moyenne est d'environ 11°C. Pour les simulations, l'ensemble des données climatiques proviennent de la station météorologique de Grignon jusqu'en 2003, puis de la station installée sur le site à partir de 2004.

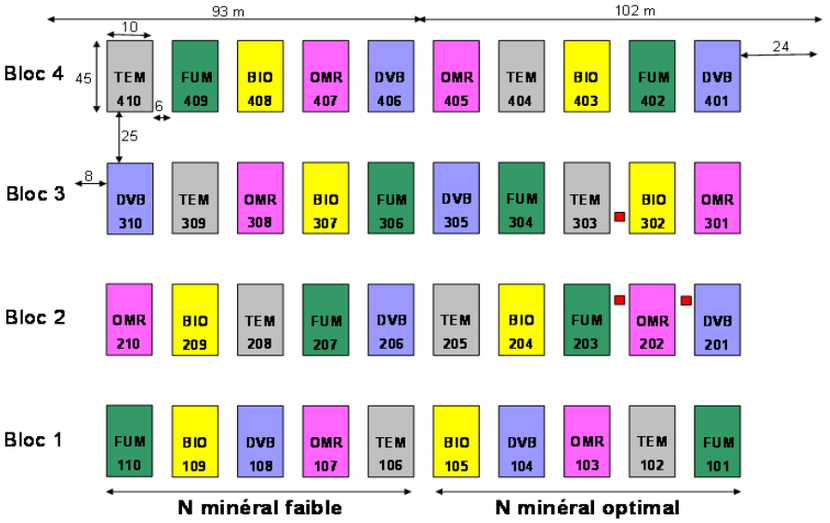


Fig.4.1. Plan de l'essai Qualiagro, TEM : traitement témoin, DVB : co- compost de déchets verts et boue, BIO : co-compost de biodéchets et déchets verts, OMR : compost d'ordures ménagères résiduelles, FUM : Fumier de bovin

4.1.2. Rendements des cultures et caractéristiques des résidus de culture

La rotation de culture adoptée est la *rotation maïs - blé (Orge d'hiver en 2007).* Les variétés utilisées sont Anjou 285 pour le maïs et Isengrain pour le blé d'hiver. Les résidus de culture de blé sont exportés et seuls les chaumes (hauteur moyenne de 20cm) sont enfouis. Par contre, les résidus de maïs sont broyés et incorporés dans le sol après la récolte.La succession de culture sur la période simulée est la suivante : maïs en 1999, blé en 2000, maïs en 2001, blé en 2002, maïs en 2003, blé en 2004, maïs en 2005, blé en 2006, orge en 2007, maïs en 2008 et blé en 2009. En 2007, pour cause de chrysomèle du maïs, une orge de printemps a été semée à la place du maïs.

La fertilisation est en moyenne de 120kgN/ha pour le blé d'hiver et 60 kgN/ha pour le maïs dans les traitements N min optimal et de 60 kgN/ha pour le blé d'hiver dans les traitements N minimal. La fertilisation minérale est réalisée en deux apports identiques pour le blé d'hiver. La première dose est appliquée autour du 15 Février (fin tallage) et la deuxième autour du 15 Mars (début de la montaison). Les dates et doses exactes sont renseignées dans les fichiers d'entrée de STICS.

Les rendements en grains et résidus de culture sont mesurés dans chaque traitement et chaque année par prélèvements manuels et pesées. Les grains et les résidus de culture sont analysés pour chaque récolte. Seules les caractéristiques des premiers résidus de récolte avant le début de l'essai ont été renseignées dans la modélisation (résidus de blés qui est le précédent du maïs 1998). Ces résidus n'ont pas été analysés et les caractéristiques ont donc été estimées en fixant le C/N à 60 afin de mieux maitriser leur dynamique de minéralisation du N. Les teneurs en Corg sont issues d'analyses. Les teneurs en MS et N minéral ont été fixées afin d'homogénéiser les données. Les résultats sont exprimés dans le tableau 4.1.

Tableau 4.1: Caractéristiques des résidus de récolte de blé et de maïs

	MS	Corg	C/N org	Nmin
	%MB	%MS		%MB
Résidus de Blé	90	46	60	0,001

4.1.3. Caractéristiques des amendements organiques

Les épandages ont lieu sur chaumes de blés vers la mi-septembre en 1998, 2000, 2002, 2004, 2006 et 2007. Lors de l'insertion de l'orge en 2007 dans la succession de culture, un épandage supplémentaire a été effectué en 2007, générant 2 épandages successifs en 2006 et 2007. Les amendements organiques sont prélevés au moment de l'épandage et analysés/caractérisés selon les méthodes décrites au chapitre 3 comme pour les autres PRO du territoire. Pour chaque épandage, 3 échantillons sont prélevés et analysés. Les caractéristiques analytiques moyennes de chacun des PRO sont présentées dans les deux tableaux 4.2 et 4.3. Les résultats moyens par année d'apport sont détaillés en annexe. Les teneurs en N des PRO sont caractéristiques des amendements organiques et relativement faibles. Elles diminuent dans l'ordre : FB≈DVB>OMR ≈BIO.

Tableau 4.2 : Caractéristiques des amendements épandus dans l'essai Qualiagro. Moyenne et écart-type des analyses des amendements épandus en 1998, 2000, 2002, 2004, 2006 et 2007. DVB : co- compost de déchets verts et boue, BIO : co-compost de biodéchets et déchets verts, OMR : compost d'ordures ménagères résiduelles, FB : Fumier de bovin

	MS	Corg	Norg	$N\text{-}NH_4$	$N\text{-}N0_3$	P2O5	K	pH
	%MB	%MS	%MS	mg/kgMS	mg/kgMS	%MS	%MS	
DVB	59,3±5,4	26,9±5,7	2,1±0,3	3679±745	100±93	2,8±0,8	1,5±0,5	7,7±0,7
BIO	66,2±6,5	18,4±2,5	1,5±0,3	1146±987	100±81	1,1±0,5	2,1±0,3	8,4±0,4
OMR	68,7±15,0	31,8±4,9	1,6±0,4	2355±2052	8±8	0,7±0,1	0,9±0,1	7,3±0,4
FB	36,2±6,7	32,7±5,3	2,2±0,3	1644±1744	181±183	1,3±0,3	3,6±0,3	9,0±0,2

Tableau 4.3 : Fractions biochimiques et indice de stabilité de la matière organique des amendements (ISMO). Valeurs moyennes et écart-type des différentes fractions (SOL : fraction soluble, HEM : hémicellulose, CEL : cellulose, LIC : lignines, C3j : pourcentage de Corg minéralisé à 3 jours d'incubation). DVB : co- compost de déchets verts et boue, BIO : co-compost de biodéchets et déchets verts, OMR : compost d'ordures ménagères résiduelles, FB : Fumier de bovin

	MO	SOL	HEM	CEL	LIC	C3j	ISMO
	%MS	%MO	%MO	%MO	%MO	%Corg	
DVB	46,4±5,8	45,7±9,4	5,1±2,1	20,8±10,1	28,5±11,9	1,9±0,9	78,9±10,5
BIO	37,3±11,8	44,4±7,7	4,2±2,8	20,3±2,3	31,1±8,9	2,7±1,3	78,1±5,8
OMR	54,7±10,6	42,5±8,7	6,5±2,3	35,8±10,3	15,2±2,4	10,6±3,1	44,8±13,4
FB	59,8±9,5	39,1±5,9	12,0±2,8	25,5±7,7	23,4±2,5	2,8±0,2	68,9±5,9

Les flux de Norg et N minéral sont présentés dans le tableau 4.4.
Les amendements organiques ont également fait l'objet d'un fractionnement biochimique selon la norme XPU 44-162, et l'indicateur ISMO (indice de stabilité de la MO) a été calculé. Les résultats sont présentés dans le tableau 4.3. Les composts DVB et BIO présentent des potentiels d'entretien de la matière organique des sols les plus intéressants avec respectivement des ISMO moyens de 78,9 ± 10,5 et 78,1 ± 5,8. Le fumier est caractérisé par un ISMO moyen de 68,9 ± 13,4 et le compost OMR par un ISMO moyen de 44,8 ± 5,9. C'est ce type de compost qui a le potentiel humique le plus faible, en lien avec les fortes teneurs en cellulose des composts. C'est effectivement pour ce type de compost que les augmentations de C organique dans le sol sont les plus faibles.

Tableau 4.4 : Flux de N organique (Norg) et de N minéral (Nmin) apportés via l'épandage des différents amendements dans l'essai Qualiagro entre 1998 et 2007. DVB : co- compost de déchets verts et boue, BIO : co-compost de biodéchets et déchets verts, OMR : compost d'ordures ménagères résiduelles, FB : Fumier de bovin

PRO	DVB	DVB	BIO	BIO	OMR	OMR	FB	FB
	Norg	Nmin	Norg	Nmin	Norg	Nmin	Norg	Nmin
				Kg N.ha^{-1}				
1998	277	34	257	20	194	22	297	77
2000	343	67	284	5	394	31	214	18
2002	319	69	300	20	155	22	428	25
2004	299	72	228	14	253	19	319	21
2006	306	79	224	13	149	28	337	29
2007	273	63	188	53	158	74	276	19
Total	1816	384	1481	125	1303	196	1871	189
Moyenne	303	64	247	21	217	33	312	32

La dynamique de minéralisation du C et du N au cours d'incubations, dans un sol prélevé dans une parcelle du traitement témoin du dispositif Qualiagro, a été mesurée pour chacun des PRO épandus selon le protocole normalisé XPU 44-162 (cf chapitre 3). Les cinétiques moyennes de minéralisation du C et du N sont présentées dans la figure 4.2. Le compost d'ordures ménagères résiduelles (OMR) est le PRO qui minéralise le plus de C (40,0% de Corg minéralisé à 91 jours d'incubation) et qui immobilise le plus de N minéral dans le sol (-10,1mgN/kg sol à 91 jours d'incubation). Pour les trois autres PRO, la minéralisation du C et du N est faible. La minéralisation du C varie entre 12,2% (DVB) et 20,2% (FB) au bout de 91 jours d'incubation. La minéralisation du N de ces trois PRO est

également faible et les quantités minéralisées varient entre 7,0 mgN/kg sol et 11,2 mgN/kg sol ce qui représente une minéralisation variant entre 4,6 % Norg et 11,0% Norg au bout de 91 jours d'incubation.

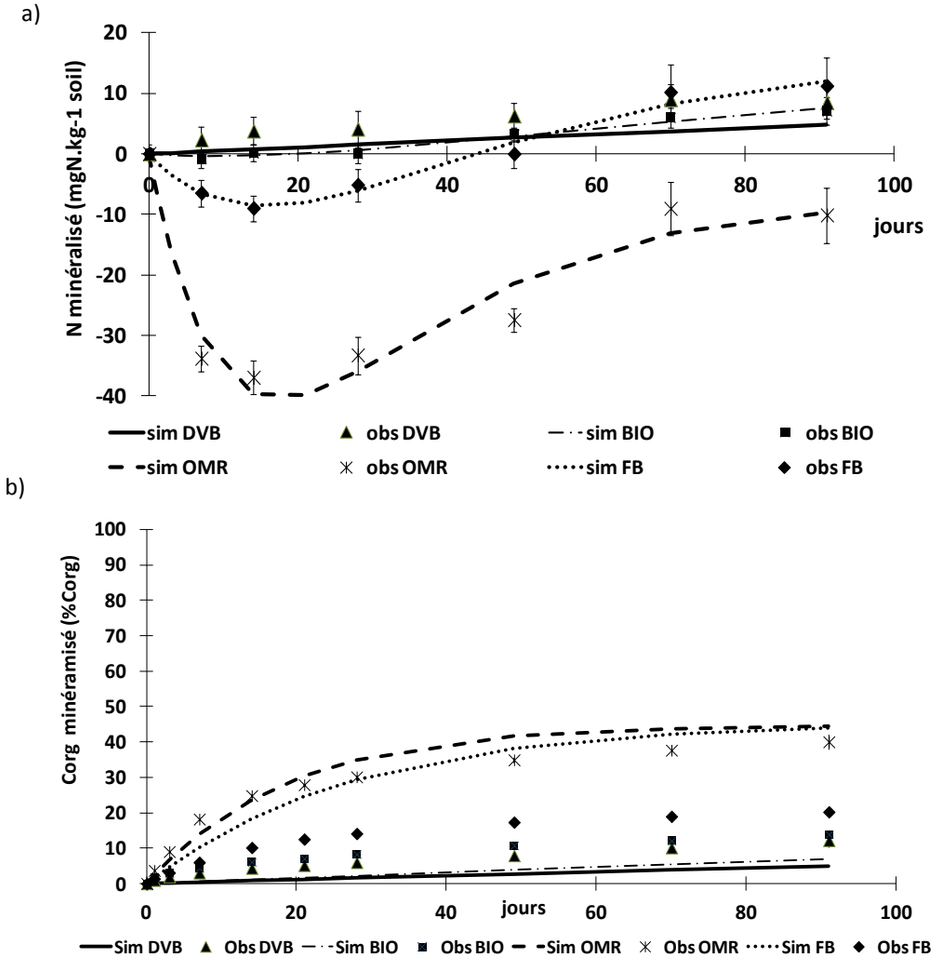


Fig. 4.2. Dynamique de minéralisation de l'azote (a) et du carbone (b) des amendements organiques : moyennes des résultats expérimentaux de 1998, 2000, 2002, 2004, 2006 et 2007 ; cinétiques simulée avec STICS résidus calibrée sur la moyenne des résultats d'incubation.

4.1.4. Modèle STICS 6.9

Nous avons utilisé le modèle de culture STICS dans sa version 6.9 qui simule la dynamique de l'eau, du carbone et de l'azote dans le système sol-plante-atmosphère (Brisson et al, 1998, 2002). STICS est un modèle unidimensionnel à pas de temps journalier. Il est constitué par plusieurs compartiments simulant le couvert végétal, les apports exogènes de matières organiques et le sol, subdivisé en 5 horizons au maximum. Le modèle a déjà été validé pour le maïs et le blé, cultures qui nous concernent (Brisson et al, 2002). Les prélèvements d'eau et d'azote par les cultures (évapotranspiration et absorption de N des cultures) sont calculés en utilisant le concept de facteur limitant entre l'offre des sols et la demande des plantes. Les quantités maximales et critiques de N absorbées par les cultures sont déterminées en fonction de la notion de «courbes de dilution de l'azote» de la biomasse aérienne sèche (Lemaire et Gastal, 1997).

STICS est un modèle à réservoir dans la description des stocks d'eau dans le sol. Le stock d'eau dans le sol est fonction de la masse de terre fine dans chacune des couches calculée *via* la mesure de densité du sol et du taux de pierrosité du sol. Les caractéristiques hydriques du sol sont renseignées pour chacune des couches avec la teneur en eau minimale, en deçà de laquelle les plantes ne pourront plus prélever d'eau (point de flétrissement permanent) et une teneur en eau maximale (capacité au champ). Ces 2 grandeurs sont exprimées par rapport à la masse de terre. Le transport vertical de l'eau se produit lorsque la teneur en eau dépasse la capacité au champ.
La matière organique humifiée du sol (MOS) est considérée comme étant dans l'horizon de surface uniquement. Elle est composée d'une fraction passive et d'une fraction active qui représente 35% de la MOS. Cette fraction active se décompose selon le coefficient k_2 qui est la vitesse de décomposition de cette matière organique et est dans ce sol de 0,105 an^{-1}. Ce coefficient dépend de la teneur en argile, du contenu en $CaCO_3$ ainsi que de la teneur en eau et de la température du sol. Le C/N de la MO active est de 9,5.

Quand une matière organique exogène (résidus ou PRO) est apportée au sol, sa dynamique de décomposition génère une biomasse zymogène qui, en se décomposant, donne de la MO active du sol (Figure 4.3). La minéralisation nette des PRO dépend du taux de décomposition de la MO constituant ces PRO par la biomasse microbienne et leur rapport C/N. Cette minéralisation est simulée en utilisant le modèle décrit par Nicolardot et al (2001). Dans le modèle STICS complet, les paramètres décrivant la dynamique de minéralisation du N organique des PRO et des résidus de culture sont déterminés à partir de leur rapport C/N.
La dynamique de décomposition des résidus de culture a d'abord été simulée en utilisant ces paramètres calculés par STICS fonction de leur rapport C/N. Les rendements du blé d'hiver étaient alors très faibles comparativement à ceux observés. Cette sous-estimation était due aux quantités importantes de N immobilisées lors de la dégradation des résidus de récolte du maïs. Une modification de ces paramètres pour limiter les quantités de N immobilisées a été effectuée. Les paramètres finaux sont présentés dans le tableau 4.5 et la figure 4.4.

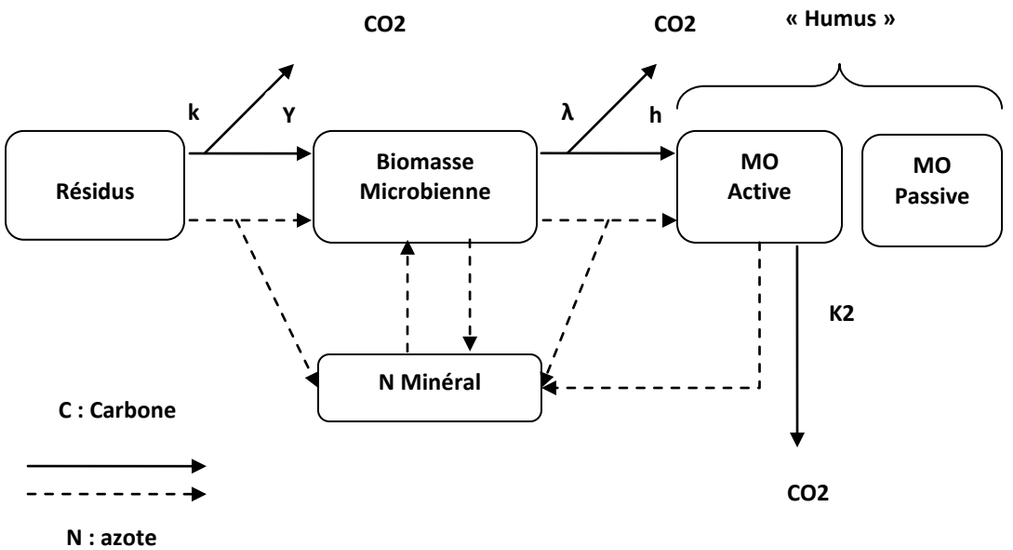


Fig.4.3. Représentation du module STICS résidus. k et λ : coefficients de décomposition (j^{-1},) Y : rendement d'assimilation du PRO par les microorganismes ($g.g^{-1}$), h : rendement d'intégration dans la matière organique du sol issue de la matière organique assimilée par les microorganismes ($g.g^{-1}$), k2 (an^{-1}) : coefficient de minéralisation de la MOS.

Tableau 4.5 : Paramètres régissant la dynamique d'évolution du N des différents PRO dans le modèle STICS résidus (cf figure 2). SSD : Somme des carrées des écarts entre la cinétique simulé pour un type de PRO et la cinétique mesurée.

	k (j^{-1})	λ (j^{-1})	Y ($g.g^{-1}$)	h ($g.g^{-1}$)	C/N mb*	SSD
DVB	0,002	0,003	0,62	0,9	9,1	0,05
BIO	0,002	0,001	0,62	0,7	8,3	0,05
OMR	0,06	0,06	0,62	0,9	6,5	0,16
FB	0,04	0,04	0,62	0,9	8,4	0,14
Résidus de culture	0,1	0,03	0,53	0,2	15	*

*mb: biomasse microbienne zymogène ; ** pas de résultats expérimentaux

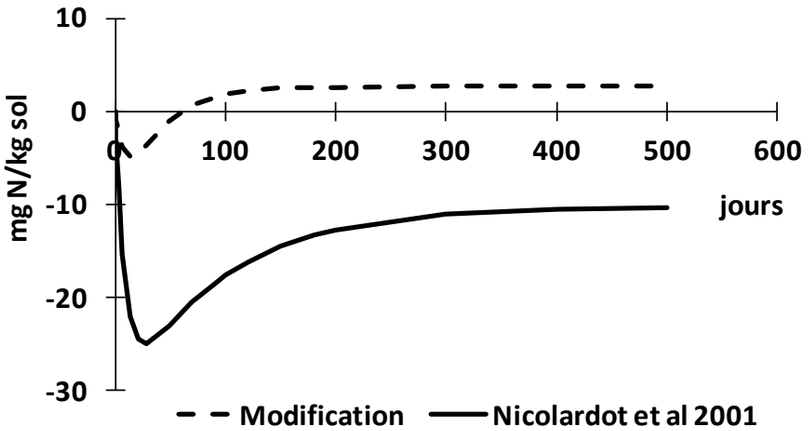


Fig.4.4. Dynamique de minéralisation de l'azote avant (Nicolardot et al, 2001. Trait plein) et après modification des paramètres (trait discontinu)

De même pour les PRO, les paramètres ont été ajustés par calage préalable *via* un travail spécifique effectué avec le sous-module STICS-résidus. Les différentes courbes de minéralisation de l'azote obtenues pour chacun des PRO épandus ont été moyennées afin d'obtenir une courbe de minéralisation moyenne pour chaque amendement organique. Ensuite, les paramètres qui génèrent la dynamique du N dans le modèle sont optimisés à l'aide du sous-modèle STICS-résidus par minimisation de la somme des carrés des écarts (SSD) entre la courbe simulée et la courbe moyenne. Comme pour les résidus de culture, dans le cas du compost BIO et du FB, nous avons effectué quelques modifications de la cinétique de minéralisation de N, afin d'avoir des niveaux de rendements les plus proches des données mesurées. Les cinétiques modifiées et les paramètres utilisés dans STICS sont présentés dans la figure 4.5 et le tableau 4.5. Le modèle prend en compte les pratiques culturales : travail du sol (date, profondeur), enfouissement des résidus (date, quantité, de la profondeur d'enfouissement, C/N du résidu), le semis (date, profondeur de semis, la densité de semis, la variété), l'irrigation (date, quantités), la fertilisation azotée (date, quantités apportées, type d'engrais minéral ou organique), la présence de mulch (quantité, type).

En fin de simulation d'une saison culturale, la fraction non minéralisée des résidus de cultures ou des PRO est incorporée dans le compartiment de matière organique active du sol.

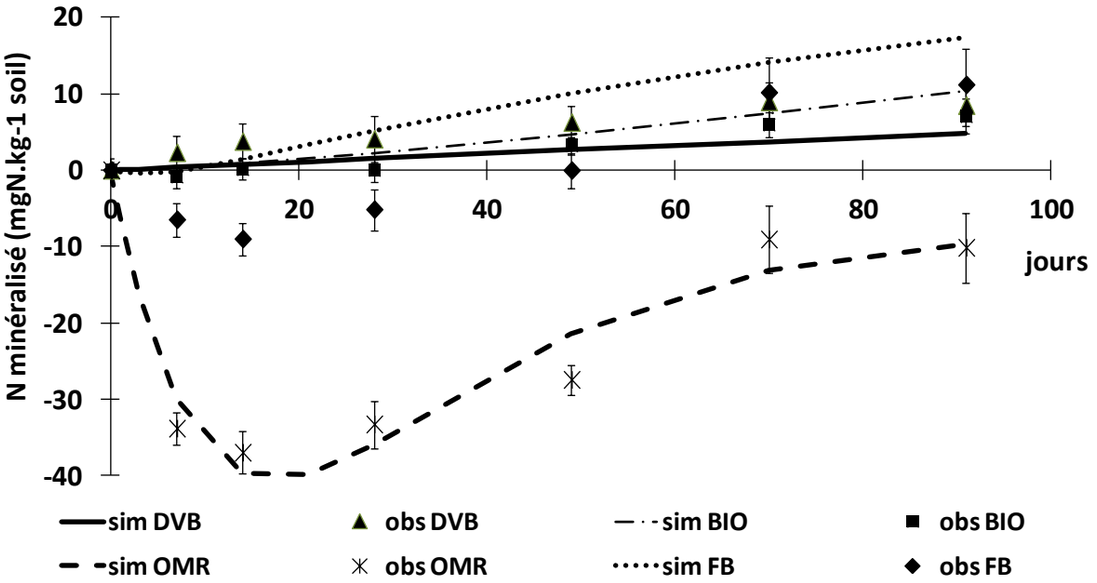


Fig.4.5. Dynamique de minéralisation de l'azote des amendements organiques après modification des paramètres du BIO et FB

4.1.5. Les conditions de simulation

La période simulée couvre 11 ans et va du premier apport des PRO en 1998 jusqu'à la veille de l'apport des PRO en 2009. Cette période est découpée en 11 unités de simulation qui vont de la récolte du précédent cultural à la récolte de la culture à simuler. Les simulations des différentes années culturales sont enchainées. Les unités de simulations vont de la récolte de l'année n à la récolte de l'année n+1, sauf pour la première année pour laquelle la simulation commence juste avant l'épandage des PRO.

Les traitements simulés sont : témoin fertilisé (TF), témoin non fertilisé (TNF), DVB, BIO, OMR et FB.
La variété de blé d'hiver utilisée dans l'essai, « Isengrain », a des propriétés physiologiques similaires à la variété "Soissons" paramétrée dans le modèle et qui est donc la variété utilisée pour nos simulations. La variété de maïs «Anjou 285 », utilisée dans l'essai, est directement paramétrée dans le modèle. Pour cette culture de maïs, nous avons également dû modifier la vitesse de croissance du front racinaire qui passe de 0,15 cm/°j à 0,2 cm/°j. En effet, nous avons constaté que la culture de maïs souffrait d'un manque d'eau lors de son développement en utilisant les paramètres initiaux. En modifiant ce paramètre, la qualité des résultats est devenue plus satisfaisante.
La culture d'orge d'hiver n'est pas paramétrée dans le modèle, nous avons donc simulé le développement dune culture de blé que nous avons essayé de stresser en appliquant une année climatique sèche qui est l'année climatique 2002/2003.
Tous les paramètres par défaut de ces variétés sont utilisés.

Le paramétrage du sol est fait à partir des données homogénéisées sur les 120cm qui constituent la profondeur analysée. 4 horizons de même épaisseurs sont définis (tableau 4.6). La teneur en eau, les quantités de N minéral et organique sont initialisées pour chaque traitement en utilisant les données mesurées.

Tableau 4.6. Caractéristiques du sol

	profondeur	Densité apparente	Teneur en eau à pF 2,5	Teneur en eau à pF 4,2	Argiles	Limons	Sables
	cm		g/g soil		g/kg soil		
Horizon 1	30	1.32	0.27	0.11	152	787	62
Horizon 2	30	1.48	0.19	0.07	219	724	58
Horizon 3	30	1.50	0.19	0.10	311	646	43
Horizon 4	30	1.47	0.19	0.10	272	702	26

4.1.6. Evaluation du modèle

Trois critères statistiques pour l'évaluation du modèle ont été utilisés et sont :

Efficience du modèle (EF) : valeur optimale = 1.

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^{n}(Oi-\bar{O})^2 - \sum_{i=1}^{n}(Si-Oi)^2}{\sum_{i=1}^{n}(Oi-\bar{O})^2}$$

Déviation normalisé (ND) : valeur optimale = 0

$$ND = \frac{\sum_{i=1}^{n}Oi-\sum_{i=1}^{n}Si}{\sum_{i=1}^{n}Oi}$$

Erreur quadratique moyenne (RMSE). Valeur optimale = 0

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(Si-Oi)^2}{n}}$$

Où n est le nombre d'observations, Oi, la valeur observée, ô, la moyenne des valeurs observées, et Si la valeur prédite par le modèle.
Une EF>0,6 constitue une efficience satisfaisante de la simulation. Une Erreur quadratique moyenne < 15 % est considérée comme très bonne.

4.2. RESULTATS ET DISCUSSION

4.2.1. Rendements des cultures

La simulation des rendements des cultures et l'absorption de N sont deux critères importants pour la validation du modèle dans notre étude. Avec l'utilisation des paramètres initiaux de dégradation des résidus de récolte, les rendements simulés étaient très sous-estimés. Les quantités importantes d'azote réorganisé par les micro-organismes lors de la dégradation des résidus de maïs, en raison de leur rapport C/N élevé, diminuait la disponibilité en azote pour les cultures de blé d'hiver. Après modification des paramètres de la dynamique de dégradation des résidus de culture, cette période d'immobilisation est plus réduite et la re-minéralisation de l'azote plus rapide (cf. figure 4.4). Suite à ces modifications, les rendements simulés sont satisfaisants (figure 4.6 et 4.7, tableau 4.7). En général, les rendements des cultures dans le modèle STICS sont bien prédits. Comme le montre Houlès et al (2004) et Constantin et al (2012), en utilisant des données issues d'essais aux champs sur des traitements fertilisés. Dans notre cas, après modification des paramètres dynamiques des résidus de récolte, les simulations sont correctes malgré une légère sous-estimation des rendements qui reste encore visible. Beaudoin et al (2008) ont également

trouvé qu'il y avait une surestimation des quantités de N immobilisées dans le sol associée à la dégradation des résidus de maïs, mais aussi à des défaillances dans le paramétrage des cultures. La conséquence était que le modèle sous-estimait les rendements des cultures. D'autres études avaient dû préalablement également proposé des modifications de certains paramètres du modèle STICS afin d'avoir de meilleures qualités de simulation. Constantin et al (2012) ont modifié la profondeur racinaire maximale des cultures, la durée de vie des feuilles, la proportion de la matière organique active dans le sol et la teneur en Norg initial du sol ; Brisson et al (2002) ont aussi effectué des modifications sur les paramètres de développement de la culture.

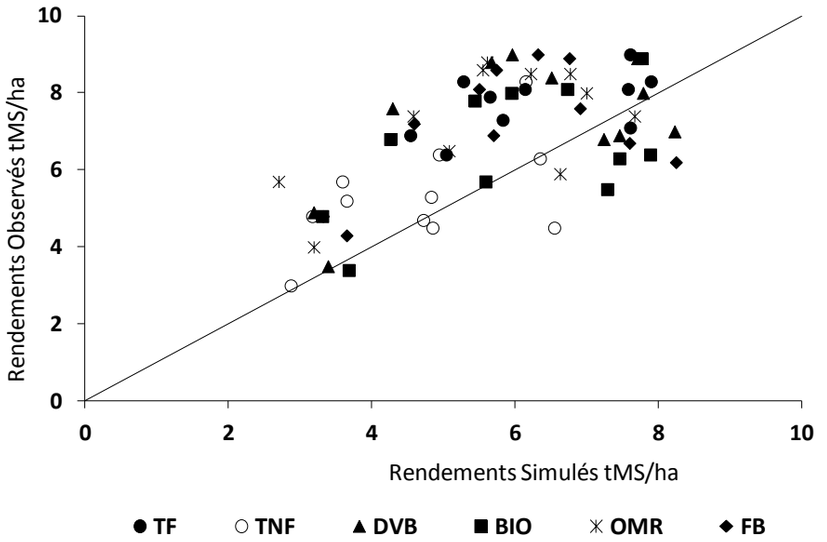
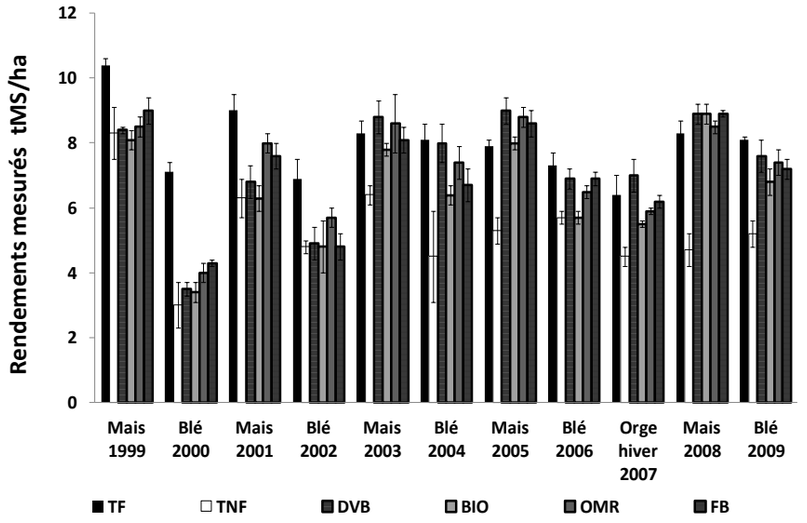


Figure 4.6. Comparaison entre les rendements simulés/observés des différents traitements durant les 11 ans de l'essai

Au cours des 4 premières saisons culturales, les rendements dans les traitements amendés sont plus faibles que ceux dans le traitement témoin fertilisé (Figure 4.7). Mais *à partir de la quatrième saison culturale, les rendements augmentent dans les traitements organiques* pour atteindre des niveaux du même ordre de grandeur que dans le témoin fertilisé, ceci en raison des effets cumulatifs des apports de PRO. Pour toutes les années, les rendements dans le traitement témoin non fertilisé sont toujours les plus faibles.

a)



b)

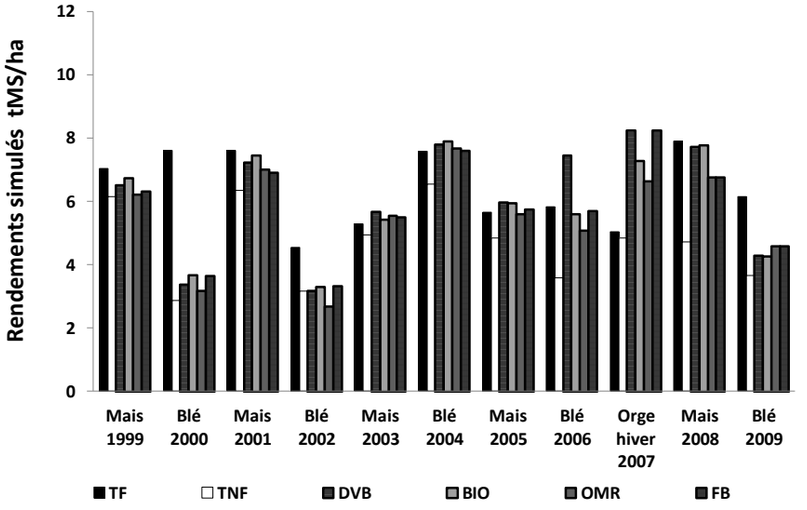


Fig. 4. 7. Rendements observés (a) et simulés (b) des différents traitements durant les 11 ans de l'essai

Après des apports répétés de PRO durant 11 ans, une classification peut être faite entre les traitements, basée sur les niveaux rendements obtenus. Il est intéressant de comparer le classement observé et celui simulé afin de tester les performances du modèle. Pour les rendements observés (Figure 4.7a), nous avons la classification suivante :
TF = DVB = FB > OMR > BIO >> TNF.

Dans le cas simulé (Figure 4.7b), les traitements se classent dans cet ordre,
TF > DVB > FB > BIO > OMR >> TNF.

Tableau 4.7. Indicateurs de qualité des simulations des traitements simulés : EF : efficience de la simulation, RMSE : erreur quadratique moyenne, ND : Déviation normalisée

		EF	RMSE	ND
FC	Rendements	-2.5	1.9	0.2
UFC	Rendements	-0.1	1.4	0.1
DVB	Rendements	-0.3	1.9	0.2
BIO	Rendements	-0.1	1.6	0.1
OMR	Rendements	-1.1	2.1	0.2
FB	Rendements	-0.3	2.0	0.2
FC	N org	-0,44	1572,4	-0,1
UFC	N org	0,36	199,0	0,0
DVB	N org	0,25	394,9	0,1
BIO	N org	-0,79	437,4	0,1
OMR	N org	-1,26	177,3	0,2
FB	N org	0,81	112,4	0,2
FC	N absorbé	-0,8	39,6	0,0
UFC	N absorbé	-2,2	38,3	-0,2
DVB	N absorbé	-0,5	50,9	-0,1
BIO	N absorbé	-2,4	66,1	-0,3
OMR	N absorbé	-1,0	53,3	0,0
FB	N absorbé	-1,7	57,8	-0,2

En général, les prédictions du modèle donnent donc des résultats satisfaisants. La substitution des engrais à moyen et long terme *via l*'apport répété de PRO à valeur amendante importante pourrait donc être possible.

4.2.2. Absorption d'azote par les cultures

Les quantités de N absorbées par les cultures durant la période de simulation de l'essai sont en général *surestimées par le modèle* (figure 4.8 et 4.9 a et b, et cf tableau 4.7). Si on considère le blé de 2004, 2006 et l'orge d'hiver de 2007, le modèle a surestimé l'absorption de N sans pour autant enregistrer des niveaux de rendements supérieurs dans ces différents traitements. Durant cette période, le modèle simule des quantités importantes de N disponible dans le sol et qui sont absorbées par les cultures durant leur phase végétative, ce qui augmente considérablement la biomasse aérienne des cultures sans avoir une influence directe sur les rendements simulés.

Les modifications effectuées sur les paramètres régissant la dynamique de N des résidus de récolte pourraient également expliquer la surestimation de l'azote minéral disponible dans le sol. Mais cet argument ne pouvait pas constituer à lui seul la raison de cette forte surestimation de l'absorption de N pour la période entre 2004 et 2007.

En revanche, l'effet de cette modification de la dynamique du N lors de la dégradation des résidus de récolte devrait avoir, à peu de choses près, la même influence chaque année et non pas spécifiquement les années 2004, 2006 et 2007.

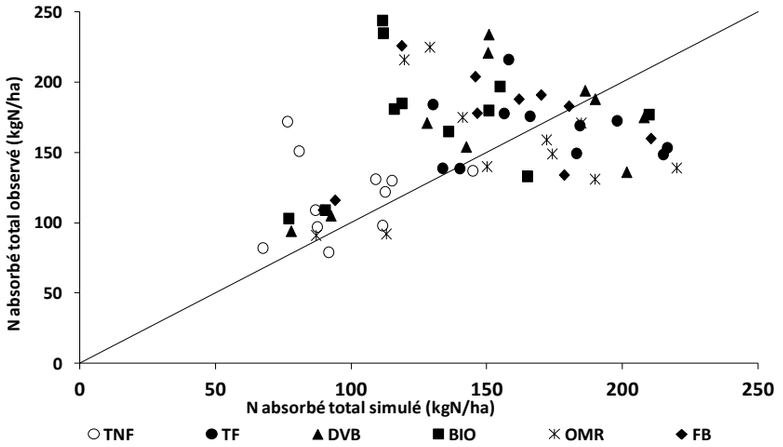
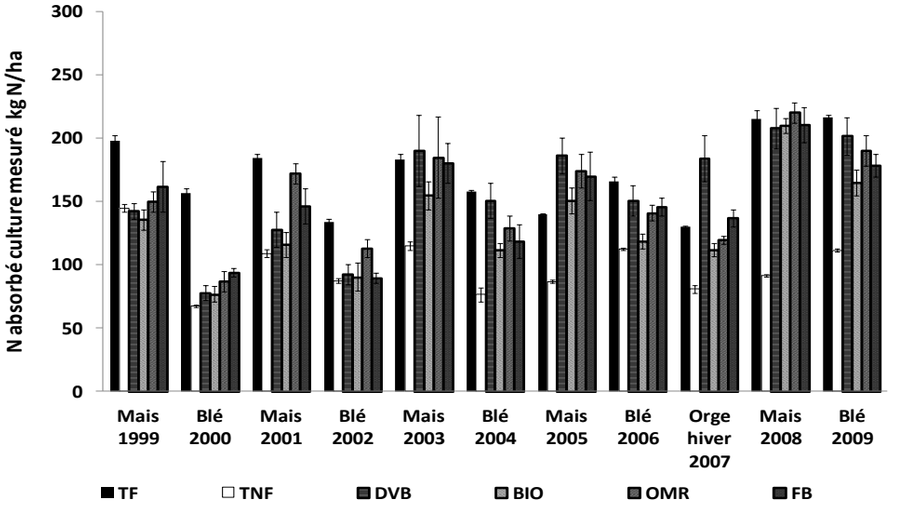


Fig. 4.8. Comparaison entre les quantités de N absorbées par les cultures simulés/observés des différents traitements durant les 11 ans de l'essai

a)



b)

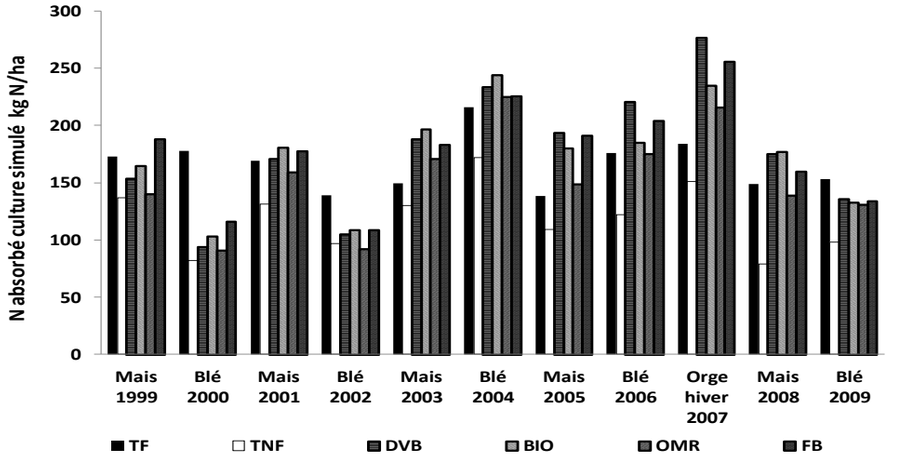


Fig. 4.9. Quantités mesurées (a) et simulées (b) de N absorbées par les cultures des différents traitements durant les 11 ans de l'essai

L'efficience de la simulation (cf tableau 4.7) varie entre -2,4 (BIO) et -0,5 (DVB). Le RMSE est élevé (38,3 à 66,1) et l'écart normalisé est généralement négatif (-0,3 à 0,0). Beaudoin et al (2008) avaient fait des observations similaires concernant les quantités de N absorbées par les cultures. Mais l'efficience de la simulation était meilleure dans son cas (0,34).

Si nous nous concentrons sur les quantités totales de N dans les plantes, nous constatons un effet des amendements organiques sur ce poste par rapport au traitement témoin non fertilisé. Les traitements DVB, OMR et FB sont les traitements qui augmentent le plus les quantités mesurées de N absorbées par les cultures. Ces quantités de N absorbées sont légèrement inférieures aux quantités de N absorbées des cultures du traitement témoin fertilisé. Les exportations sont plus faibles dans le traitement BIO mais restent supérieures à celles du traitement témoin non fertilisé. En revanche, dans les traitements simulés, ce sont les traitements BIO, DVB et FB qui génèrent des exportations de N similaires à celles du témoin fertilisé et sont même supérieures. En revanche, ces exportations sont plus faibles dans le traitement OMR. Ces différences de classement pourraient être liées aux dynamiques de minéralisation surestimées pour les simulations FB et BIO et à la phase d'immobilisation que génère le produit OMR.

4.2.3. Evolution et prévision des teneurs en N organique des sols dans les différents traitements

Les teneurs et stocks de N organique dans l'horizon de surface ont tendance *à diminuer dans les traitements témoin fertilisé et non fertilisé.* Les flux de N total apportés via les PRO dans les traitements organiques sont en moyenne de 250 kg Ntot/ha dans le traitement BIO, 268 kg Ntot/ha dans le traitement OMR, 343 kg Ntot/ha dans le traitement FB et de 367 kg Ntot/ha dans le traitement DVB. Les stocks de N organique augmentent dans tous les traitements amendés, d'autant plus que les *flux d'apport total sur les 11 ans de l'essai sont importants* (BIO : 1499 kgNtot/ha < OMR : 1606 kg Ntot/ha < FB : 2060 kg Ntot/ha <DVB: 2200 kg Ntot/ha). Le modèle STICS simule de façon assez satisfaisante les évolutions des stocks de N organique du sol (cf tableau 4.7).

En effet, l'évolution des stocks d'azote organique dans le sol du traitement fumier de bovin (FB) est très bien prédite (EF= 0,81). La simulation est moins satisfaisante dans le cas du témoin fertilisé mais reste correcte (EF= 0,36). Dans les traitements DVB et témoin fertilisé, elles sont également correctes même si les efficiences calculés sont respectivement de 0,25 et -0,44. Enfin, les efficiences les moins satisfaisantes sont dans les traitements BIO et OMR. Les simulations les moins bonnes concernent les traitements avec épandage de compost. Ceci est dû à l'augmentation importante des stocks en Norg dans le sol suite au double épandage en 2006 et 2007. Le modèle sous-estime de manière importante les conséquences de ce double épandage.

La figure 4.10 représente les évolutions de stocks totaux de N organique dans les sols et la figure 11 (a, b, c et d) les évolutions différenciées dans chacun des traitements, du N humifié du sol, du N dans la biomasse microbienne et du N provenant des résidus + PRO au fur et à mesure des épandages. Pour le N humifié du sol, les fractions de N inerte et N actif (35% du N total) sont distinguées. L'augmentation du stock de N organique dépend des caractéristiques de la matière organique des PRO épandus (figure 4.10 et 4.11 a, b, c et d, tableau 4.8).

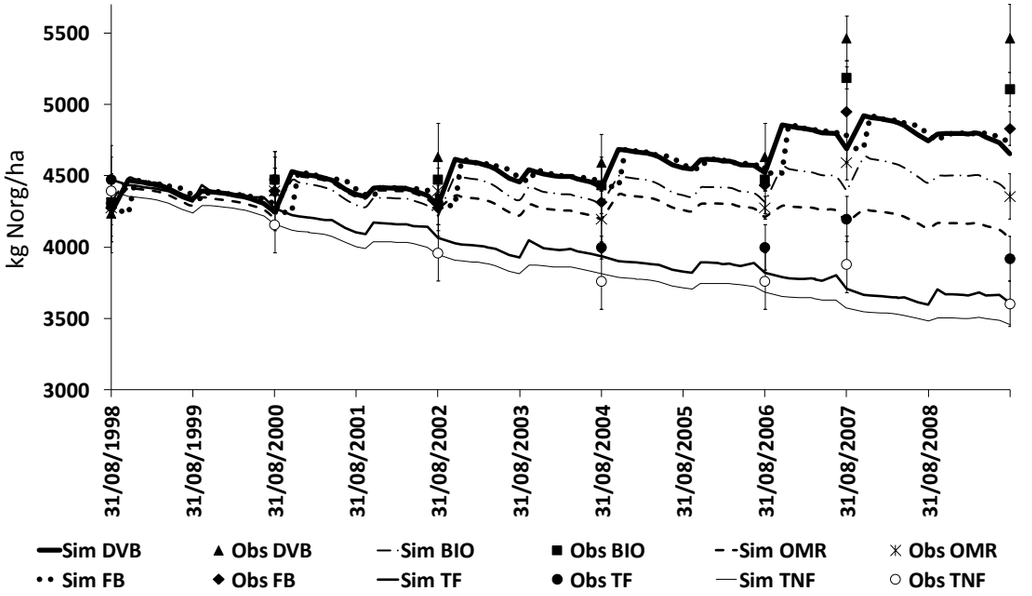


Fig.4.10. Evolution des stocks de Norg dans le sol des différents traitements : données mesurées (moyenne des 4 répétitions par traitements) et simulées avec STICS

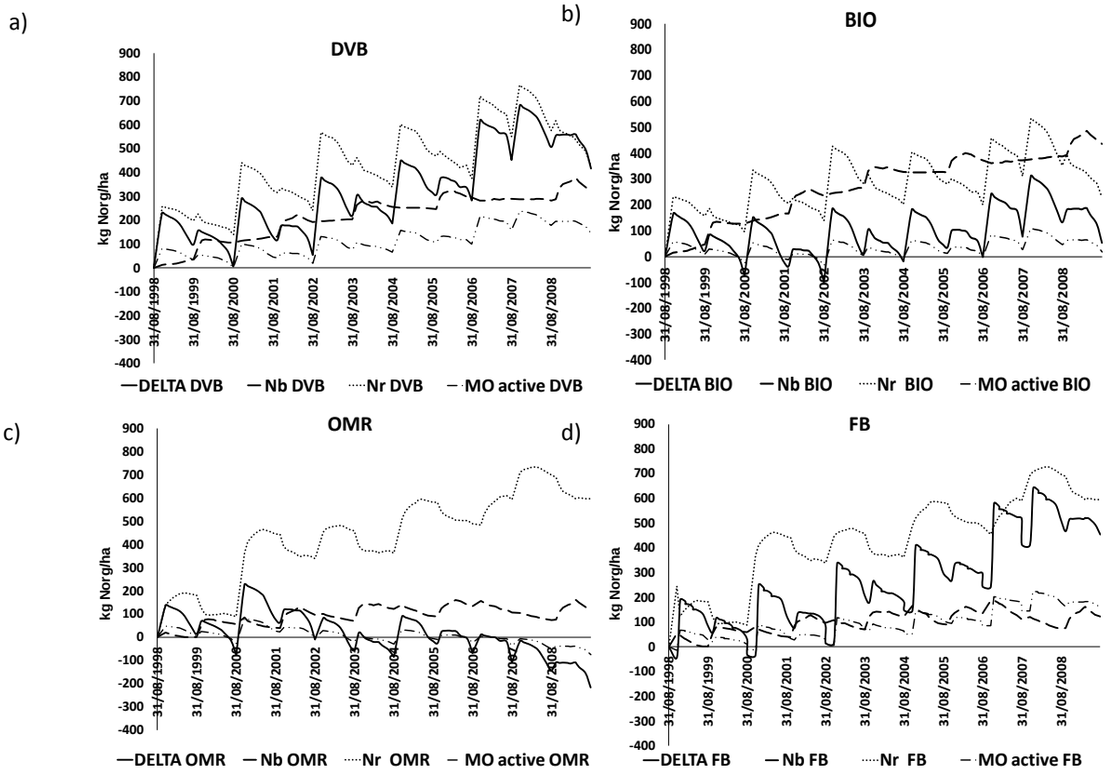


Fig.4.11. Résultats de simulation du modèle STICS. Accumulation des quantités de Norg provenant des PRO et des résidus de culture dans le sol pendant 11 ans d'essais (a : DVB, b : BIO, c : OMR, d : FB). Nb : quantités de N dans la biomasse microbienne, Nr : Quantités de N dans les résidus (PRO+Résidus de culture), MO active : Fraction du N organique du sol dans la matière organique active (35% du N humus), DELTA : évolution des quantités de N humus dans le sol après soustraction des quantités de Norg initiales dans le sol.

Tableau 4.8: Evolutions mesurée et simulée des stocks de N organique dans l'horizon de labour des différents traitements ; rendements apparents mesuré et simulé d'incorporation du N des PRO apportés en N organique du sol

	1998					2009	
	Sol initial	**TNF**	**TF**	**DVB**	**BIO**	**OMR**	**FB**
Stock N sol mesuré (kg/ha)	4330	3604	3920	5465	5108	4356	4831
Stock N sol simulé	4330	3456	3611	4654	4370	4060	4731
N apporté (kg N/ha)	-	-	-	2200	1606	1499	2060
Rendement mesuré par rapport à la situation initiale kg N sol/ kg N apporté	-	-	-	0,516	0,485	0,018	0,243
Rendement simulé par rapport à la situation initiale kg N sol / kg N apporté	-	-	-	0,147	0,025	-0,180	0,195
Rendement mesuré par rapport au témoin fertilisé kg N sol/ kg N apporté	-	-	-	0,702	0,740	0,291	0,442
Rendement simulé par rapport au témoin fertilisé kg N sol/ kg N apporté	-	-	-	0,474	0,473	0,300	0,544
Rendement mesuré par rapport au témoin non fertilisé kg N sol/ kg N apporté	-	-	-	0,846	0,937	0,502	0,596
Rendement simulé par rapport au témoin non fertilisé kg N sol/ kg N apporté	-	-	-	0,544	0,569	0,403	0,619

Le calcul du rendement d'augmentation des teneurs en Norg des sols *via* l'épandage de PRO (les DELTA PRO de la figure 4.11) est effectué comme suit :

- Rendement par rapport à la situation initiale (kg N sol/kg N apporté) = (quantité de N dans le sol en 2009 – quantités de N de la situation initiale) / (quantité de N apporté via l'épandage des PRO)
- Rendement par rapport au témoin (kg N sol/kg N apporté) = (quantité de N dans le sol en 2009 du traitement avec PRO – quantités de N dans le sol en 2009 du traitement témoin) / (quantité de N apporté via l'épandage des PRO)

Dans les différents traitements organiques, les stocks **mesurés** augmentent de 46,8% dans le traitement OMR, 59,6% dans le traitement FB, 84,6% dans le traitement DVB et de 100,4% dans le traitement BIO par rapport au témoin non fertilisé et de 27,1% dans le traitement OMR, 44,2% dans le traitement FB, 70,2% dans le traitement DVB et de 79,3% dans le traitement BIO par rapport au témoin fertilisé. Cela est plus ou moins cohérent avec les bilans de Norg mesurés.

Les stocks **simulés**, quant à eux, augmentent de 37,6% dans le traitement OMR, 54,4% dans le traitement DVB, 60,9% dans le traitement BIO et de 61,9% dans le traitement FB par rapport au témoin non fertilisé et de 28,0% dans le traitement OMR, 47,4% dans le traitement DVB, 50,6% dans le traitement BIO et de 54,4% dans le traitement FB par rapport au témoin fertilisé. Cela est plus ou moins cohérent avec les bilans de Norg mesurés.

Nous pouvons donc classer les PRO en fonction de leur aptitude à augmenter les teneurs en Norg du sol par rapport aux deux témoins selon les données mesurées : BIO > DVB > FB > OMR. Par contre, l'ordre des PRO selon leur potentiel d'augmentation des teneurs en MO des sols selon les données simulées (Figure 4. 11) est : FB > BIO > DVB > OMR

Le potentiel d'augmentation des teneurs en Norg dans le sol des différents PRO est calculé de la manière suivante :

- Potentiel d'augmentation du Norg des sols = quantités de Norg accumulées dans le sol à partir du PRO durant les 11 années de l'essai /apport de Norg des PRO

Le potentiel d'augmentation des teneurs en Norg dans le sol des traitements simulés est sous-estimé et ceci semble dû à la sous-estimation des stocks en Norg surtout après le double épandage de PRO en 2006 et 2007. L'ordre entre PRO est également affecté. Dans les résultats de simulation, le traitement OMR est bien le moins efficace pour augmenter le stock de N organique du sol, par contre le FB est le traitement le plus efficace, ce qui n'est pas

observé dans la réalité. Ceci est dû au paramétrage de ce PRO, pour lequel le rendement d'humification h est de 0,88 avec une minéralisation lente du carbone et de l'azote humifié du sol. Le rendement simulé d'accumulation dans le traitement DVB est bien supérieur à celui du traitement BIO comme on le constate dans les observations.
Ces augmentations de stocks de N organique dans les sols représentent 45,6% du N total apporté dans le traitement DVB, 49,6% du N total apporté dans le traitement BIO, 52,6% du N total apporté dans le traitement FB, et 55,7% du N total apporté dans le traitement OMR.

Il n'existe pas dans la littérature d'études utilisant le modèle STICS sur des essais de longue durée avec apports de PRO et qui nous permettraient de comparer les résultats obtenus à nos résultats de simulation. Par contre, les travaux précédents étudiant la dynamique du C organique dans ce même essai (Peltre et al., 2012) ont montré que sur la même période, l'augmentation moyenne des stocks de C organique étaient de 0,70 t C/ha/an dans le traitement OMR, 1,44 t C/ha/an dans le traitement FB, 1,52 t C/ha/an dans le traitement BIO et 1,63 t C/ha/an dans le traitement DVB, ce qui conduit à des rendements en C organique de 0,3, 0,55, 0,60 et 0,63 tC/t C apportée, respectivement pour les traitement OMR, FB, DVB et BIO.

D'autres études ont été effectuées en mesurant l'impact de l'épandage de PRO sur l'augmentation des teneurs en MO dans les sols cultivés. Ainsi Diez et Krauss (1997) ont étudié l'effet de l'épandage de compost OMR (15 tMS/ha/an) lors d'un essai de 21 ans. Ils ont constaté que les quantités d'humus dans le sol ont augmenté de 0,4 à 0,5 % par an, ce qui correspondrait à une augmentation de 5% durant une période de 11 ans d'apports répétés similaire à notre essai.

Dans notre cas, *les quantités d'humus dans le sol du traitement avec apport de compost OMR n'ont pas augmenté autant* (1,8%) après 11 ans mais les apports ne se font que tous les 2 ans et en quantités plus faibles (correspondant à 5,7 tMS/ha/an). Dans le cas du traitement BIO, nos résultats sont comparables à ceux trouvés par Hartl et Erhart (2005). Après des épandages répétés d'un compost de biodéchets durant 10 ans correspondant à un apport moyen annuel de 205 kg Ntot/ha, ces auteurs trouvent que la teneur en azote organique du sol a augmenté de 0.07g/kg sol, soit une augmentation d'environ 3% par rapport à la situation initiale. Dans notre cas, après épandage répété de compost de biodéchets durant les 11 années de l'essai, l'augmentation de la teneur en Norg dans le sol est de 48,5% d'après les données mesurées et de 2,5% d'après les données simulées.
La diminution de la teneur en N organique dans le traitement témoin fertilisé pourrait être comparée aux résultats trouvés par Beaudoin et al (2008) qui ont travaillé sur des systèmes de cultures céréalières avec une conduite intensive et sans apport de PRO, mais en enfouissant les résidus de récolte. Dans cette étude, les auteurs ont constaté une diminution de 1150kg N/ha ce qui représente 23 % des stocks initiaux en N organique en 24 ans de suivi, bien que les résidus de récolte soient en grande partie restitués. En 11 ans d'expérimentation, nous avons trouvé une diminution d'environ 1000 kg N/ha dans les traitements témoins sans apport organique, ce qui représente 22,3% du N organique.

4.2.4. Évolution des stocks de N minéral dans les sols

Le modèle *estime correctement l'évolution des stocks de N minéral* (cf tableau 4.7 et Figure 4.12) dans le sol durant la période testée de l'essai et ce, après modification des paramètres régissant la dynamique de N des résidus de cultures.

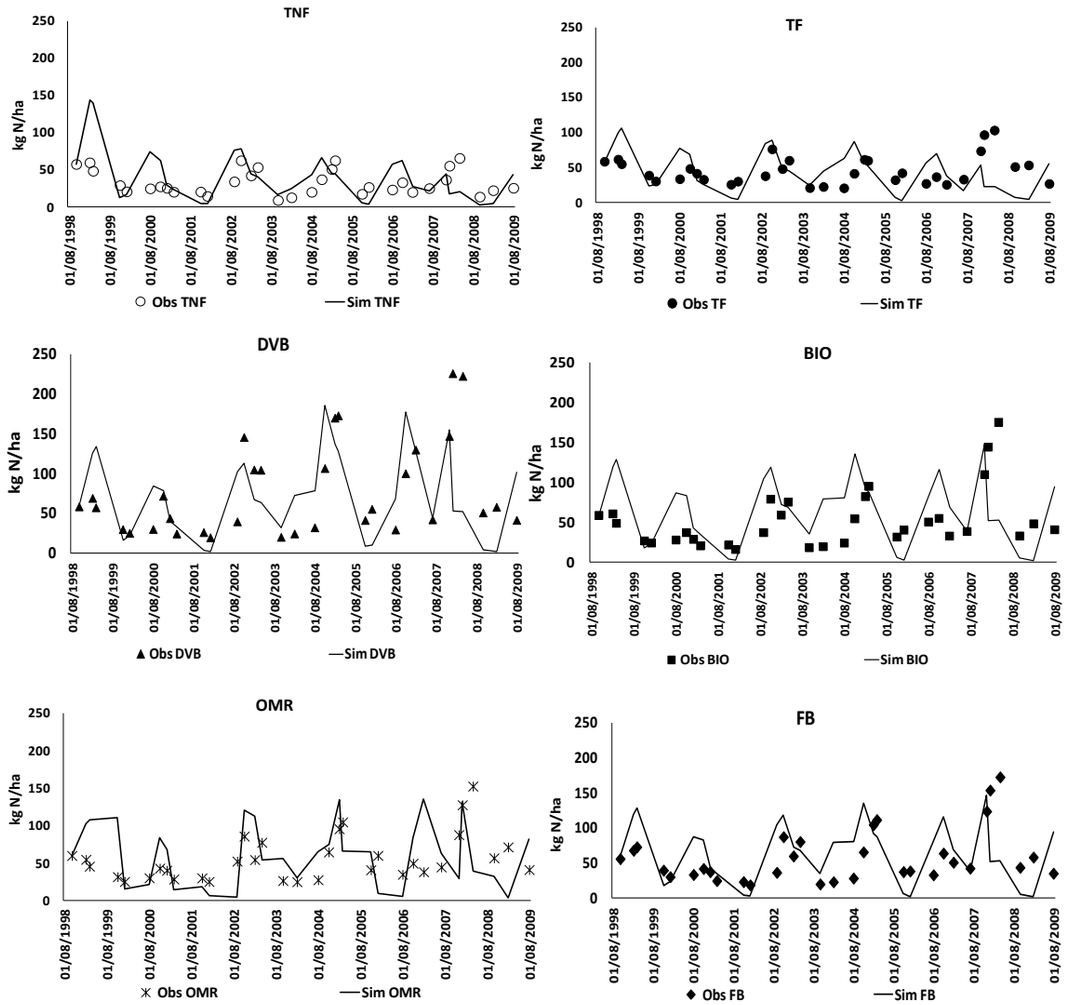


Fig. 4.12. Evolution des quantités simulées (courbes) et mesurées (points) de N minéral dans le sol sur 120cm de profondeur des différents traitements

Les coefficients d'efficience des simulations sont satisfaisants (cf tableau 4.7), et plus particulièrement ceux des traitements FB et BIO. Bien que le module décrivant la dynamique de dégradation des résidus de récolte ait été validé dans des travaux précédents (Justes et al, 2009), dans notre cas, nous avons dû modifier ces paramètres en raison de l'impact de la phase d'immobilisation qui affectait les rendements des cultures. Cette observation est confirmée par les études de Beaudoin et al (2008) et Gabrielle et al (2002) qui ont montré *que STICS sous-estime les quantités de N dans le sol après enfouissement des résidus de culture.* D'autre part, le paramétrage développé pour les résidus de récolte ne convient pas pour simuler la décomposition des PRO dans le sol. Les paramétrages des PRO ont dû être effectués au préalable sur la base des résultats d'incubations indépendants des résultats au champ.

Après modification des paramètres régissant la dynamique du N des résidus de cultures, *certaines surestimations des quantités de N dans le sol sont constatées durant les trois premières années, par contre des sous-estimations sont observées durant les trois dernières années de simulation*. La surestimation la plus importante est observée dans les deux premières années de simulation. Ceci est dû aux conditions climatiques favorables à la décomposition du N organique du sol comme illustré par la figure 4.12. Les sous-estimations simulées sont dues à l'augmentation importante des teneurs en Norg dans le sol suite au double épandage en 2006 et 2007 ce qui a entrainé une augmentation importante des quantités de N minéral dans le sol. Jégo et al (2012) montrent que le modèle est

capable de simuler correctement les observations pendant trois ans d'un essai mis en place entre 2005 et 2007. Beaudoin et al (2008) ont quant à eux, observé une sous-estimation des quantités de N minéral simulées dans le sol en particulier lors de la récolte. Nos résultats sont compatibles avec ces deux études mais avec une efficience inférieure.

Les quantités de N minéralisé provenant des PRO (figure 4.13) sur la période simulée représentent 400 à 761 kg N/ha pour les 3 traitements organiques DVB, FB et BIO. En revanche, pour le compost OMR, on a une minéralisation nette négative de -31 Kg N/ha sur la totalité de la période, ceci étant directement lié à la forte organisation du N observée après apport de ce type de compost.

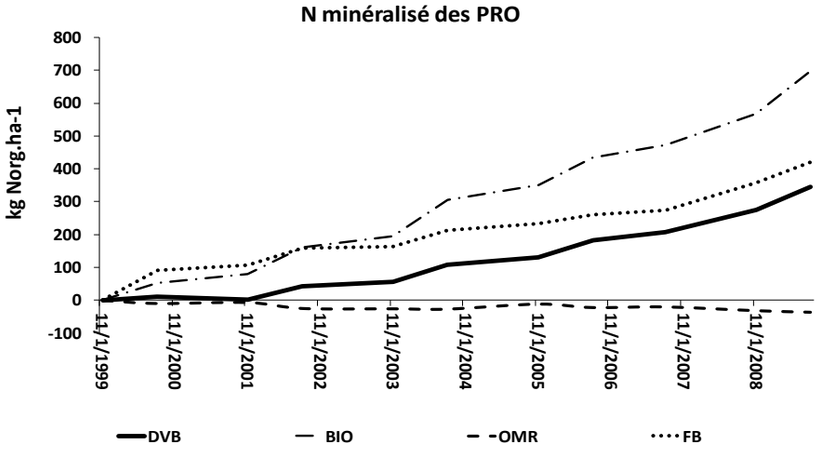


Fig.4.13. Evolution des quantités de N minéralisées des PRO cumulées sur les 11 ans de simulation dans les différents traitements

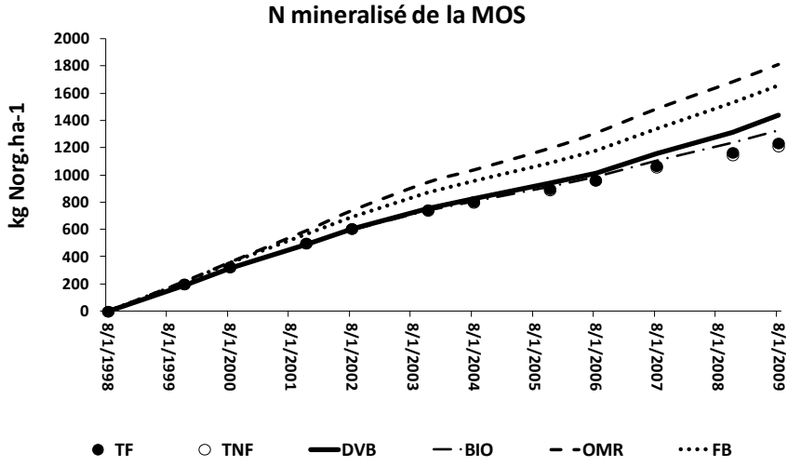


Fig.4.14. Evolution des quantités de N minéralisées de la matière organique du sol cumulées sur les 11 ans de simulation dans les différents traitements

Les quantités de N minéralisées du N organique du sol des quatre traitements amendés augmentent par rapport au témoin (figure 4.14). Cette augmentation varie de 8 % (BIO) à 47 % (OMR) par rapport au témoin fertilisé (OMR > FB > DVB ≈ BIO). La minéralisation du N organique du sol plus importante dans le traitement OMR pourrait s'expliquer par l'organisation du N de ce type de compost dans une biomasse zymogène puis par le fait que la MO du sol se minéralise ensuite. Dans ce traitement, le gain en N minéral fourni aux cultures passe donc par une incorporation rapide préalable à la matière organique du sol *via* une activité biologique fortement stimulée.

Les quantités de N lixiviées dans les traitements amendés sont proches de celles du traitement témoin fertilisé durant les premières années (figure 4.15), sauf dans le cas du traitement FB pour lequel on simule 50 à 100 kg de N minéral lixivié supplémentaires. Elles augmentent fortement durant les trois dernières années, l'augmentation allant de 49 % (OMR) à 74 % (FB) par rapport au témoin non fertilisé. Une classification peut être faite en fonction du potentiel de lixiviation des nitrates : FB > DVB ≈ BIO >OMR.

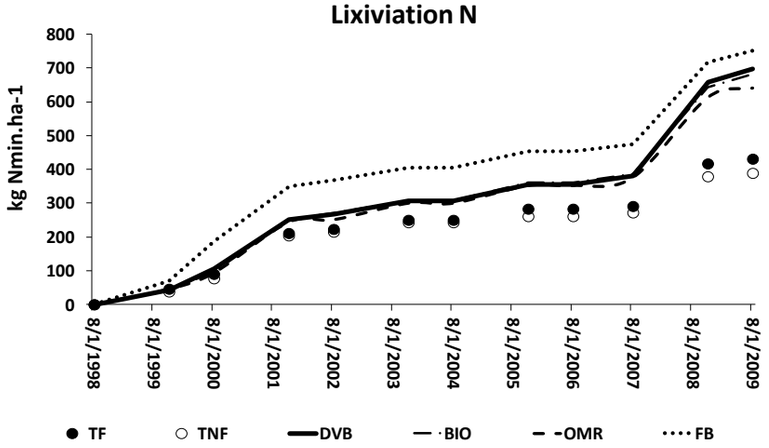


Fig. 4.15. Evolution des quantités de N lixiviées cumulées sur les 11 ans de simulation dans les différents traitements

La lixiviation de l'azote est supérieure dans le traitement FB par rapport au traitement DVB, BIO et OMR. Cela est dû à la dynamique de N des fumiers apportés qui minéralisent plus d'azote (cf Figure 4.2) par rapport aux autres PRO et qui fournit donc des quantités en N disponibles plus importantes qui sont potentiellement lixiviables durant la période hivernale. Cette lixiviation de l'azote peut présenter des risques environnementaux importants en contribuant à la pollution des nappes souterraines. L'implantation en période hivernale de "culture piège de nitrates" est normalement obligatoire pour limiter ces quantités de N lixiviées. Ces implantations de CIPAN seront considérées dans les scénarios de substitution au chapitre suivant.

Tableau. 4.9. Postes du bilan N minéral des différents traitements. TF : témoin fertilisé, TNF : témoin non fertilisé, DVB : co-compost de déchets verts et boue, BIO : co-compost de biodéchets et déchets verts, OMR : compost d'ordures ménagères résiduelles, FB : Fumier de bovin a) Flux d'entrée de N minéral cumulés pendant les 11 années de simulation, b) flux de sortie de N minéral cumulés pendant les 11 ans de simulation.

a)	Stock Initial 1998	N mineral PRO	PRO	résidus de culture	MOS	Engrais	Pluie	Total
		N minéral cumulé	N mineralisé cumulé			N minéral cumulé		
		kgN.ha^{-1}						
TF	38	0	0	377	1231	1083	151	2880
TNF	28	0	0	168	1211	321	151	1879
DVB	28	384	400	377	1439	321	151	3100
BIO	26	125	761	377	1330	321	151	3091
OMR	30	196	-31	377	1811	321	151	2855
FB	37	189	433	377	1656	321	151	3164

b)	Exportations culture	Lixiviation	Pertes engrais	Volatilisation N des PRO	Dénitrification	Stock final 2009	Total
	N minéral cumulé						
	kgN.ha-1						
TF	1930	431	347	0	115	57	2880
TNF	1308	389	102	0	32	48	1880
DVB	1939	697	102	197	30	135	3100
BIO	2111	682	102	65	31	100	3091
OMR	1894	644	102	98	31	86	2855
FB	2100	752	102	92	30	88	3164

D'après le tableau 4.9b et la figure 4.14, la différence entre les quantités de N minéralisé de l'humus des traitements amendés et le témoin fertilisé varient entre 99 kgN/ha (BIO) et 580 kgN/ha (OMR) ce qui représente entre 7% (BIO) et 47% (OMR) de N minéral disponible supplémentaire par rapport au témoin fertilisé. Les quantités de N absorbées par les cultures sont de -2 % (OMR) à 9 % (BIO) plus importantes que le traitement TF.

Les quantités de N volatilisées provenant des engrais minéraux épandus sont importantes (tableau 9a et b). Pour tous les traitements, les quantités de N volatilisées *via* l'épandage d'engrais est de 32,0% de l'apport total. Ceci est dû à la qualité de l'engrais azoté, apporté sous forme d'azote liquide épandu à la surface du sol ce qui favorise la volatilisation. Les quantités de N dénitrifiées sont moins importantes que les pertes directes par volatilisation et sont de 115 kgN/ha pour le témoin fertilisé et d'environ 30 kgN/ha pour le reste des traitements. Si on considère que la dénitrification est essentiellement issue des engrais azotés, ces quantités représenteraient entre 9,3% et 10,6% de l'apport total d'engrais. En effet, dans le modèle, la dénitrification dépend des quantités de nitrates dans le sol en premier lieu et des conditions abiotiques (température et humidité du sol). Dans notre cas, et après modification de la dynamique de N lors de la décomposition des résidus de récolte, les quantités de N disponibles dans le sol sont importantes afin de garantir des niveaux de rendements proches des rendements mesurées.

Ces stocks de N importants dans le sol se retrouvent donc, facilement dénitrifiables et/ou lixiviables durant la période hivernale, mais aussi durant les périodes où les besoins des cultures sont faibles (phase de latence juvénile des cultures durant la période hivernale, phase de maturation ou phase de pré-récolte). Dans nos conditions météorologiques, la pluviométrie est répartie durant toute l'année et le risque de saturation des sols est important, ce qui représente *un risque également important de dénitrification des nitrates du sol.* Ce qui expliquerait donc les pertes importantes simulées de l'azote du sol par le modèle via la dénitrification.

Les quantités totales perdues par volatilisation et dénitrification représentent environ 40% des quantités d'engrais apportées. Ces pertes sont très importantes mais attendues, compte-tenu des paramètres de volatilisation et dénitrification utilisés pour la solution azotée dans STICS (taux de volatilisation et dénitrification de 0.3 et 0.13, respectivement). Cela pourrait également expliquer les sous estimations des rendements simulés. De même, *les quantités de N minéral volatilisées suite à l'épandage des PRO sont très importantes*. Ces quantités volatilisées représentent *environ 50% de l'apport total de l'azote minéral des PRO*. Seule la seconde moitié de l'azote minéral des PRO est donc disponible pour les cultures.

4.3. CONCLUSION

STICS se montre *un outil satisfaisant, après une étape de calibration nécessaire*, pour prédire l'évolution du N organique et minéral dans le sol. Après apports répétés de PRO, les augmentations de N organique dans le sol fournissent des quantités importantes d'azote minéral suite à la minéralisation de ce N organique. *Le compost OMR est le traitement qui augmente le moins la teneur en Norg dans le sol.* Par contre, il est le traitement où on enregistre le plus de minéralisation du Norg suite à la re-décomposition de la biomasse zymogène après la phase d'organisation de l'azote, une fois le compost épandu.

En revanche, *pour les composts plus "matures", il n'existe pas de phase d'immobilisation* (DVB, BIO et FB), et après 11 ans d'apports, *les niveaux de rendements et les quantités de N absorbées par les cultures obtenus sur ces traitements sont très proches de ceux obtenus sur un témoin fertilisé*. On pourrait imaginer alors que, après plusieurs années d'apports de composts ou de fumier, *on puisse réduire de manière très importante l'utilisation des engrais azotés* (762 kg N/ha/ 11 ans dans la situation de l'essai Qualiagro), ce qui pourrait constituer des économies d'intrants intéressantes.

En revanche, il existe un *risque important de l'augmentation des quantités de N lixiviées* (260 kg N en moyenne dans notre essai pour la période simulée). L'implantation de cultures intermédiaires pièges à nitrates devrait être une solution efficace. Ces cultures seraient semées à la fin de l'été, après la récolte du blé, et détruites en début d'hiver. *Le modèle STICS peut donc être utilisé pour simuler les scénarios de substitution des engrais minéraux par des apports de N organique via des apports de PRO*. L'implantation de CIPAN sera prise en compte dans les scénarios de substitution.

Chapitre 5 :
SCENARIOS DE SUBSTITUTION DES ENGRAIS AZOTES VIA L'UTILISATION DE PRO FERTILISANTS ET AMENDANTS

CHAPITRE 5 : SCENARIOS DE SUBSTITUTION DES ENGRAIS AZOTES VIA L'UTILISATION DE PRO FERTILISANTS ET AMENDANTS

Dans ce chapitre, nous présenterons tout d'abord (5.1) la méthodologie retenue pour l'élaboration de scénarios de substitution des engrais azotés par des PRO disponibles ou potentiellement disponibles localement : nous présenterons les objectifs de ces scénarios (5.1.1) puis nous retiendrons certaines successions de culture, certains types de sols et certains itinéraires de conduite de la fertilisation minérale ainsi que certaines variables du contexte de sol (richesse en azote organique du sol) ou de la conduite des cultures (enfouissement ou pas des résidus de culture, utilisation de Cultures pièges à nitrates) et certaines conditions météorologiques que nous justifierons (5.1.2). Nous montrerons alors comment nous avons construit les scénarios à tester (5.1.3), avec notamment le choix des PRO fertilisants et amendants retenus, celui de leurs doses et des dates d'apport de ces PRO. En (5.2) nous expliquons comment nous construisons les simulations avec STICS en donnant tout d'abord son paramétrage pour les PRO retenus (5.2.1) puis les conditions de simulation (5.2.2) comprenant notamment les enchainements entre années de la succession et le choix des conditions initiales.

La troisième partie de ce chapitre (5.3) est consacrée à la présentation des résultats des scénarios retenus. Elle commence (5.3.1 et 5.3.2) par une vérification de la pertinence de nos situations par rapport à la fertilisation minérale, en les caractérisant par rapport au bilan d'azote puis (5.3.3) une vérification de la pertinence de nos deux scénarios « témoin » (témoin sans fertilisation et témoin « fertilisation minérale » agriculteur). Nous présentons alors (5.4) les résultats des scénarios de substitution retenus avec des PRO fertilisants (5.4.1) en commençant par les situations sur sol initialement pauvre en Norg avec Cipan qui est la situation la plus courante dans notre zone d'étude puis nous passerons de façon comparative aux situations analogues sur sol initialement riche en Norg. L'analyse de ces scénarios avec PRO fertilisants du point de vue des bilans P et K sera alors menée. On enchainera ensuite (5.4.2) avec l'analyse d'apports de PRO amendants visant à augmenter les taux de Norg du sol, qui vont être vus sous l'angle de cet effet mais aussi vis-à-vis d'une substitution possible des engrais minéraux à terme. Un scénario d'exportation des résidus de récolte de blé, qui est une pratique existante sur le territoire et qui sert aux échanges paille/fumiers de chevaux, sera testé également sur un sol pauvre en MO afin d'étudier l'impact de cette pratique sur l'entretien des teneurs en MO des sols. Les apports de PRO amendants uniquement s'avérant, nous le verrons, non satisfaisante, nous analyserons alors (5.4.3) une combinaison d'apports de PRO fertilisants et amendants : le respect de la règlementation actuelle ne permettant pas de satisfaire correctement les niveaux de rendements ni les bilans organiques, nous avons utilisé le caractère virtuel de la simulation pour « faire sauter » la barrière réglementaire en visant l'additivité entre PRO ; un scénario d'exportation des résidus de récolte de blé est également testé (5.4.3.1). Les conséquences de cette simulation en termes de bilan P et K sont alors analysés (5.4.3.2).

On conclut ce chapitre sur une comparaison rapide des scénarios quant aux critères majeurs d'évaluation que sont ici (i) l'atteinte de rendements au moins égaux à ceux du « témoin agriculteur » (ii) la limitation des quantités d'azote lixiviées et enfin (iii) la contribution au maintien voire à l'augmentation du N organique des sols.

5.1. Méthodologie d'élaboration des scénarios de substitution des engrais azotés par l'utilisation des PRO :

5.1.1 Objectifs des scénarios

Le premier objectif de ces scénarios est de tester s'il est possible de substituer totalement ou partiellement l'utilisation des engrais azotés à l'échelle d'une succession de culture *via* l'épandage de PRO. Les contraintes retenues pour considérer des substitutions comme acceptables sont : (1) le maintien des niveaux de rendements des différentes cultures de la succession considérée par rapport à un traitement fertilisé par des engrais minéraux

(fertilisation moyenne) ; (2) de limiter le plus possible les pertes azotées, notamment celles dues à la lixiviation des nitrates.
Nous ferons ici un travail prospectif, en évaluant les scénarios par un modèle de simulation, à savoir le modèle dynamique de culture STICS dans sa version 6.9, que nous avons préalablement présenté, puis que nous avons calibré et testé sur l'essai Qualiagro dans sa capacité à rendre compte de conduites utilisant des PRO dans le contexte pédoclimatique local.

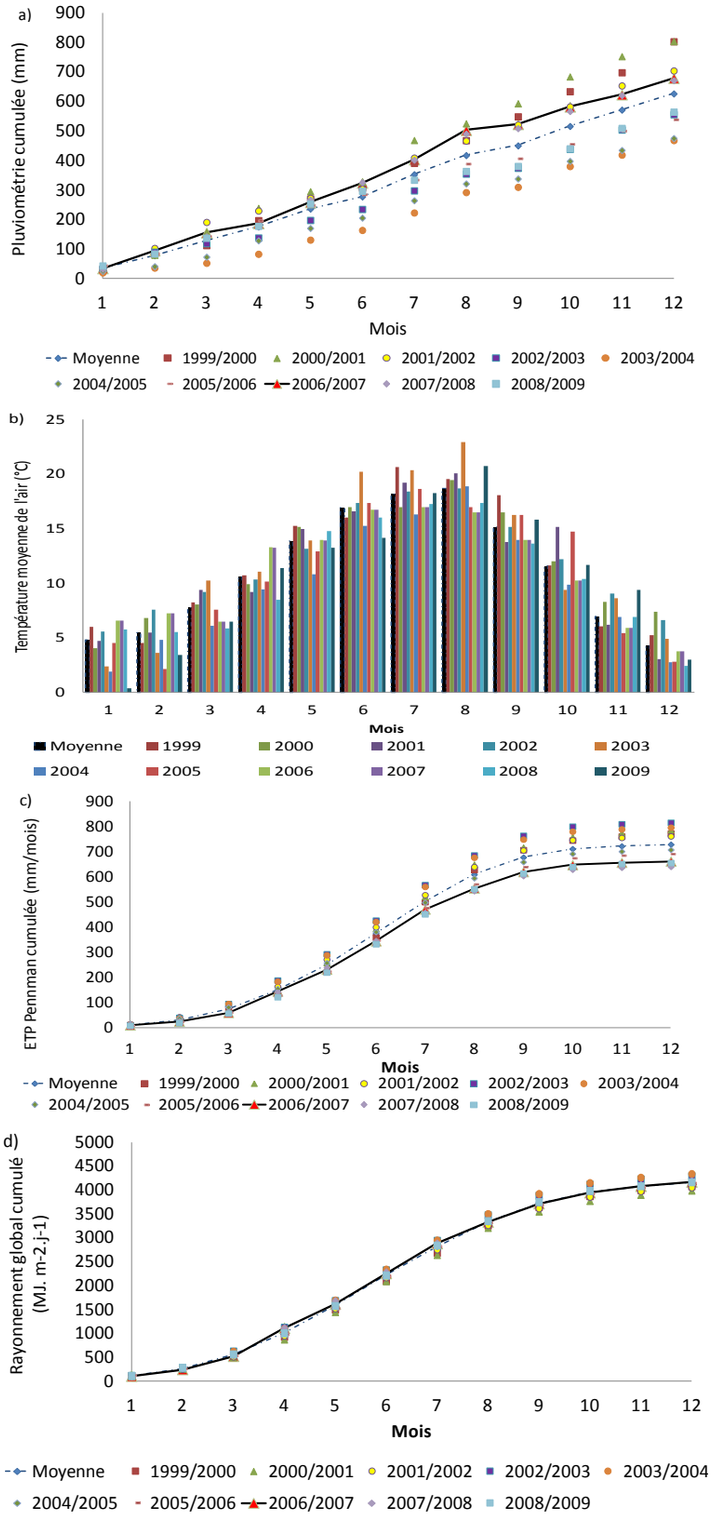
5.1.2. Choix des situations culturales

Pour élaborer et évaluer les scénarios de substitution, nous avons choisi dans l'inventaire des successions de culture, types de sols et itinéraires techniques actuels de fertilisation des cultures, quelques situations qui nous paraissent intéressantes, ainsi que les conditions climatiques avec lesquelles simuler ces substitutions. En effet, nous souhaitons ici effectuer un travail de type méthodologique, et non pas concevoir ni tester toutes les substitutions possibles sur toutes les combinaisons possibles de successions de culture, de types de sols, de PRO et d'années climatiques dans le territoire. Nous justifions ci-après les choix que nous avons opérés.

5.1.2.1. Choix de l'année climatique

La simulation avec STICS fait nécessairement appel à une année climatique totalement renseignée sur le plan des données quotidiennes de pluviométrie et température notamment. Nous avons d'abord été tentés de simuler une année « moyenne » basée sur des données statistiques sur 50 ou 100 ans mais cet historique de données n'était pas disponible localement. De même, nous avons tenté de définir une année moyenne sur le critère du rendement en blé dans la zone. Un travail prospectif a été fait pour définir cette année mais le trop faible jeu de données (issu de la BDD Qualiagro) ne nous a pas permis d'y parvenir. Nous avons donc considéré une des années climatiques réelles comme année moyenne : nous avons retenu dans le fichier climatique disponible, l'année 2006-2007 pour laquelle les rendements simulés correspondent aux rendements moyens observés.

Les figures 5.1a à 5.1d synthétisent les données de pluviométrie, température et ETP des années climatiques dont on dispose. Ces figures confirment que l'année climatique 2006-2007 est une année aux conditions climatiques moyennes en se basant sur les quatre paramètres les plus importants qui sont la pluviométrie, la température, l'ETP et le rayonnement global.



Figures 5.1 : Pluviométries cumulées mensuelles (a), températures moyennes mensuelles (b), ETP Penman moyennes cumulées (c) et rayonnements globaux cumulés (d) entre 1999 et 2009, sur le site Qualiagro considéré comme représentatif du territoire étudié.

5.1.2.2. *Choix des successions, types de sols et itinéraires techniques retenus :*

Les types de sol : A partir des résultats des données d'enquêtes (Chapitre 3 : Inventaire et caractérisation des PRO et des Systèmes de culture sur le territoire), nous avons retenu les situations les plus représentées sur le territoire en termes de types de sol. Les 2 types de sol principaux sont le sol limoneux profond et le sol argilo-calcaire dont les caractéristiques sont résumées dans le tableau 5.1

Tableau 5.1 : Principales caractéristiques physico-chimiques des sols :

Horizons	**Epaisseur**	**Argile**	**Limon**	**Teneurs en eau**		**Densité**	**Cailloux**	**Albedo**
				pF 2,5	**pF 4,2**			
	cm	**g/100 g**		**g/100g**		**g/cm^3**	**g/100 g**	**Sans Unité**
Sol argilo-calcaire								
Horizon 1	30	22,9	18,3	25	11	1,4	26,5	0,25
Horizon 2	30	22,9	18,3	25	11	1,4	26,5	-
Sol limoneux profond								
Horizon 1	30	15,2	78,7	27	11	1,32	0,0	0,22
Horizon 2	30	21,9	72,4	19	7	1,48	0,0	-
Horizon 3	30	31,3	64,6	19	10	1,50	0,0	-
Horizon 4	30	27,2	70,2	19	10	1,47	0,0	-

Les successions de cultures : Comme précédemment, à partir des résultats des données d'enquêtes, nous avons retenu les situations les plus représentées sur le territoire en termes de successions de culture. Il s'agit ainsi de :

- la succession de culture Colza/Blé/Blé/Orge printemps, cultivée sur les 2 types de sols principaux, sol limoneux profond et sol argilo-calcaire
- la succession de culture Colza/Blé/Maïs/Blé cultivée sur les sols limoneux profonds uniquement
- la succession de culture Maïs/Blé/Orge hiver, cultivée aussi sur les sols limoneux profonds uniquement.

Pour chacune de ces successions de culture, nous avons établi des itinéraires techniques moyens actuels de fertilisation basée sur des engrais chimiques, à partir des informations recueillies au cours des enquêtes réalisées chez les agriculteurs, en termes de doses totales, fractionnement des doses et dates d'apport. Les éléments principaux de ces itinéraires techniques sont donnés dans le tableau 5.2.

D'autres éléments que la texture du sol ou l'itinéraire de fertilisation peuvent jouer sur la dynamique de l'azote et donc peuvent être importants à prendre en compte pour raisonner des substitutions. Nous en avons retenu deux qui nous paraissent les plus importants :

- ***La richesse initiale du sol en azote organique (le C/N de la MOS = 9,5),*** car d'elle dépend en partie la fourniture d'azote aux cultures par le sol. Or, on sait que dans la région, ces niveaux d'azote organique du sol sont variables. Pour en tenir compte d'une manière simplifiée, nous choisissons *deux niveaux d'azote organique des sols, l'un fort, l'autre faible*, renvoyant notamment à l'existence ou pas de pratiques antérieures d'amendements organiques par les agriculteurs. Les valeurs quantitatives des teneurs en azote organique fortes ou faibles varient pour les deux types de sols limoneux et argilo-calcaire. Nous retenons des valeurs basées sur des mesures obtenues sur le terrain :

- Pour le **sol limoneux profond**, la teneur en Norg faible est celle mesurée sur l'essai Qualiagro dans la parcelle témoin sans apports d'engrais, qui correspond à une teneur de 1.5% de MO dans le sol, soit 0.088% de Norg. La teneur forte a été mesurée sur une parcelle d'agriculteur qui épandait des matières organiques depuis plusieurs années et qui correspond à une teneur en matière organique de 3%, soit 0.170% de Norg.

- Pour le **sol argilo-calcaire**, la teneur en Norg faible correspond à une teneur de 2% de MO dans le sol (soit 0.110% de Norg), cette valeur a été mesurée sur une parcelle d'agriculteur qui n'épandait pas de matières organiques. La teneur forte correspond à une teneur en matière organique de 4% (soit 0.230% de Norg), obtenue de la même façon.

- ***L'enfouissement ou non des résidus de récolte*** et ***la présence de Cipan (cultures intermédiaires pièges à nitrates)***. Toutes les combinaisons ont été rencontrées chez les agriculteurs concernant le devenir des résidus de culture du blé et de l'orge. Implanter des Cipan est obligatoire pour des intercultures longues laissant potentiellement le sol nu en hiver. Elles existent donc sur le territoire (repousses de colza après colza et culture intermédiaire entre blé et maïs ou orge de printemps). Dans le contexte actuel, l'implantation des Cipan conditionne les subventions PAC, ceci afin de limiter les fuites de nitrates vers les nappes souterraines. La mise en place de ces cultures est en pleine expansion et est imposée par la loi. Il existe par contre en 2010-2011, des agriculteurs qui n'ont pas encore intégré cette pratique dans leurs itinéraires techniques. **Tous les scénarios testés incluent l'implantation de Cipan quand cela est nécessaire.**

L'enfouissement des résidus de culture est la pratique la plus courante sur le territoire. Certains agriculteurs exportent les pailles dans le cadre de contrats paille/fumier de chevaux mais leur nombre reste limité : **nous allons tester, dans cette thèse, l'impact agro-environnemental de l'enfouissement ou de l'exportation des résidus de culture.**

Tableau 5.2 : Caractéristiques des situations retenues pour évaluer les scenarios de substitution des engrais minéraux par des PRO

Succession	Sol	N organique sol	Résidus de Culture (RC)	Culture intermédiaire	Fertilisation (Dose totale, nombre d'apports, date
Colza/Blé/Blé/Orge printemps	Limoneux	Haut : 0,170%	RC enfouis ou exportés	- Entre Colza et Blé - Entre Blé et Orge de printemps	Colza (150, 2, 15/02 ; 15/03) Blé (170, 3 ,15/02 ; 15/03 ; 15/04)
		Bas : 0,088%	RC enfouis ou exportés	- Entre Colza et Blé - Entre Blé et Orge de printemps	Blé (185, 3 ,15/02 ; 15/03 ; 15/04) Orge de printemps (100, 1, 15/04)
	Argilo-calcaire	Haut : 0,230%	RC enfouis ou exportés	- Entre Colza et Blé - Entre Blé et Orge de printemps	
		Bas : 0,110%	RC enfouis ou exportés	- Entre Colza et Blé - Entre Blé et Orge de printemps	
Colza/Blé/Maïs/Blé	Limoneux	Haut : 0,170%	RC enfouis ou exportés	- Entre Colza et Blé - Entre Blé et Maïs	Colza (150, 2, 15/02 ; 15/03) Blé (170, 3 ,15/02 ; 15/03 ; 15/04)
		Bas : 0,088%	RC enfouis ou exportés	- Entre Colza et Blé - Entre Blé et Maïs	Mais (130, 2 ,15/04 ; 15/05) Blé (190, 3 ,15/02 ; 15/03 ; 15/04)
Maïs/Blé/Orge d'hiver	Limoneux	Haut : 0,170%	RC enfouis ou exportés	- Entre Blé et Orge de printemps - Entre Orge de printemps et Maïs	Mais (150, 1 ,15/04) Blé (210, 3 ,15/02 ; 15/03 ; 15/04)
		Bas : 0,088%	RC enfouis ou e	- Entre Blé et Orge de pri - Entre Orge de printemp	Orge d'hiver (165, 3 ,15/02 ; 15/03 ; 15/04)

5.1.3. Les scénarios de substitution : construction

5.1.3.1 - Elaboration des scénarios

Nous devons maintenant construire précisément les scénarios eux-mêmes en choisissant les PRO et en proposant leur utilisation dans l'itinéraire de fertilisation (dose totale, fractionnement, dates d'apport) : là encore, parmi tous les scénarios possibles, nous allons choisir les plus pertinents compte tenu du contexte, et qui de plus, paraissent réalisables au plan technique dans les exploitations.

L'objectif des scénarios, à titre de rappel, est de substituer au maximum l'utilisation des engrais minéraux azotés *via* l'apport de produits résiduaires organiques disponibles sur le territoire. La construction des scénarios, sur les situations précédemment retenues [successions de culture*types de sol*itinéraires techniques] combinées avec les enfouissements ou non de résidus de culture et l'implantation de Cipan, va consister à choisir des PRO et leur mode d'apport (doses, fractionnement, dates) sur ces situations. Compte tenu de la multiplicité des situations, nous n'allons présenter dans cette thèse, que les résultats de simulations obtenus ***sur la succession Colza/Blé/Maïs/Blé cultivée sur le sol limoneux profond*** du plateau des Alluets. En effet, cette succession de culture est la deuxième succession la plus cultivée sur le territoire. De plus, nous avons utilisé l'essai Qualiagro (succession Blé/Maïs sur sol limoneux) pour le calage et la validation du modèle sur les deux cultures maïs et blé. Les résultats obtenus par le modèle se rapprocheraient ainsi le mieux des conditions réelles de rendement que l'on obtient ou pourrait obtenir et de la dynamique de l'azote dans le sol. Les éléments qui vont être considérés pour la définition des scénarios sont donc les suivants :

- PRO : Types, doses en termes de flux de N et dates d'apport
- Sols : Teneurs en MO des sols au travers du niveau de N organique dans le sol
- Autres paramètres de l'itinéraire technique : implantation de CIPAN

PRO : Nous avons retenu deux grandes catégories de PRO : les PRO fertilisants vont être utilisés en cours de culture dans la succession, à la place des engrais azotés ; les PRO amendants, qui sont utilisés aujourd'hui en tête de rotation dans la succession, avec l'objectif de maintenir ou d'augmenter la teneur en matière organique donc en azote organique du sol.

* Les PRO fertilisants retenus sont ceux qui présentent les plus fortes disponibilités en azote ainsi qu'une réelle facilité d'utilisation pour les agriculteurs. Deux ont été retenus suite à notre inventaire et à leurs caractérisations : **Humival** (pellets de lisier de porc séché) et **boues séchées** en pellets. Ces PRO fertilisants sont facilement épandables puisque leurs formes séchées et en pellets permettent l'épandage à partir de simples épandeurs à engrais généralement disponibles dans les exploitations. Ces informations sont confirmées par la coopérative agricole qui vend le produit Humival et par un agriculteur (E07) questionné sur la faisabilité des scénarios.

* Les PRO amendants retenus sont ceux les plus fréquents sur le territoire et/ou les plus faciles d'accès. Nous avons retenu le **Fumier de cheval**, composté ou non et le **compost de déchets verts** de Versailles. En termes d'épandage, par contre, pour tous les PRO amendants, l'épandage ne peut être fait qu'à l'aide d'un épandeur de matières organiques de type épandeur à fumier.

Les doses apportées sont maximales compte tenu des contraintes réglementaires qui s'appliquent dans le territoire : pas plus de 170 kg de Ntot par hectare et par an. Nous avons aussi décidé de tester une dose totale plus importante correspondant au double de la quantité réglementaire (340 kg de Ntot par hectare et par an) : cette dose importante a été décidée de façon à prendre en compte des scénarios d'apports mixtes de PRO amendants et fertilisants, afin de pourvoir concilier des pratiques d'entretien des stocks de MO dans les sols et de fertilisation en substituant les engrais minéraux azotés. Les doses de PRO apportées en respectant la législation (170kgNtot/ha) sont résumées dans le tableau 5.3.

Les dates d'apport de PRO ont d'abord tenu compte des contraintes réglementaires : d'après la législation en vigueur (Arrêté du 19 décembre 2011, relatif au programme d'actions national à mettre en œuvre dans les zones vulnérables afin de réduire la pollution des eaux par les nitrates d'origine agricole), il est interdit d'épandre des matières fertilisantes de type II (C/N≤8) sur cultures d'hiver entre le 01/10 de l'année n et le 31/01 de l'année n+1. Concernant les cultures de printemps, l'interdiction d'épandre ces PRO est entre le 01/07 de l'année n et le 31/01 de l'année n+1 (voir Chapitre 1 - Etat de l'art et Problématique). Nous nous situons bien sûr en dehors de ces périodes interdites. Nous avons de plus essayé d'apporter les PRO de façon à ce que la dynamique de minéralisation de leur N organique coïncide avec la demande des cultures, ceci étant particulièrement difficile pour les céréales d'hiver en place, entre la reprise de la phase végétative jusqu'au début de la phase de montaison, afin de pouvoir subvenir, au mieux, aux besoins de la culture. Cette période de demande intense de la part des cultures d'hiver est déterminante pour l'élaboration des composantes du rendement. L'objectif ici, est de savoir si on est capable de remplacer les deux apports d'engrais azotés qui se font généralement sur Blé durant les périodes de mi-février (fin tallage) à mi-mars (début montaison). Nous avons décidé finalement les points suivants:

- Les PRO fertilisants sont épandus au plus tôt début février sur blé. Concernant la culture de printemps (maïs), l'apport de PRO est fait en pré-semis c'est-à-dire au début avril, l'objectif étant que cet apport se substitue à l'apport unique d'engrais sur les cultures de maïs.
- Les PRO amendants sont épandus fin août avant le semis de toutes les cultures, donc plus fréquemment que dans la pratique.

Nous allons tester l'impact agro-environnemental de ces différents apports de PRO sans complémentation azotée afin d'étudier les effets directs de l'apport de ces PRO.

Teneur en matière organique des sols : Un des objectifs de la thèse est de démontrer que des teneurs élevées en matière organique contribuent à la fertilité des sols et permettent de limiter les apports d'engrais minéraux azotés nécessaires au maintien de rendements élevés. Nous allons donc tester nos scénarios en condition de teneur faible en matière organique (Norg faible, situation la plus fréquente sur notre territoire) et en condition de teneur élevée en matière organique (Norg fort) supposant que les agriculteurs ont déjà des pratiques d'apports réguliers de PRO amendant.

Autres éléments de l'itinéraire technique : Les scénarios prennent en compte la mise en place de cultures intermédiaires avec enfouissement ou non des résidus de culture et l'effet de cette pratique sur le bilan agro-environnemental.

Synthèse des scénarios présentés. Nous avons procédé en 3 étapes :

- scénarios de substitution totale des engrais azotés par l'utilisation de PRO à valeur fertilisante importante.
- Scénarios avec uniquement des PRO amendants, sachant que ce type de PRO ne peut pas contribuer à la substitution des engrais azotés à court terme.
- Scénarios combinant apports de PRO à valeurs amendantes importantes et des PRO à valeurs fertilisantes intéressantes.

Nous ne présenterons pas dans ce document toutes les situations. Nous présenterons d'abord, les résultats de simulation obtenus en utilisant des PRO fertilisants (Humival et Boues séchées) sur un sol pauvre en Norg avec enfouissement des résidus de récolte et avec Cipan : c'est ce qui se rapproche le plus de la situation actuelle, sur laquelle donc nous chercherons à tester la substitution des engrais minéraux par des PRO fertilisants. Puis, nous présenterons le cas de l'utilisation des boues séchées sur des sols riches en N organique (Norg fort) avec enfouissement des résidus de récolte du blé et avec Cipan. Nous donnerons ensuite, quelques résultats d'épandage de PRO amendants seuls (compost DV, fumier de chevaux pailleux compostés ou pas) pour analyser l'impact de ces

apports sur la MO du sol et leurs impacts agri-environnementaux dans le cas d'un sol pauvre ou riche en Norg, avec Cipan, et avec ou sans exportation des résidus de blé dans le cas d'un sol pauvre en Norg.
Nous ne testerons pas le scénario d'exportation des résidus de culture sur un sol riche en Norg puisque, pour entretenir les teneurs en Norg dans le sol, il est important d'enfouir les résidus de culture. De plus, on constate que l'exportation des résidus de culture sur le territoire n'est pratiquée que sur des sols pauvres en MO, majoritaires.
On donnera également quelques exemples de scénarios d'apports mixtes de compost de fumier de chevaux et de boues séchées (Sol riche ou pauvre en Norg, avec Cipan, avec enfouissement ou pas des résidus de récolte du blé sur sol pauvre en Norg).
Scénario de référence: Les résultats de simulation des scenarios seront comparés à la succession témoin fertilisée avec des engrais minéraux. Nous utiliserons le cas d'une fertilisation moyenne (cf 5.1.2.2. choix des successions de culture) sur chaque succession de culture issue des enquêtes auprès des agriculteurs. Ce « témoin », dont nous vérifierons ci-après la pertinence (5.2.1), servira pour comparer nos substitutions par rapport aux résultats des pratiques actuelles des agriculteurs en termes d'atteinte des niveaux de rendements et de lixiviation.
Par ailleurs, des saisons culturales « témoin non fertilisé » ont été simulées et ont servi pour le calcul des coefficients apparents d'utilisation des engrais (CAU) et le calcul du coefficient d'équivalence engrais des PRO (Keq).
La figure 5.2 résume les différents scénarios que nous avons testés.

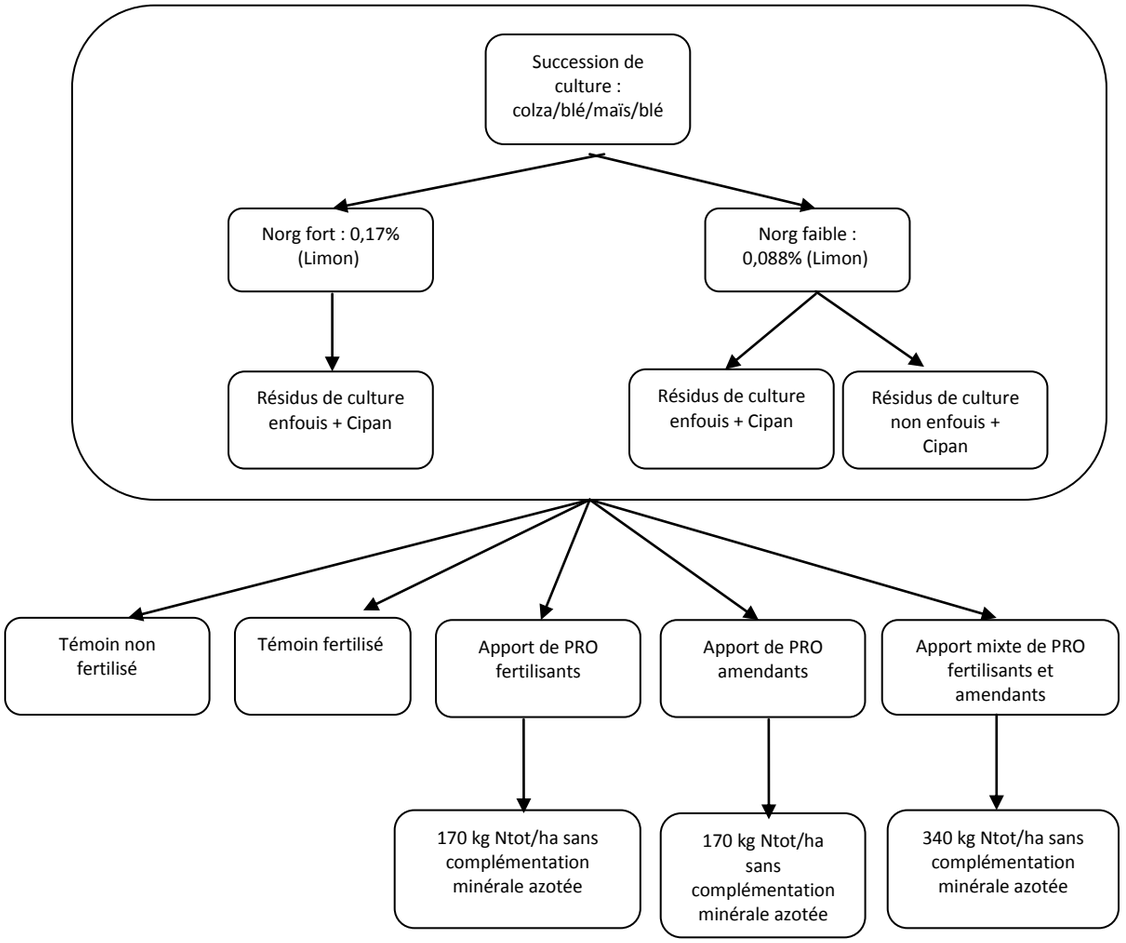


Figure 5.2 : Schéma des différents scénarios de substitution des engrais azotés, testés pour une des successions de culture dominante sur le territoire

5.2. Construction des simulations STICS

5.2.1. Paramétrage des PRO fertilisants et amendants :

Les dynamiques de minéralisation de l'azote issues des incubations en conditions contrôlées de laboratoire (cf chapitre 3 : inventaire et caractérisation des PRO et des systèmes de culture sur le territoire) sont représentées dans la figure 5.3, ainsi que leur simulation avec STICS. Le tableau 5.3 résume les quantités de N disponible calculées en fin d'incubation sur la base des résultats de simulation avec STICS des résultats d'incubations des PRO testés. La quantité de N disponible est la somme du N minéral du PRO et de la quantité de N organique minéralisée des PRO après 91 jours d'incubation à 28°C. En effet, d'après Lashermes et al (2010), une durée de 91 jours d'incubation à 28°C correspond à 1 an environ au champ, si on ne tient compte que de l'effet de la température sur la dynamique de minéralisation. Les quantités de N minéralisées durant l'année culturale sont donc calculées à partir de la dynamique de minéralisation du N en conditions contrôlées à 28°C (paramétrage du PRO ou du résidu dans STICS résidus).

Parmi les PRO retenus, les boues séchées pourraient être les PRO les plus intéressants à utiliser pour substituer des engrais azotés grâce à leur minéralisation rapide dès l'épandage et grâce aux quantités importantes d'azote disponible rapidement (jusqu'à 36 kgN/tMS ou 32 kgN/tMB). L'utilisation d'Humival est également intéressante grâce à la phase de minéralisation rapide dès l'épandage, les quantités d'azote potentiellement disponibles sont d'environ 25 kgN/tMS (ou 22 kgN/tMB). Nous ne testerons pas, dans cette thèse, l'impact agro-environnemental de l'apport de fientes de volailles puisque la dynamique de minéralisation de ce PRO est lente mais linéaire, ce qui pose un problème de calage de la date d'épandage de ces matières organiques et réduit l'efficacité de substitution des engrais azotés *via* l'utilisation de ces PRO. De plus, les quantités de fientes de volailles sur le territoire sont faibles et utilisées d'une façon très localisée.
Nous avons donc opté pour l'utilisation des boues séchées et de Humival, qui minéralisent des quantités importantes de N dans un laps de temps relativement court afin de garantir de bonnes conditions pour la substitution du premier et surtout du second apport d'engrais.

Les PRO amendants ont une valeur fertilisante beaucoup plus faible et donc une disponibilité d'azote très limitée. Pour les PRO sélectionnés, le fumier de chevaux pailleux immobilise de l'azote. Les 4 PRO restants (compost de fumier de chevaux, Fertilys, Fumier bovin et le compost de déchets verts) minéralisent des quantités faibles d'azote. Ces quantités ne dépassent pas 2,5kgN/tMS de produit épandu. On représente dans la figure 5.3 les dynamiques de minéralisation du N des différents PRO sélectionnés à la fin du Chapitre 3. Pour les scénarios de substitution, nous avons opté pour le choix de 3 PRO amendants qui sont le fumier de chevaux compostés et non compostés ainsi que le compost de déchets verts.
Concernant les fumiers de chevaux, le choix de ces deux types (pailleux non composté et compost de fumier) est fait car la gestion des fumiers de chevaux est considérée aujourd'hui comme un problème majeur sur le territoire. En effet, il existe 23 centres équestres répartis sur le territoire dans des zones plus ou moins urbanisées. Le fumier de chevaux pailleux non composté représente aujourd'hui, le type de fumier de chevaux épandu par les agriculteurs qui ont établi des échanges paille/fumier. Le fumier de chevaux composté est un produit qui existe de manière limitée aujourd'hui mais qui pourrait exister en quantités importantes si une plateforme de compostage était mise en place à court ou moyen terme. Une telle plateforme de compostage pourrait apporter une solution efficace quant à la gestion de ces fumiers, en concentrant les flux sortants des centres équestres et en permettant d'obtenir un compost plus homogène, moins susceptible d'immobiliser de l'azote et donc potentiellement intéressant à valoriser en agriculture sur le territoire.

Le choix du compost de déchets verts a été effectué puisque les quantités de composts sur le territoire sont importantes. Les plateformes de compostage sont également suffisamment proches des exploitations agricoles pour qu'il puisse être utilisé simplement.
Nous n'avons pas sélectionné le fumier de bovin, puisque les quantités existantes sur le territoire sont faibles et utilisées largement dans l'exploitation productrice. En ce qui concerne Fertilys, nous ne l'avons pas retenu puisque la dynamique de minéralisation de ce produit est très proche de celle du compost de déchets verts déjà sélectionné.

Tableau 5.3 : Doses d'apport de PRO testées dans les scénarios en respectant la législation (170kgNtot/ha)et rappel des teneurs en N organique et minéral des PRO, estimation du N minéral potentiellement disponible des PRO à l'issue des simulations des cinétiques de minéralisation du N

Type de PRO	**Dénomination PRO**	**Quantité apportée**	**MS**	**Norg**	**N minéral**	**N disponible (Nminéral + Norganique minéralisé)**	**N disponible (Nminéral + Norganique minéralisé)**
		t MB/ha	**%MB**	**%MS**	**%MS**	**kgN/tMS**	**%Ntot**
Fertilisants	*Humival (Lisier de porc séché)*	*3,7*	*88,1*	*5,2*	*0,045*	*25,0*	*47,4*
	Boues séchées	*2,7*	*88,5*	*6,8*	*0,190*	*35,6*	*50,8*
	Fientes de volailles	-	48,7	3,7	0,300	15,4	40,6
Amendants	*Fumier cheval pailleux*	*30,4*	*35,0*	*1,4*	*0,001*	*-6,1*	*-73,3*
	Fumier de chevaux composté	*27,4*	*44,3*	*1,4*	*0,003*	*2,4*	*-0,5*
	Compost DV Versailles	*16,2*	*58,4*	*1,8*	*0,013*	*0,1*	*-0,2*
	Fertilys	-	48,9	1,5	0,001	0,9	3,2
	Fumier de Bovin	-	36,5	2,9	0,002	0,5	2,6

Les paramètres nécessaires à la simulation des cinétiques de minéralisation avec STICS (cf figure 5.3) et utilisés pour la simulation des scénarios sont résumés dans le tableau 5.4.

Tableau 5.4: paramètres décrivant les différents PRO dans STICS (voir figure 4.4 et tableau 4.5 de présentation du module STICS résidus pour la signification des paramètres)

Type de PRO	*Dénomination PRO*	*K (j-1)*	*λ*	*Y*	*h*	*C/N biomasse*	*C/N PRO*
Fertilisants	*Humival (Lisier de porc séché)*	*0,3572*	*0,0022*	*0,62*	*0,1*	*6,0*	*6,0*
	Boues séchées	*0,2267*	*0,0011*	*0,62*	*0,1*	*7,7*	*7,4*
	Fientes de volailles	0,6729	0,0230	0,62	0,68	6,0	8,8
Amendants	*Fumier de chevaux pailleux*	*0,0699*	*0,0689*	*0,62*	*0,78*	*10,5*	*25,7*
	Fumier de chevaux composté	*0,0038*	*0,0001*	*0,62*	*1,0*	*9,5*	*13,9*
	Compost DV Versailles	*0,0032*	*0,0022*	*0,62*	*1,0*	*7,2*	*12,6*
	Fertilys	0,0057	0,0001	0,62	0,1	10,0	16,9
	Fumier de Bovin	0,0181	0,0073	0,62	1,0	17,5	20,6

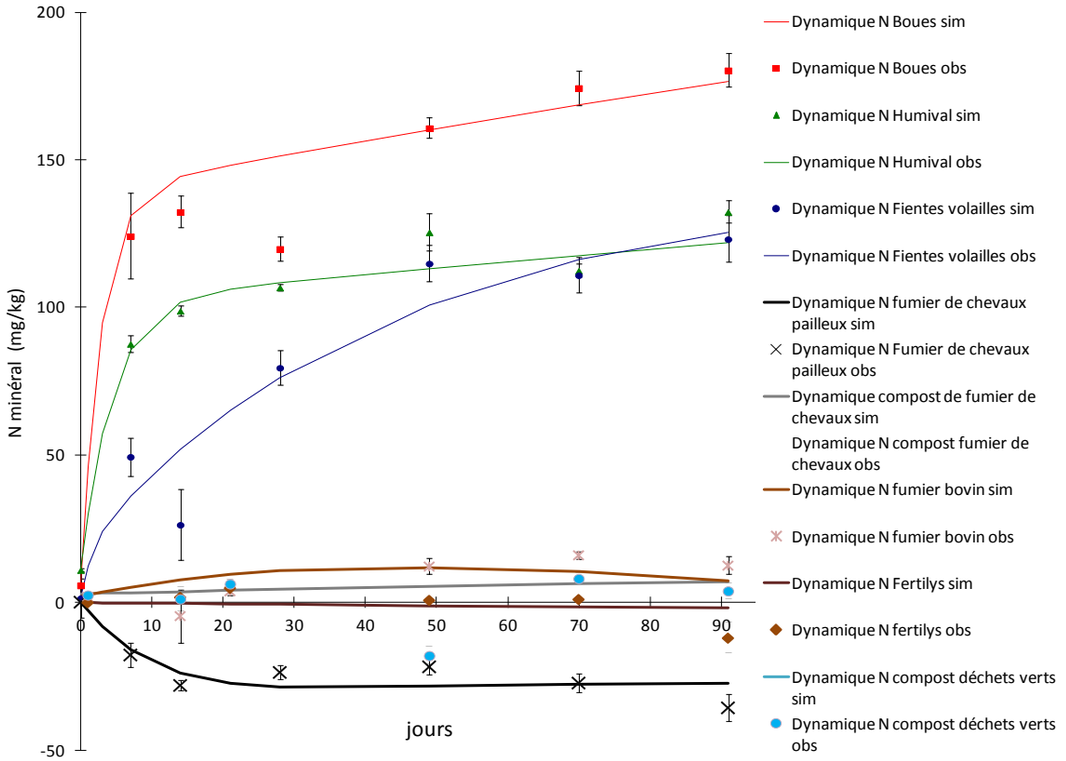


Figure 5.3 : Dynamique d'évolution de l'azote minéral potentiellement disponible optimisée à l'aide du module STICS à partir des résultats d'évolution du N minéral au cours d'incubations sol +PRO fertilisant ou amendant en conditions contrôlées de laboratoire (mg N/kg sol)

5.2.2. Conditions de simulations :

Les simulations sont faites sur *toute la succession de culture*. Les différentes unités de simulations sont enchainées et le modèle utilise les données de sorties d'une unité de simulation n et les intègrent directement pour l'unité de simulation suivante.

Une unité de simulation débute toujours *le jour de la récolte du précédent cultural* et prend fin à la récolte de la culture simulée. Le tableau 5.5 représente les dates de début et de fin de simulation de la succession Colza/Blé/Maïs/Blé. Nous avons choisi d'enfouir les résidus de Cipan le 15/01 afin de garantir au mieux un bon développement de la culture et réduire ainsi au maximum le risque de lixiviation des nitrates. Sachant que les agriculteurs détruisent les Cipan, en général durant le mois de décembre.

Tableau 5.5 : Dates de début et fin de simulation des différents cas testés de la succession Colza/Blé/Maïs/Blé.

		Date de début de simulation	**Date de fin de simulation**
Succession avec Cipan	Colza	20/08	14/07
	Repousses	15/07	14/10
	Blé	15/10	30/08
	Culture intermédiaire	01/09	15/01
	Maïs	16/01	15/11
	Blé	16/11	30/08

Dans la succession de culture modèle, l'introduction de CIPAN dans l'itinéraire technique correspond à (i) simuler des repousses de colza entre le colza et le premier blé, ceci étant réalisé en simulant une implantation de colza en faible densité pendant 3 mois entre la récolte de colza et le semis du blé, (ii) implanter une culture intermédiaire (moutarde) entre le blé et le maïs et qui dure 4mois et demi.
Nous avons utilisé les mêmes paramètres de sol, plante et densités de semis que pour les simulations testées dans le chapitre 4 sur l'essai Qualiagro.
Pour la culture de colza, la variété utilisée est Goéland. Pour les Cipan, la moutarde a été utilisée. Une seule variété est paramétrée dans STICS « Semis tardif ». Cette culture est la plus utilisée sur le territoire en tant que Cipan. Tous les paramètres par défaut de ces variétés sont utilisés.
Pour tous les scénarios, **nous n'allons pas effectuer de complémentation azotée** (hormis le témoin fertilisé) afin de mieux étudier l'impact agro-environnemental de l'épandage des PRO.
Nous initialisons les simulations en partant d'une même teneur en eau à la capacité au champ dans les différents horizons et d'un même stock de N minéral afin d'étudier l'impact des épandages ou pas de PRO sur le stock de N dans le sol. Ces teneurs sont issues de mesures effectuées sur une parcelle témoin riche en MO dans l'essai Qualiagro afin de donner des conditions favorables pour une bonne initialisation de la saison culturale. Les différents paramètres d'initialisation sont représentés dans le tableau 5.6.

Tableau 5.6: Paramètres initiaux du sol de la succession Colza/Blé/Maïs/Blé

		Norg fort ou faible 0,17 ou 0,088 g/100g sol
Teneurs en Eau (g/100g sol)	Horizon 1	26,7
	Horizon 2	18,9
	Horizon 3	19,3
	Horizon 4	19,3
NO_3 (kgN/ha)	Horizon 1	13,3
	Horizon 2	4,4
	Horizon 3	0,9
	Horizon 4	0,9
NH_4 (kgN/ha)	Horizon 1	6,7
	Horizon 2	1,1
	Horizon 3	4,2
	Horizon 4	4,2

En début de chaque scénario où on enfouit les résidus de blé de la rotation précédente, nous incorporons 8,47 tMF/ha de résidus de blé caractérisé par : teneur en MS de 90%, Corg de 46%, un C/N de 60 et une teneur en Nminéral nulle. Pour les scénarios où on exporte les pailles, seuls 2,82 tMF/ha de résidus de blé sont incorporés.
Les PRO amendants sont épandus sur les chaumes du précédent cultural quand il s'agit d'un épandage pour une culture d'hiver. Lorsqu'il s'agit du maïs, un déchaumage (la profondeur du travail du sol pour un déchaumage est de 10cm) est d'abord fait à la récolte puis un labour (la profondeur du travail du sol pour un labour est de 30cm) est effectué le jour de l'épandage des PRO fertilisants (le 02/04). Dans le cas de l'épandage de PRO amendants, seul un labour est effectué afin d'enfouir les PRO apportés. Cette pratique est généralement effectuée par les agriculteurs. Les dates d'épandage des PRO amendants et fertilisants ainsi que les dates de labour et de semis sont présentés dans le tableau 5.7.

Tableau 5.7 : Dates des interventions culturales et d'apport des PRO amendants et fertilisants pour les 4 cultures de la succession

		Dates
Début de Simulation	**COLZA**	20/8
Labour + Epandage PRO Amendant		21/8
Semis		31/8
Epandage PRO Fertilisant		14/2
Fin/Début de simulation		14/7
"Semis"	**Repousses Colza**	17/7
Fin/Début de simulation		6/10
Labour + Epandage PRO Amendant	**BLE**	7/10
Semis		21/10
Epandage PRO Fertilisant		14/2
Fin/Début de simulation		30/8
Si épandage de PRO fertilisants : Déchaumage Si épandage de PRO Amendants : Labour + Epandage	**Moutarde**	30/8
Semis		1/9
Fin/Début de simulation		15/1
Labour + Epandage PRO Fertilisant	**MAIS**	2/4
Semis		15/4
Fin/Début de simulation		15/11
Labour + Epandage PRO Amendant	**BLE**	16/11
Semis		17/11
Epandage PRO Fertilisant		14/2
Fin de simulation		30/8

5.3. Analyse des résultats

Nous allons passer maintenant à l'exposé des résultats.
Les critères les plus importants d'évaluation des différents scénarios sont **les rendements obtenus** que l'on souhaite rapprocher le plus possible des rendements des agriculteurs, les **quantités d'azote lixiviées** que l'on va chercher à limiter, et **un bilan d'azote organique positif** dans le sol afin de maintenir les teneurs en MO dans le sol.
Par ailleurs, pour chaque série de scénarios testés, un bilan de phosphore et de potassium suite aux épandages des différents PRO sera analysé.

Nous vérifierons d'abord dans cette partie 5.3 la **pertinence de nos situations témoin agriculteur**, notamment par rapport aux rendements et au bilan d'azote organique (**5.3.1**).

Le bilan d'azote organique est calculé comme suit :

Bilan N organique sol colza= (Norg PRO apporté - N minéralisé PRO) + (Norg résidus de culture blé – N minéralisé résidus de culture blé) - Minéralisation de l'humus du sol)

Bilan N organique sol repousse colza = (Norg résidus de culture colza– N minéralisé résidus de culture colza) - Minéralisation de l'humus du sol

Bilan N organique sol blé= (Norg PRO apporté - N minéralisé PRO) + (Norg résidus de repousses de colza – N minéralisé résidus de repousses colza) - Minéralisation de l'humus du sol

Bilan N organique sol Cipan = (Norg résidus de culture blé– N minéralisé résidus de culture blé) - Minéralisation de l'humus du sol

Bilan N organique sol maïs= (Norg PRO apporté - N minéralisé PRO) + (Norg résidus de Cipan – N minéralisé résidus de Cipan) - Minéralisation de l'humus du sol

Bilan N organique sol blé= (Norg PRO apporté - N minéralisé PRO) + (Norg résidus de maïs – N minéralisé résidus de maïs) - Minéralisation de l'humus du sol

Le modèle prend en compte les arrières effets des apports de PRO et de l'enfouissement des résidus de culture. En effet, la partie non minéralisée des PRO ou des résidus de culture à la fin d'une simulation est incorporée dans le pool matière organique active du sol et qui continue à se décomposer dans la simulation suivante.
Le bilan des simulations des repousses de colza est ensuite additionné à celui du blé de colza pour évaluer le bilan complet du N organique du blé de colza De même, le bilan du Cipan et du maïs sont additionnés pour le bilan du N organique du maïs.

A partir des résultats de simulation des témoins engrais minéraux et non fertilisés, nous avons calculé les coefficients apparents d'utilisation des engrais (CAU), qui serviront ensuite pour le calcul du coefficient d'équivalence engrais (Keq).

CAU = (N exporté par la culture du traitement N minéral – N exporté par la culture traitement 0 engrais)/ Apport total d'azote engrais

Le coefficient d'équivalence engrais est un indicateur de la valeur fertilisante des PRO une fois apportés au champ. Il est calculé comme suit :
Keq = CAU(PRO)/ CAU (engrais minéral)

Nous présenterons les rendements simulés des différents scénarios sélectionnés, les coefficients d'équivalence en engrais du N des PRO, ainsi que les quantités d'azote lixiviées. Nous présenterons également l'impact de l'utilisation des différents types de PRO testés sur le bilan d'azote organique dans le sol ainsi que les bilans de flux de P_2O_5 et K_2O.

Le calcul des besoins en phosphore et en potassium des cultures ont été calculés de la manière suivante :

Besoins en P_2O_5 et K_2O des cultures (kg/ha) = besoins des cultures (kg/t ou qx de rendements (Comifer, 2007)) * Rendements obtenus des cultures

Les exportations de cultures en phosphore et en potassium varient en fonction des cultures. Le tableau 5.8 présente les données utilisées pour le calcul des exportations totales des cultures de ces deux éléments. Ces données sont établies par le Comifer (2007).

Tableau 5.8 : Exportation de P_2O_5 et de K_2O par les cultures (Comifer, 2007)

Culture	Exportations P_2O_5 (kg/qx)	Exportations K_2O (kg/qx)
Colza	1,25	0,85
Blé	0,65	0,5
Maïs	0,6	0,55

L'intégralité des résultats de toutes les situations et scénarios testés sont présentés en Annexe 5.1.

5.3.1 - Vérification de la pertinence de nos situations témoin avec fertilisation minérale :

Les situations que nous avons choisies doivent être caractérisées sur le plan du bilan d'azote afin de voir (i) si les situations de base retenues, avec les fertilisations minérales choisies, vont constituer un « témoin agriculteur » valable, c'est-à-dire des situations où l'azote n'est pas limitant du rendement, et donc par rapport auxquelles on pourra discuter les substitutions des engrais chimiques par des PRO (ii) quels sont les effets de ces niveaux de fertilisation, mais aussi l'effet des variables choisies (sol avec Norg plus ou moins fort) sur le bilan de l'azote. Ceci nous sera ensuite nécessaire pour pouvoir mieux interpréter les résultats des scénarios de substitution.

La pertinence de nos situations témoins va être établie grâce à l'établissement de courbes de réponse à l'azote des cultures principales de ces successions. Les courbes de réponse (Figures 5.4 à 5.7) à l'azote des différentes cultures ont été testées avec STICS pour les deux niveaux de N organique du sol et avec exportation ou non des résidus de récolte. Les simulations ont été faites sur une année culturale (année climatique moyenne) et avec Cipan quand cela était nécessaire. Le blé est le précédent cultural testé. Les dates de début et de fin de simulation sont les mêmes que celles utilisées pour les scénarios (Tableau 5.7).

Les quantités de résidus enfouies sont de 8,47 tMF/ha en cas d'enfouissement total (ces quantités sont mesurées à partir de l'essai Qualiagro pour un traitement témoin où on obtient un rendement en grains de 9,0 TMS/ha) alors qu'elles sont de 2,82 tMF/ha en cas d'exportation (On émet l'hypothèse que le tiers des résidus est enfoui). Nous avons introduit les mêmes quantités de résidus pour les différentes simulations afin d'homogénéiser les résultats et avoir les mêmes conditions.

Les unités de simulation ont été initialisées afin d'avoir une teneur en eau du sol à la capacité au champ et une quantité d'azote minéral dans le sol de 35,6 kgN/ha (dont 20 kgN/ha sous forme de NO_{3-} ; Tableau 5.6). Ces données ont été mesurées au champ dans le cas du témoin fertilisé (essai Qualiagro). Les C/N des résidus de blé et de maïs sont fixés à 60. La teneur en Corg des résidus de blé est de 46% (valeur mesurée sur le site Qualiagro). La teneur en eau des résidus est de 10% et la teneur en Nmin des résidus frais est nulle.
Les rendements observés chez les agriculteurs et comparés aux rendements simulés sont ceux obtenus sur des sols pauvres en matières organiques puisque ces sols sont les plus répandus sur le territoire. Pour les rendements obtenus sur des sols riches en MO, nous n'avons pas pu obtenir ces informations vu la rareté de ces sols sur le territoire. Nous allons présenter les courbes de réponse à l'azote des rendements et des quantités de N absorbées par les cultures.

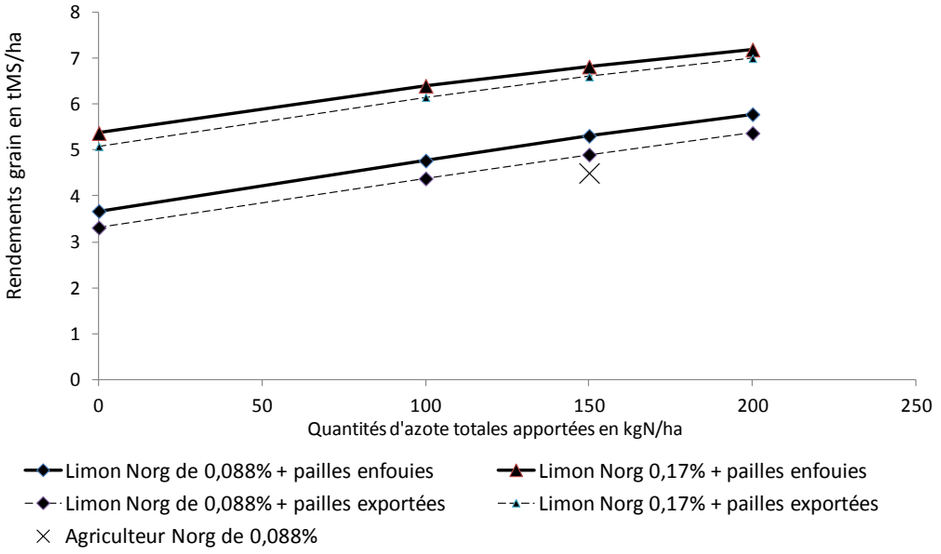


Figure 5.4 : Courbes de réponse à l'azote minéral des rendements pour la culture de Colza

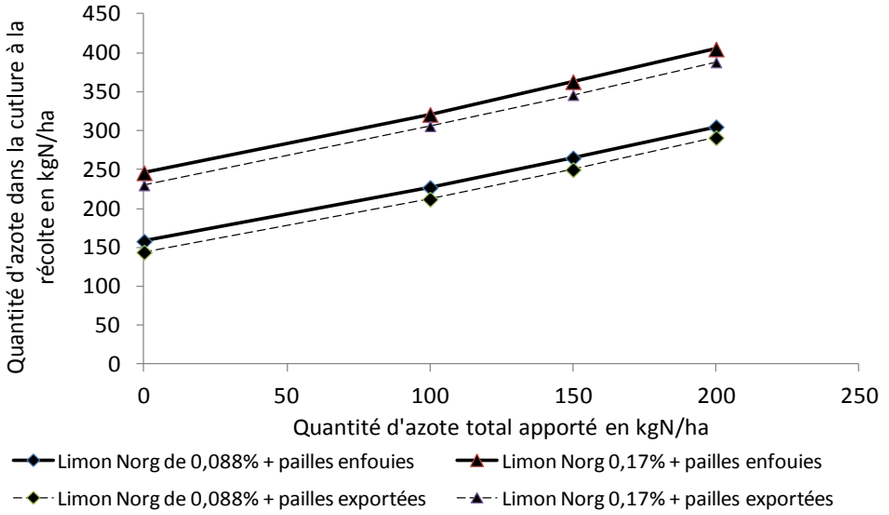


Figure 5.5 : Courbes de réponse à l'azote minéral des quantités de N absorbées par la culture de Colza

Pour le **colza** (Figure 5.4 et 5.5), les courbes de réponses à l'azote dépendent essentiellement des teneurs en Norg dans le sol.

Les rendements (Figure 5.4) augmentent en fonction des quantités d'engrais azotés apportées. Les différences entre les rendements obtenus dans les traitements ayant un Norg fort et Norg faible dans le sol restent importantes pour tous les niveaux de fertilisation (>= 1,4 tMS/ha). En comparant avec les rendements observés chez les agriculteurs enquêtés, on remarque que les rendements simulés sont légèrement supérieurs aux rendements réellement obtenus. La différence varie entre 0,4 tMS/ha et 0,8 tMS/ha respectivement pour un sol pauvre en MO avec exportation ou non des résidus de culture de blés. Le colza dans notre traitement témoin agriculteur est fertilisé à hauteur de 150 kgN/ha.

A cette dose, les rendements sont presque optimaux pour les sols limoneux profonds avec les deux niveaux de Norg dans le sol. Les niveaux de rendement augmentent encore de 0,4 tMS/ha à 0,5 tMS/ha quand la fertilisation est supérieure à la fertilisation moyenne, l'optimum de rendement n'est donc pas tout à fait atteint. Dans tous les cas, la réponse du rendement est linéaire par rapport aux apports d'engrais.

En ce qui concerne l'absorption du N par le colza (Figure 5.5), nous n'atteignons pas encore un plateau pour définir une dose d'engrais optimale. Ces courbes d'absorption ont toutes une allure linéaire. Le tableau 5.9 présente les CAU calculés dans les différents cas. Les CAU calculés sont similaires et on n'observe pas une différence importante entre les traitements avec exportation des pailles de blé, les traitements avec pailles enfouies et entre les scénarios testés sur sol riche en MO et les scénarios testés sur sol pauvre en MO.

Tableau 5.9: CAU calculés pour la culture de colza pour les différentes situations testées

	Sol limoneux profond			
	Pailles enfouies		Pailles exportées	
	Sol pauvre Norg 0,088%	Sol riche Norg 0,170%	Sol pauvre Norg 0,088%	Sol riche Norg 0,170%
Dose : 100 kgN/ha	0,7	0,8	0,7	0,8
Dose : 150 kgN/ha	0,7	0,8	0,7	0,8
Dose : 200 kgN/ha	0,7	0,8	0,7	0,8

L'impact de la restitution ou de l'exportation des résidus de culture précédente est toujours faible. On note une légère différence des rendements et quantités de N absorbées par les cultures entre les traitements avec enfouissement total des résidus de culture et les traitements avec exportation, différence en faveur des traitements avec enfouissement. Ce léger écart est dû aux quantités de N minéralisées *via* la dégradation des résidus de récolte. En effet, après modification des paramètres régissant la dynamique de N provenant de la minéralisation des résidus de récolte, la phase d'immobilisation a été raccourcie, son amplitude réduite et la phase de re-minéralisation accélérée. En enfouissant les résidus de récolte, les quantités de N restituées au sol sont plus importantes que celles restituées lorsqu'on exporte les résidus de blé ; les quantités de N reminéralisées dans le premier cas (enfouissement des résidus) sont ainsi plus importantes que dans le second (exportation des résidus). La conséquence en est une amélioration légère des rendements dans les traitements avec enfouissement des résidus de blé par rapport aux traitements avec exportation de ces résidus. Il faut noter par ailleurs que la phase d'immobilisation ne doit pas se chevaucher avec la période où les besoins de la culture en place sont maximaux. Si la phase d'immobilisation de N déborde sur cette période (besoins maximaux des cultures), les niveaux de rendements seront plus faibles.

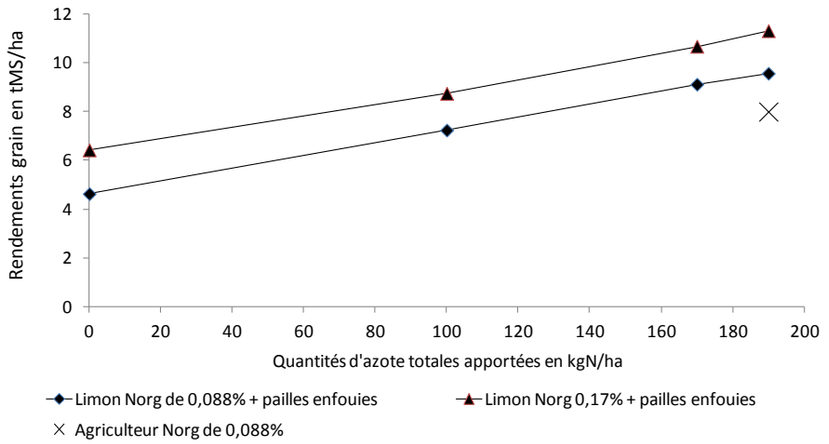


Figure 5.6 : Courbes de réponse à l'azote minéral des rendements pour la culture de Blé

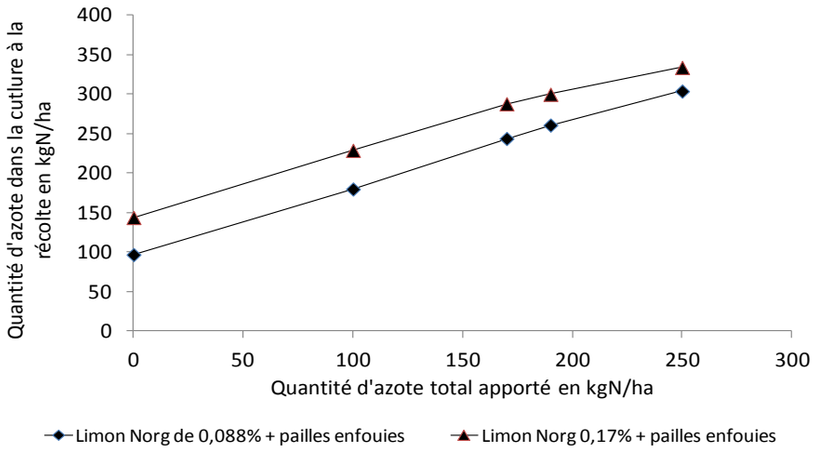


Figure 5.7 : Courbes de réponse à l'azote minéral des quantités de N absorbées par la culture de Blé

Pour le blé (Figure 5.6 et 5.7), Les courbes de réponse à l'azote dépendent fortement de la fertilisation azotée et en moindre mesure de la richesse du sol en MO. Dans le cas du Blé, les résidus de culture de colza ou de Maïs précédents sont toujours enfouis.

La différence entre les rendements obtenus dans les traitements ayant l'apport d'azote minéral le plus élevé et le traitement sans apports d'engrais est très importante et varie entre 5,8 tMS/ha (sol riche en MO) et 7,0 tMS/ha (sol pauvre en MO)

La différence entre les rendements obtenus dans les traitements ayant un Norg fort et Norg faible dans le sol est non négligeable et varie entre 0,6 tMS/ha et 1,8 tMS/ha. Le blé dans notre traitement « témoin agriculteur » est fertilisé à hauteur de 190 kgN/ha. **A cette dose, les rendements obtenus pour les agriculteurs sont plus faibles par rapport au rendement optimal (1,6 tMS/ha)**. Les CAU calculés dans les différents cas de figures sont très proches de 1 et sont également proches entre traitements (Tableau 5.10).

Tableau 5.10: CAU calculés pour la culture de blé pour les différentes situations testées

	Sol limoneux profond	
	Pailles enfouies	
	Sol pauvre Norg 0,088%	Sol riche Norg 0,170%
100 kgN/ha	0,8	0,9
170 kgN/ha	0,9	0,8
190 kgN/ha	0,9	0,8
250 kgN/ha	0,8	0,8

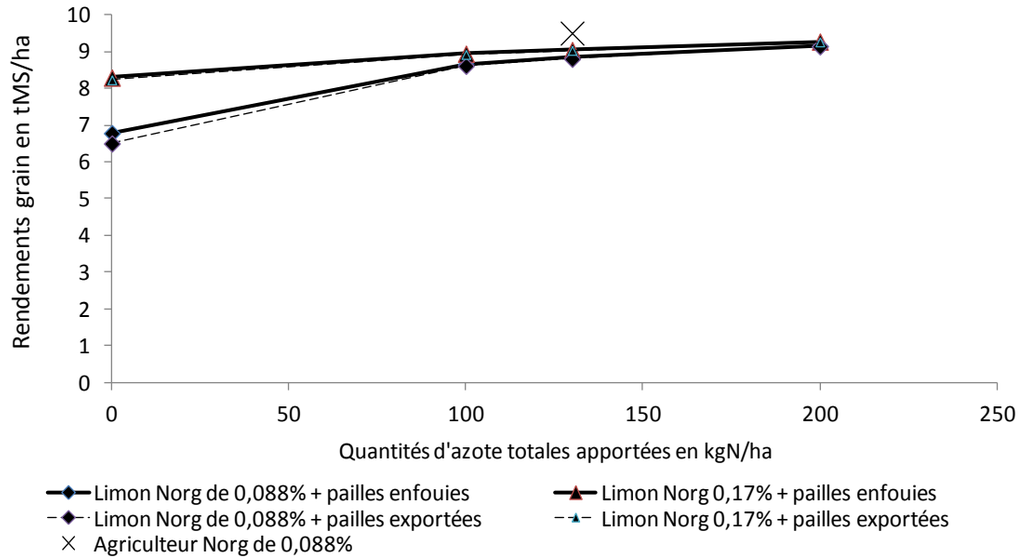


Figure 5.8: Courbes de réponse à l'azote minéral pour le rendement de la culture de Maïs

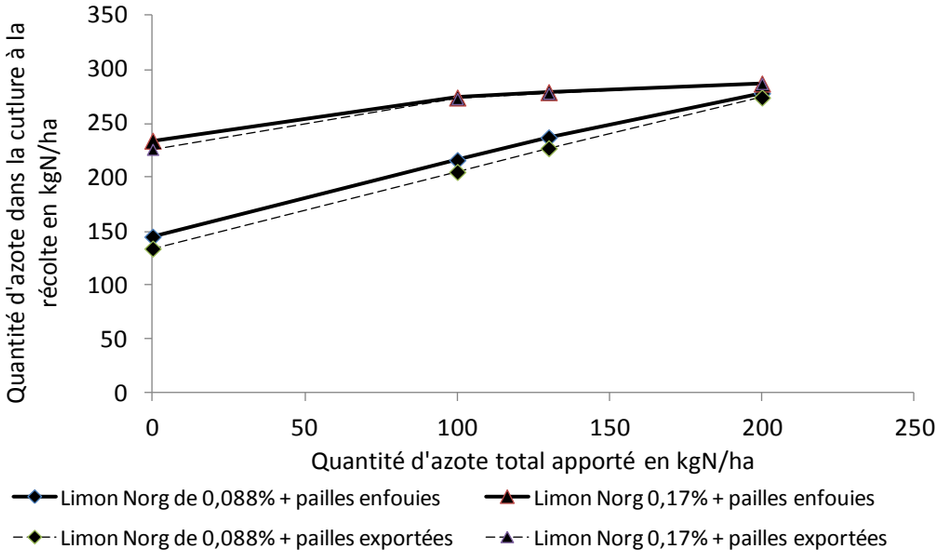


Figure 5.9 : Courbes de réponse à l'azote minéral des quantités de N absorbées par la culture de Maïs

Pour le **Maïs**, on remarque (Figures 5.8 et 5.9), que les rendements et les quantités de N absorbées augmentent en fonction des apports azotés surtout dans le cas d'un sol pauvre en MO. Dans le cas d'un sol riche en MO, les rendements et les exportations d'azote sont déjà presqu'optimaux en absence de fertilisation minérale.
La culture de maïs dans notre traitement « témoin agriculteur » est fertilisée à hauteur de 130 kgN/ha. **A cette dose, les rendements sont optimaux dans tous les cas** (9,2 tMS/ environ dans les deux cas) et sont également compatibles avec les rendements observés chez les agriculteurs enquêtés 9,5 tMS/ha).

L'effet de l'exportation ou pas des résidus de culture est très faible sur les rendements et les quantités de N absorbées par les cultures.
Ainsi, nos itinéraires de fertilisation dans les « témoins agriculteur » permettent théoriquement de couvrir les besoins en azote de ces cultures dans toutes les situations retenues et sont compatibles avec les observations chez les agriculteurs. *Nous pourrons donc considérer qu'elles représentent des situations témoins par rapport auxquelles*

nous pourrons comparer des substitutions par des PRO. Les CAU calculés sont proches de 1 lorsque le sol est pauvre en MO et sont relativement faibles lorsque le sol est riche en MO (Tableau 5.11) : ceci signifie que l'effet de l'apport d'engrais est plus important dans des conditions où la fourniture d'azote du sol est faible, et inversement, cet effet est faible quand les teneurs en Norg dans le sol (donc la fourniture d'azote minéral dans le sol) sont fortes.

Tableau 5.11: CAU calculés pour la culture de maïs pour les différentes situations testées

	Sol limoneux profond			
	Pailles enfouies		Pailles exportées	
	Sol pauvre Norg 0,088%	Sol riche Norg 0,170%	Sol pauvre Norg 0,088%	Sol riche Norg 0,170%
100 kgN/ha	0,7	0,4	0,7	0,5
130 kgN/ha	0,7	0,3	0,7	0,4
200 kgN/ha	0,7	0,3	0,7	0,3

5.3.2. Vérification de la pertinence de nos scénarios témoins simulés

Nous allons ici comparer les résultats de rendements simulés dans les scénarios « témoin fertilisation minérale » avec les rendements obtenus classiquement par les agriculteurs de la plaine de Versailles. Nous comparerons également ces rendements à ceux présentés dans les courbes de réponse du paragraphe précédent. Selon la cohérence des résultats par rapport aux agriculteurs et si les rendements obtenus sont dans la partie de réponse linéaire dans les courbes de réponse à l'engrais, nous pourrons calculer les coefficients apparents d'utilisation des engrais (CAU)[7] et les impacts environnementaux (lixiviation) des témoins fertilisés par rapport aux témoins non fertilisés pour les différents scénarios (deux niveaux de Norg, avec/sans enfouissement des résidus de blé). Nous montrerons aussi les bilans d'azote organique[8] en tant que références auxquelles sera comparé (cf 5.4) l'impact de l'utilisation des différents types de PRO, à la fois dans la substitution directe des engrais azotés et dans les scénarios avec apport de PRO amendants.

5.3.2.1 - Rendements simulés

Nous n'avons testé les scénarios d'exportation des résidus de culture du blé que dans le cas d'un sol pauvre en MO. En effet, cette pratique est rencontrée essentiellement sur ce type de sols dans le cadre de contrats d'échange pailles/Fumiers de chevaux.
Les rendements simulés des différents traitements témoins testés (Tableau 5.12) sont du même ordre de grandeur que les rendements obtenus lors de l'établissement des courbes de réponse à l'azote.

[7]Le coefficient d'équivalence engrais est un indicateur de la valeur fertilisante des PRO une fois apportés au champ. Il est calculé comme suit :
CAU = (N exporté par la culture du traitement – N exporté par la culture traitement 0 PRO et 0 engrais)/ Apport total d'azote engrais et PRO
[8]Le bilan d'azote organique est calculé comme suit :
Bilan = ((Norg PRO apporté - N minéralisé PRO) + (Norg résidus de culture – N minéralisé résidus de culture) - Minéralisation de l'humus du sol)

Tableau 5.12 : Rendements simulés et quantités de N absorbées par les cultures ainsi que les CAU engrais calculés pour les différentes cultures de la succession Colza/Blé/Maïs/Blé en absence de fertilisation et en cas de fertilisation « agriculteur » en sol limoneux

			Doses d'engrais		Norg = 0,088%		Norg = 0,17%
			kgN/ha	Agriculteur	Pailles blé enfouies	Pailles blé exportées	Pailles blé enfouies
Rendements simulés tMS/ha	Témoin non fertilisé	Colza	0		3,67	3,31	5,28
		Blé	0		4,14	3,93	7,22
		Maïs	0		7,79	6,98	8,66
		Blé	0		2,57	2,58	3,34
	Témoin fertilisé	Colza	150	4,5	5,18	4,9	6,75
		Blé	170	9,0	8,39	8,36	11,57
		Maïs	130	9,0	9,07	8,93	9,23
		Blé	190	8,0	6,51	5,92	11,1
Quantités de N absorbés par les cultures kgN/ha	Témoin non fertilisé	Colza	0		162	154	240
		Blé	0		88	81	167
		Maïs	0		175	150	268
		Blé	0		41	43	94
	Témoin fertilisé	Colza	150		265	250	354
		Blé	170		225	220	302
		Maïs	130		278	253	288
		Blé	190		184	168	307
CAU	Témoin fertilisé	Colza	150		0,7	0,6	0,8
		Blé	170		0,8	0,8	0,8
		Maïs	130		0,8	0,8	0,2
		Blé	190		0,8	0,7	1,0

En effet, dans le cas du scénario non fertilisé, les rendements du colza sont similaires aux rendements obtenus dans les courbes de réponses en absence de fertilisation. Dans le cas de la culture de blé de colza, les rendements sont légèrement inférieurs aux rendements obtenus lors de l'établissement des courbes de réponses sur le sol pauvre en MO, ce qui est dû à l'effet des quantités de résidus de culture restitués au sol (Ecart de 0,4 tMS/ha pour le cas des pailles enfouies et de 0,7 tMS/ha pour le cas des pailles exportées).

En effet, Les quantités de résidus enfouies simulées par le modèle (Annexe 5.1) dans le cas des traitements témoins sur un sol pauvre en MO, sont inférieures aux quantités de résidus enfouies lors de l'établissement des courbes de réponses (Ecart de 5,8 tMS/ha). Cet écart important est expliqué par la différence entre les précédents culturaux : en effet, dans le cas du blé derrière colza, les repousses de colza sont simulées afin de limiter au mieux la lixiviation des nitrates. De plus, le modèle, ne prend pas en compte les arrières effets de l'enfouissement des résidus de colza. Les quantités enfouies suite à la destruction des repousses de colza sont faibles puisque la culture est détruite au bout de 3 mois (1,8 tMS/ha). De plus, comme vu précédemment sur les courbes de réponses, les quantités de résidus enfouies peuvent avoir un effet positif sur les rendements obtenus si la phase d'immobilisation de coïncide pas avec les besoins maximaux des cultures. De ce fait, les rendements obtenus dans le cas des témoins semblent confirmer les observations faites précédemment.

Par contre, les rendements simulés du blé de colza sur un sol riche en MO sont supérieurs aux rendements obtenus dans les courbes de réponse (Ecart 0,8 tMS/ha). Ceci est également dû aux quantités de résidus de culture enfouies qui sont plus importantes dans le cas du témoin que nous testons (voir Annexe 5.1). Dans ce cas, les quantités plus faibles de résidus enfouis dans le cas des témoins simulés ont tendance à avoir un effet positif sur les rendements.

En effet, dans un sol riche en Norg, les quantités de N disponible provenant de la minéralisation de l'humus du sol sont beaucoup plus importantes que les quantités de N minéralisées dans un sol pauvre en Norg. Durant la phase d'immobilisation du N suite à l'enfouissement des résidus de récolte, on observe une diminution des quantités de N disponibles dans le sol pour les cultures. Ces quantités immobilisées sont plus importantes dans le cas des simulations effectuées pour l'élaboration des courbes de réponses que dans les témoins simulés. La compensation de ces pertes de N *via* la re-minéralisation des résidus de récolte et la minéralisation de la matière organique du sol dans le cas de notre témoin est plus rapide et les quantités de N disponibles dans le sol sont plus importantes lorsqu'on enfouit des quantités faibles de résidus de récolte. Par contre, dans un sol pauvre en Norg, les quantités de N minéralisées à partir de la matière organique stable du sol sont faibles et la phase de re-minéralisation du N suite à la dégradation des résidus de récolte peut compenser les quantités de N immobilisées précédemment, voire participer à augmenter de manière importante les quantités de N disponibles dans le sol. Dans ce cas, avoir des quantités de résidus de récolte plus importantes peut avoir un impact positif sur les rendements, alors que dans un sol riche en Norg, l'effet peut être inverse.

Les rendements obtenus dans le cas de la culture de maïs sont proches des rendements obtenus lors de l'élaboration des courbes de réponses. Les rendements obtenus du témoin non fertilisé sont légèrement supérieurs, avec des écarts variant entre 0,5 tMS/ha et 1,0 tMS/ha. Ceci est également dû aux quantités de résidus de la culture intermédiaire restituées au sol (voir Annexe 5.1). En effet, les quantités enfouies sont plus faibles dans tous les cas de figures. Ces résidus sont enfouis le 15/01 c'est-à-dire 3 mois avant le semis du maïs, alors que les besoins de la culture de maïs sont importants durant les 4 à 5 mois suivant le semis. Durant cette période, la phase d'immobilisation suite à la décomposition des résidus de récolte n'est encore pas terminée et la phase de reminéralisation du N n'a pas encore commencé, ce qui peut affecter directement les niveaux de rendements simulés. Dans ce cas, plus on enfouit de résidus de récolte, quel que soit le niveau de richesse du sol en MO, et plus on risque d'avoir des pertes en rendements. Ceci peut expliquer ces niveaux de rendements plus faibles pour les témoins issus de l'élaboration des courbes de réponse par rapport aux témoins testés.

Enfin, dans le cas du blé de maïs, les rendements sont inférieurs aux rendements potentiellement obtenus. Un écart de 2,0 tMS/ha est obtenu dans le cas du sol pauvre en MO et de 3,1 tMS/ha dans le cas du sol riche en MO. Cet écart n'est pas dû aux quantités de résidus de récolte puisque les quantités simulées sont proches de ceux initialisées lors de l'établissement des courbes de réponse. Par contre, la nature de ces résidus est différente. En effet, les C/N des résidus incorporés (C/N variant entre 71 et 98) à la récolte du maïs sont plus importants que le C/N des résidus de blé (C/N = 60) testés lors de l'établissement des courbes de réponse. De ce fait, la phase d'immobilisation après enfouissement des résidus de récolte de maïs est plus importante ce qui a comme conséquence la diminution des rendements obtenus dans tous les cas de figures (sol riche ou pauvre en MO).

Dans le cas de la succession fertilisée, et pour la culture de colza, on remarque que les rendements obtenus sont parfaitement compatibles (les écarts de rendements ne dépassent pas 0,1 tMS/ha) avec les rendements obtenus dans les courbes de réponses.
Dans le cas de la culture de blé de colza, les rendements sont légèrement inférieurs aux rendements obtenus lors de l'établissement des courbes de réponses sur le sol pauvre en MO (Ecart de 0,7 tMS/dans les deux cas de pailles enfouies ou exportées). Par contre, les rendements simulés du blé de colza sur un sol riche en MO sont supérieurs aux rendements obtenus dans les courbes de réponse (Ecart 0,9 tMS/ha). C'est le même constat que précédemment.
Les rendements obtenus dans le cas de la culture de maïs sont proches de ceux obtenus sur les courbes de réponse. Les rendements obtenus du témoin non fertilisé sont légèrement supérieurs, avec des écarts variant entre 0,5 tMS/ha et 1,0 tMS/ha. Les quantités de résidus de culture restitués dans le sol expliquent ces différences. Dans ce cas également, nous avons le même constat que celui fait sur la culture de maïs pour les témoins non fertilisés

Enfin, dans le cas du blé de maïs, les rendements simulés sont inférieurs aux rendements potentiellement obtenus (courbes de réponse). L'écart dans le cas du sol pauvre en MO est très important (3,1 tMS/ha si enfouissement des résidus de récolte et 3,7 tMS/ha si exportation des résidus). L'écart est beaucoup plus faible dans le cas d'un sol riche en Norg (0,2 tMS/ha). Dans ce cas, le même constat fait pour les témoins non fertilisés est applicable bien que les apports d'engrais jouent un rôle tampon qui permet de limiter les écarts de rendements.

Il existe un petit effet de l'exportation des résidus de culture sur les rendements simulés. L'écart entre les rendements obtenus des traitements témoins avec enfouissement des résidus de culture et les traitements avec exportation des résidus de blés ne dépassent pas 0,8 tMS/ha, avec toujours des rendements supérieurs quand les résidus sont enfouis.
Les mêmes constats sont également faits pour les quantités de N absorbées par les cultures dans les deux cas des témoins fertilisés et non fertilisés, en comparaison avec les quantités de N absorbées par les cultures lors de l'établissement des courbes de réponse à l'azote. En effet, les quantités de N absorbées par les cultures dans le cas des traitements avec enfouissement des résidus sont supérieures aux quantités de N dans les cultures pour les traitements avec exportation des résidus de blé (Annexe 5.1).
D'après une étude effectuée par la chambre d'agriculture de Lorraine en 2002, les quantités de N disponibles dans un sol limoneux, dans lequel on enfouit les résidus de récolte, sont supérieures de 5 à 10 kgN/ha par rapport à un traitement où l'on exporte les résidus de culture. Cet écart, bien que faible, pourrait contribuer à l'augmentation des niveaux de rendements dans les traitements avec enfouissement des résidus de culture et par conséquent augmenter les quantités de N absorbées par les cultures.
Saffih-Hdadi et Mary (2008) montrent également que l'exportation des résidus de culture testés sur plusieurs sites entraîne une diminution des teneurs en Corg dans le sol de l'ordre de 0,2% par rapport aux traitements avec enfouissement systématique des résidus de culture. Cette diminution pourra s'exprimer également sur les teneurs en Norg dans le sol si on considère que le C/N de la matière organique du sol reste constant. Cet effet peut contribuer à une légère différence des rendements en faveur des traitements avec enfouissement des résidus. A long terme, les écarts pourraient être de plus en plus conséquents.
On conclut que, les rendements obtenus des deux témoins correspondent généralement bien aux rendements obtenus dans les courbes de réponse, hormis dans le cas du blé de maïs sur le sol pauvre en Norg, où les rendements sont clairement inférieurs à ceux obtenus dans les courbes de réponse à l'azote.

On constate (Tableau 5.12) qu'il existe un effet de la richesse du sol en Norg sur les rendements obtenus et ce pour toutes les cultures.
Sur colza, la différence entre les rendements simulés dans le cas des traitements témoins sur sol riche et les mêmes traitements sur sol pauvre varient entre 1,6 tMS/ha et 2,0 tMS/ha. La différence est encore plus importante sur les deux cultures de blés et plus spécifiquement sur le blé de maïs et surtout dans le cas du témoin fertilisé : le surplus de rendements du blé de maïs varie alors entre 0,8 tMS/ha et 5,2 tMS/ha. L'écart de rendements sur la culture du blé de colza varie quant à lui entre 3,1 tMS/ha et 3,3 tMS/ha. Concernant la culture de maïs, la différence de rendement entre les traitements varie entre 0,2 tMS/ha et 1,7 tMS/ha.

On constate également, à partir du tableau 5.12, qu'il existe un effet important de l'apport d'engrais azotés.
Sur colza, la différence entre les rendements simulés dans le cas des traitements témoins fertilisés et non fertilisés varient entre 1,5 tMS/ha et 1,6 tMS/ha. La différence est encore plus importante sur les deux cultures de blés et plus spécifiquement sur le blé de maïs, le surplus de rendements du blé de maïs varie entre 3,3 tMS/ha et 7,8 tMS/ha. L'écart de rendements sur la culture du blé de colza, varie quant à lui entre 4,3 tMS/ha et 4,4 tMS/ha. Concernant la culture de maïs, les écarts de rendement varient entre 0,6 tMS/ha et 2,0 tMS/ha.
Si on compare les rendements simulés des témoins fertilisés sur un sol pauvre en Norg et les rendements observés chez les agriculteurs de parcelles non amendées, on constate que les rendements obtenus dans nos simulations

sont proches sur toutes les cultures, malgré des écarts plus ou moins importants en fonction de la culture simulée. Sur colza, le rendement simulé est légèrement surestimé (+ 0,7 tMS/ha). En revanche, le rendement du blé de colza est sous estimé par rapport au rendement « agriculteurs » (-1,1 tMS/ha). Le modèle estime de manière très satisfaisante le rendement obtenu sur la culture de maïs et l'écart est de 0,1 tMS/ha. Le modèle sous estime le rendement obtenu sur la culture de blé de maïs où l'écart est de 1,5 tMS/ha.
Ceci est du à la *modification que nous avons effectué quant à la minéralisation du N des résidus de culture,* minéralisation qui parait insuffisante pour estimer au mieux les niveaux de rendements du blé de maïs suite à l'enfouissement des résidus de maïs.

5.3.2.2 - Calcul des CAU

Nous avons également calculé les coefficients apparents d'utilisation des engrais (CAU) pour pouvoir ensuite comparer l'absorption d'azote après apport de PRO.
Les CAU calculés pour la culture de colza sont de 0,7 sur un sol pauvre en Norg dans le cas d'enfouissement des résidus de récolte, et de 0,6 en cas d'exportation des résidus de blé sur le même type de sol. Le CAU est de 0,8 sur un sol riche en Norg avec enfouissement total des résidus (cf. tableau 5.8). Ce même coefficient est de 0,8 dans tous les cas de figures pour le blé de colza. Le CAU est également autour de 0,8 pour le blé de maïs sur le sol pauvre en Norg et de 1,0 sur un sol riche en Norg. Les CAU calculés pour ces différentes cultures sur les deux sols riches et pauvres en MO sont ainsi du même ordre de grandeur. A l'inverse, le CAU est de seulement 0,2 pour la culture de maïs sur un sol riche et de 0,8 sur un sol pauvre, ce qui était attendu au vu des courbes de réponse à l'azote pour le maïs en sol riche en Norg.

Ces CAU sont ainsi généralement du même ordre de grandeur sur un sol riche en MO que sur un sol pauvre à l'exception du maïs. Ce constat est logique puisqu'il concorde bien avec les résultats trouvés suite à l'établissement des courbes de réponse.
Pour la culture de maïs, par contre, la valorisation de l'engrais azoté est plus faible sur un sol riche en Norg puisque, dans ce type de sol, les quantités d'azote disponibles suite à la minéralisation de la matière organique stable su sol (Humus) est très importante par rapport à un sol pauvre en Norg. Ce constat est également observé dans les courbes de réponse.

5.3.2.3 - Pertes azotées (Lixiviation et volatilisation ammoniacale)

Les quantités de nitrates lixiviées dans le sol ayant une teneur en azote organique forte sont plus importantes (Tableau 5.13) que les quantités lixiviées dans le sol à teneur faible en azote organique.

Tableau 5.13. Quantités d'azote lixiviées et volatilisées des différents situations témoins de la succession de culture Colza/Blé/Maïs/Blé

			Doses d'engrais	Norg = 0,088%		Norg = 0,17%
			kgN/ha	Pailles enfouies	Pailles exportées	Pailles enfouies
Lixiviation nitrique simulée kgN/ha	Témoin non fertilisé	Colza	0	1	1	1
		Blé	0	2	2	1
		Maïs	0	37	33	53
		Blé	0	8	14	22
	Témoin fertilisé	Colza	150	1	1	1
		Blé	170	1	1	1
		Maïs	130	40	38	64
		Blé	190	12	14	33
Volatilisation ammoniacale simulée kgN/ha	Témoin non fertilisé	Colza	0	0	0	0
		Blé	0	0	0	0
		Maïs	0	0	0	0
		Blé	0	0	0	0
	Témoin fertilisé	Colza	150	18	18	16
		Blé	170	15	15	13
		Maïs	130	20	20	20
		Blé	190	22	22	17

Dans le cas du témoin non fertilisé, la différence entre les quantités lixiviées entre les deux sols varie de 27 kgN/ha à 45 kgN/ha. Ces quantités de N lixiviées sont d'autant plus importantes sur les traitements fertilisés que les quantités de N minéral dans le sol sont plus importantes.
On remarque également que les plus grandes pertes par lixiviation sont enregistrées sur la culture de maïs. Ceci est dû à aux quantités importantes d'azote minéral dans le sol en fin de simulation de la culture de blé de colza (autour de 100kgN/ha).
En effet, ces quantités d'azote minéral dans le sol sont accumulées durant toute la durée de simulation du blé de colza et du Cipan, suite à la minéralisation des résidus de récolte et du Norg du sol. Le Cipan a permis d'absorber des quantités importantes de N disponibles mais à la fin de la simulation de cette culture, des quantités importantes d'azote minéral restent dans le sol et peuvent être potentiellement perdues par lixiviation (Annexe 5.1). De plus, la destruction des Cipan se fait en janvier. Une période de 4 à 5 mois entre l'enfouissement des résidus du Cipan et le moment où les besoins du maïs sont maximaux s'écoule alors dans des conditions de sol pratiquement nu. Les pertes par lixiviation peuvent donc être importantes durant cette période.
La volatilisation ammoniacale est simulée nulle pour les traitements témoins non fertilisés. Par contre, les quantités d'ammoniac volatilisées des traitements fertilisés sont importantes et varient entre 66 kgN/ha et 75 kgN/ha, ce qui représente une perte nette variant entre 10,3% et 11,7% des engrais apportées.

5.3.2.4 - <u>Bilan d'azote organique</u>

La perte en azote organique dans tous les traitements témoins varie en fonction des teneurs en matières organique des sols et des pratiques culturales (Tableau 5.14)

Tableau 5.14: Bilan d'azote organique des différents témoins de la succession de culture Colza/Blé/Maïs/Blé

			Doses d'engrais	Norg = 0,088%		Norg = 0,17%
			kgN/ha	Pailles enfouies	Pailles exportées	Pailles enfouies
Azote organique kgN/ha	Témoin non fertilisé	Colza	0	-72,6	-57,6	-154,6
		Blé	0	-75,0	-103,0	-271,0
		Maïs	0	-143,0	-149,0	-238,0
		Blé	0	44,0	32,0	38,0
		TOTAL		-246,6	-277,6	-625,6
	Témoin fertilisé	Colza	150	-84,6	-75,6	-175,6
		Blé	170	-160,0	-131,0	-304,0
		Maïs	130	-142,0	-175,0	-224,0
		Blé	190	41,0	38,0	-8,0
		TOTAL		-345,6	-343,6	-711,6

En effet, les pertes d'azote organique des sols sont importantes dans le sol à teneur en Norg importante et varient entre **-626 kgNorg/ha et -712 kgNorg/ha sur la succession.** La diminution du stock du Norg dans le sol pauvre en MO varie entre -247 kgNorg/ha et -278 kgNorg/ha dans le cas des témoins non fertilisés et entre -344 kgNorg/ha et -346 kgNorg/ha dans le cas des témoins fertilisés.
La fertilisation azotée permet d'avoir des quantités de résidus de culture plus importantes certes, mais permet également d'avoir des niveaux de rendements plus importants et donc des exportations d'azote organique importantes, ce qui explique les pertes plus importantes d'azote organique dans les traitements fertilisés par rapport aux témoins non fertilisés.

Exporter les résidus de culture du blé a ainsi un effet négatif sur l'entretien des teneurs en Norg du sol. Cet effet est peu important en termes de quantités. La différence de Norg perdue varie entre -2 kgNorg/ha et 32 kgNorg/ha. La fertilisation minérale a tendance à réduire l'écart des pertes d'azote organique entre le traitement où on exporte les résidus de récolte du blé et le scénario avec enfouissement total des résidus de culture. Cette observation peut être expliquée par le fait que, moins nous incorporons de résidus de récolte, dans les conditions d'un sol pauvre en MO, et plus les rendements sont faibles, de même que les quantités de Norg exportées de la parcelle sous forme de grains. Ces quantités sont moins importantes que dans le traitement avec enfouissement total des résidus ce qui réduirait l'écart de quantités de Norg entre un traitement avec ou sans exportation des résidus de culture de blé. Ceci est d'autant plus vrai dans le cas du témoin fertilisé.
Le bilan organique est négatif sur les trois premières cultures. Par contre, ce bilan est positif sur la dernière culture de blé. En effet, d'après les résultats (voir Annexe 5.1), on remarque que les quantités de Norg restituées au sol par l'enfouissement des résidus de récolte du maïs sont très importantes (variation entre 108 kgNorg/ha et 180 kgNorg/ha) ce qui permet un entretien correct des teneurs en Norg dans le sol, en sachant que les quantités de Norg minéralisées de l'humus du sol sont de l'ordre de 100 kgN/ha.
Nous avons ainsi analysé nos situations quant à la fertilisation azotée. Nous avons pu constater dans cette partie, que les rendements simulés des traitements témoins sont assez proches pour les trois premières cultures (colza, blé de colza et maïs). Par contre les rendements sont sous-estimés pour le blé de maïs. Suite à ces résultats, il faudra tenir compte de ces différences dans l'interprétation des résultats des scénarios avec utilisation de PRO. Les teneurs fortes en matière organique initiale du sol permettent d'obtenir des rendements supérieurs par rapport au sol ayant une teneur en N organique faible.
Il existe peu d'effet sur les rendements et le bilan azoté organique de la pratique d'exportation des résidus de blés.
Nous pouvons maintenant passer aux résultats des scénarios de substitution sur ces situations retenues.

5.4. Scénarios de substitution

Nous analyserons sur les situations retenues les scénarios avec PRO fertilisants (5.4.1) puis celles avec PRO amendants (5.4.2) puis celles des PRO amendants et fertilisants (5.4.3).

5.4.1 - Scénarios de substitution des engrais azotés via l'utilisation de PRO fertilisants

Comme indiqué précédemment, nous commençons par présenter les résultats des scénarios de PRO fertilisants en sol pauvre en Norg avec enfouissement des résidus de blés (5.4.1.1) puis (5.4.1.2) la même situation sur un sol riche en Norg, enfin (5.4.1.3) L'analyse de ces scénarios avec PRO fertilisants du point de vue des bilans P et K sera alors menée.

5.4.1.1 Scénarios d'utilisation de PRO fertilisants : sol pauvre en MO avec enfouissement des résidus de blé

L'intégralité des résultats de simulation (rendements, quantités de N absorbées par les cultures, CAU et Keq, quantités de N lixiviées et volatilisées et bilan Norg) sont disponibles à l'Annexe 5.1. Cette situation (sol pauvre en MO + Cipan + enfouissement des résidus de récolte) est la plus répandue sur le territoire. De plus, l'implantation de Cipan est obligatoire et les résidus de culture sont enfouis chez la plupart des agriculteurs enquêtés.

- Estimation des rendements :

Tous les PRO fertilisants testés permettent d'avoir dans cette situation des niveaux de rendements proches du témoin fertilisé simulé (Figure 5.10, Tableau 5.15). Les rendements simulés de la culture de maïs sont similaires pour les 2 PRO fertilisants. En revanche, des différences entre PRO fertilisants apparaissent pour le colza et les 2 blés.

*Dans le cas de la boue, les rendements du colza et premier blé sont similaires au témoin fertilisé, mais le rendement du second blé est supérieur à celui de ce témoin.
Si on considère que les niveaux de rendements observés chez les agriculteurs sont équivalents au traitement témoin fertilisé, on remarquera que **les traitements avec épandage de boues permettent de maintenir les niveaux de rendement**. On pourrait ainsi se passer complètement des engrais azotés, ou les limiter fortement, en conservant voire améliorant les niveaux de production, à condition de faire les épandages au bon moment afin de correspondre aux besoins maximaux des cultures et ainsi limiter les pertes environnementales.
*Humival permet également d'obtenir des bons niveaux de rendements. Même si les rendements simulés du colza et des 2 blés sont diminués de 14,7% pour le colza, 17,0% pour le blé de colza et 16,0% pour le blé de maïs par rapport au témoin fertilisé.

Dans ce cas, les Keq calculés (Voir Annexe 5.1) sont en adéquation avec les observations faites sur les rendements simulés. Les coefficients calculés varient entre 0.6 et 1 pour la boue, ce qui signifie que le niveau de substitution des engrais par rapport au témoin fertilisé est très important. Les Keq sont plus faibles pour le traitement Humival (0,2 à 0,6), ce qui signifie qu'une complémentation en engrais minéral azoté pourrait être nécessaire. Pourtant les doses d'apport de ces 2 PRO fertilisants correspondant à des apports totaux de 170 kg N/ha apportent également des quantités équivalentes de N facilement disponibles (85 kg N/ha environ, tableau 5.3). Une partie du N plus récalcitrant est également valorisé par les cultures de façon plus importante dans le cas de la boue.

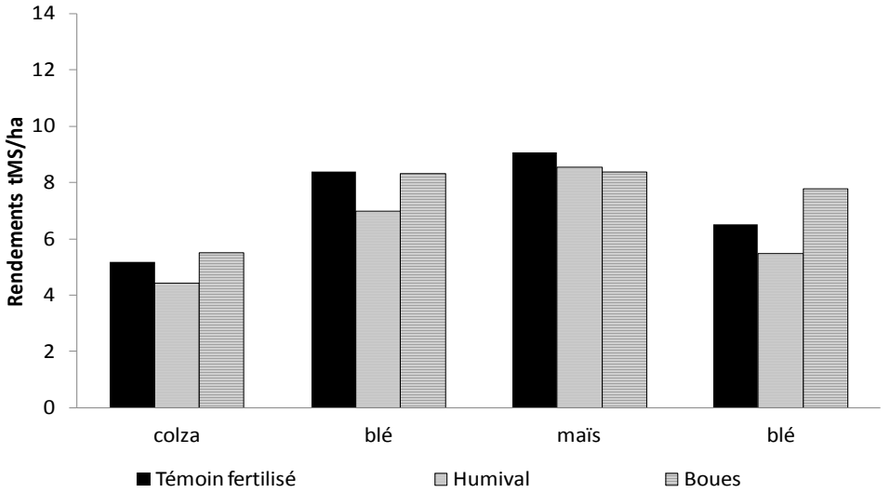


Figure 5.10: Rendements simulés des scénarios d'utilisation de PRO fertilisants **sur un sol pauvre en MO**

Tableau 5.15: Rendements simulés, quantités de N absorbées des plantes et Keq calculés des différents scénarios avec utilisation de PRO fertilisants de la succession de culture Colza/Blé/Maïs/Blé **sur un sol pauvre en MO**

				Norg = 0,088 %	
	Ntot apporté (kgN/ha)	Culture	Rendements tMS/ha	Qt N absorbées par les cultures kgN/ha	Keq calculé
Humival	170	Colza	4,42	199	0,3
	170	Blé	6,96	156	0,5
	170	Maïs	8,53	263	0,7
	170	Blé	5,47	138	0,8
Boues séchées	170	Colza	5,51	248	0,8
	170	Blé	8,3	177	0,6
	170	Maïs	8,36	258	0,6
	170	Blé	7,76	178	1,0

Si on ne se base que sur les rendements simulés, on **peut conclure qu'il est possible de substituer sur cette succession et dans ce type de sol, les engrais azotés par des PRO fertilisants**. Les boues sont les PRO qui permettent d'avoir les meilleurs niveaux de rendement par rapport à un témoin fertilisé avec de l'engrais minéral, Humival serait moins efficace et une complémentation azotée sur toutes les cultures serait dans ce cas nécessaire pour maintenir des niveaux de rendements équivalents aux rendements obtenus sur le témoin.

- Estimation des quantités de N lixiviées :

Les pertes de N simulées sont très faibles pour les 2 premières cultures de la succession (Figure 5.11, Tableau 5.16). Les quantités de N lixiviées les plus importantes sont simulées pour la culture de maïs. En effet, comme décrit précédemment sur les traitements « témoin fertilisé », un stock important d'azote minéral dans le sol est simulé après enfouissement du Cipan. Cette quantité importante est essentiellement trouvée à une profondeur supérieure à 60cm. Ces fortes quantités proviennent de la minéralisation de l'humus du sol, des résidus de culture et des PRO, et sont importantes puisque la durée de simulation des cultures du blé de colza et du Cipan réunies est longue et va de Juillet de l'année n-1 jusqu'au mois de Janvier de l'année n+1. Ces quantités importantes d'azote minéral dans le sol en début de simulation de la culture de maïs se trouvent facilement lixiviables entre le mois de

Janvier et de Mai, le maïs étant absent ou en période juvénile durant cette période et ne parvenant pas à absorber ce N minéral présent dans le sol. Ces pertes par lixiviation sont plus importantes dans les scénarios incluant Humival. En effet, les rendements simulés (cf paragraphe ci-dessus) dans le cas d'épandage de ce produit sont plus faibles. Il est fort probable que la dynamique de minéralisation du N d'Humival coïncide moins bien avec la dynamique des besoins des cultures.
Les quantités de N lixiviées des différents scénarios avec apport de PRO fertilisant sont légèrement plus importantes que les quantités lixiviées du traitement témoin fertilisé. L'écart à l'échelle de la succession de culture varie entre 2 kgN/ha (boues séchées) et 18 kgN/ha (Humival) par rapport au témoin fertilisé.

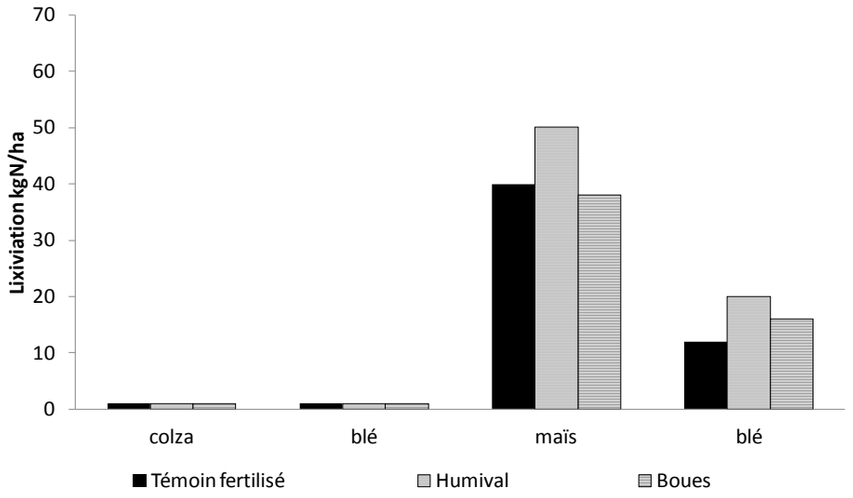


Figure 5.11: Quantités de N lixiviées des scénarios d'utilisation de PRO fertilisants **sur un sol pauvre en MO**

Tableau 5.16: Quantités d'azote lixiviées et volatilisées des différents scénarios avec utilisation de PRO fertilisants de la succession de culture Colza/Blé/Maïs/Blé **sur un sol pauvre en MO**

			Norg = 0,088 %	
	Norg apporté (kgNorg/ha)	Culture	Qt N lixiviées kgN/ha	Qt N volatilisées kgN/ha
Humival	170	Colza	1	0
	170	Blé	1	0
	170	Maïs	50	2
	170	Blé	20	0
Boues séchées	170	Colza	1	1
	170	Blé	1	1
	170	Maïs	38	6
	170	Blé	16	1

- Bilan Norg :

Pour toutes les situations, le bilan global en Norg est légèrement positif (Figure 5.12, Tableau 5.17) avec un bilan légèrement supérieur pour Humival (+42,4 Norg/ha) par rapport à la Boue (+16,4 kgNorg/ha). Ce résultat concorde bien avec les ISMO calculés. On retrouve alors la hiérarchie suivante : Humival (ISMO = 52,1) > Boues séchées (ISMO = 26,1).

Les gains en MO les plus importants sont à l'issue de la culture de blé de maïs et sont de 114 kg Norg/ha (Boues séchées) et 131 kg Norg/ha (Humival), ceci étant dû à la restitution d'une quantité importante de résidus de maïs (voir Annexe 5.1).

En revanche, les pertes les plus importantes en Norg sont à l'issue de la culture de maïs, avec -76 kg Norg/ha (Boue séchée) et -82 kg Norg/ha (Humival).
Dans ce cas de sol à Norg initial faible avec enfouissement des résidus et présence de Cipan, on obtient de bons rendements qui peuvent même dépasser les niveaux de rendements obtenus sur un témoin fertilisé et des quantités relativement faibles d'azote lixiviées par rapport au témoin fertilisé : on arrive en outre à avoir une augmentation des teneurs en Norg du sol, faible, mais qui reste significative pour l'entretien de la fertilité des sols.
Si on compare ces résultats par rapport au bilan organique du témoin fertilisé, on constate qu'avec apport de ces PRO les quantités de Norg gagnées sur la succession représentent 368 kgNorg/ha pour le traitement avec épandage de boue et 394 kgNorg/ha pour le traitement Humival.

Après analyse de ces résultats, on peut conclure que **la substitution des engrais par l'épandage annuel des PRO fertilisants est réalisable et intéressante dans cette situation au moins.** Les boues sont les PRO les plus efficaces et permettent à la fois un bon entretien des rendements, des niveaux de lixiviation faibles et une certaine augmentation des teneurs en MO des sols. Humival est également un bon produit quant au maintien des niveaux de rendements et du bilan organique ainsi que des niveaux de lixiviation qui restent acceptables.

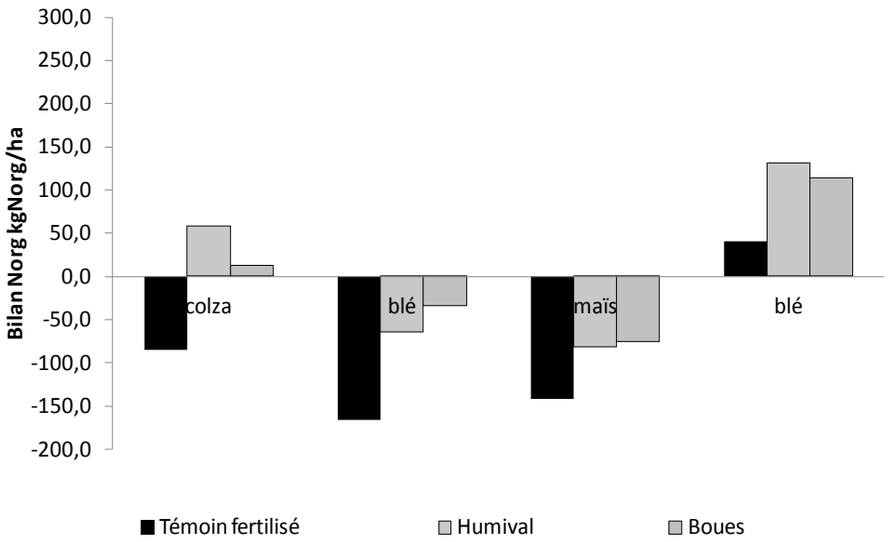


Figure 5.12: Bilan Norg des scénarios d'utilisation de PRO fertilisants **sur un sol pauvre en MO**

Tableau 5.17: Bilan d'azote organique des différents scénarios avec utilisation de PRO fertilisants de la succession de culture Colza/Blé/Maïs/Blé **sur un sol pauvre en MO**

			Norg = 0,088 %
	Norg apporté (kgNorg/ha)	Culture	Bilan Norg (kgNorg/ha)
Humival	170	Colza	58,4
	170	Blé	-65,0
	170	Maïs	-82,0
	170	Blé	131,0
TOTAL			42,4
Boues séchées	170	Colza	12,4
	170	Blé	-34,0
	170	Maïs	-76,0
	170	Blé	114,0
TOTAL			16,4

5.4.1.2 Scénarios d'utilisation de PRO fertilisants : sol riche en MO avec enfouissement des résidus de blé

Nous voulons tester ici l'effet d'apport du PRO fertilisant le plus efficace en termes de rendements des cultures, la boue séchée, sur un sol riche en Norg. Nous avons montré ci-dessus, que les boues séchées permettent d'obtenir des niveaux de rendements très intéressants, des niveaux de lixiviation faibles par rapport au témoin fertilisé et l'entretien des teneurs en Norg du sol quand celui-ci est bas. Qu'en est-il pour un sol à Norg plus élevé ?

- Estimation des rendements :

D'après la figure 5.13 et le tableau 5.18, on remarque que l'utilisation des boues permet également d'obtenir des rendements très proches du témoin fertilisé sur toutes les cultures et ces rendements peuvent même être supérieurs sur les deux cultures de blé.

Les Keq calculés (Voir Annexe 5.1) sont de 0.6 pour le premier blé et pour le colza et de 1 pour le second blé. Pour le maïs, le calcul du Keq est trompeur (Keq=0.2). En effet, l'azote apporté par la boue est mal valorisé, tout comme c'était le cas dans le témoin fertilisé. En fait, les courbes de réponse à l'azote nous ont montré que dans le sol riche en Norg, l'apport d'engrais minéral n'a aucun effet sur le rendement et que l'exportation de N par le maïs atteint très rapidement son maximum. L'azote de la boue est donc aussi peu nécessaire que celui de l'engrais minéral. La fertilisation du maïs serait inutile dans un sol riche en Norg.

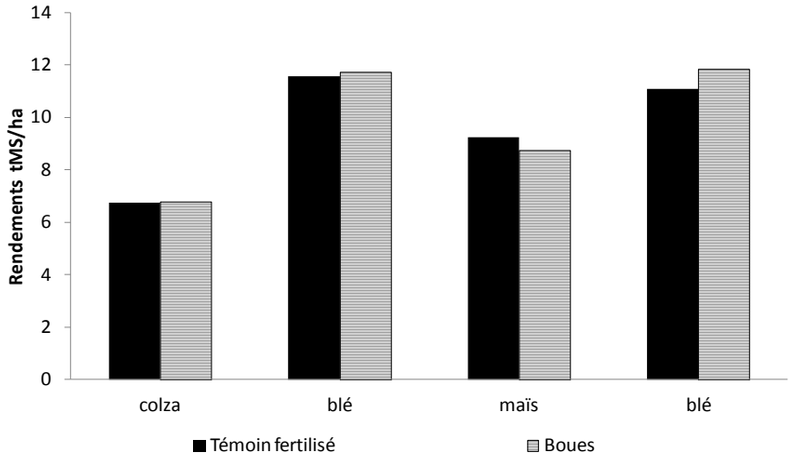


Figure 5.13 : Rendements simulés du scénario d'utilisation de boues séchées **sur un sol riche en MO**

Tableau 5.18: Rendements simulés, quantités de N absorbées des plantes et Keq calculés des différents scénarios avec utilisation de PRO fertilisants de la succession de culture Colza/Blé/Maïs/Blé **sur un sol riche en MO**

				Norg = 0,17 %	
	Norg apporté (kgNorg/ha)	Culture	Rendements tMS/ha	Qt N absorbées par les cultures kgN/ha	Keq calculé
Boues séchées	170	Colza	6,76	346	0,6
	170	Blé	11,72	265	0,6
	170	Maïs	8,73	275	0,0
	170	Blé	11,83	299	1,0

Si on se base sur seuls rendements simulés, on **peut conclure qu'il est possible de substituer les engrais azotés par l'utilisation unique de Boues séchées** dans un sol à Norg haut

- Estimation des quantités de N lixiviées :

Les pertes de N simulées sont très faibles pour les 2 premières saisons culturales (Figure 5.14, Tableau 5.19). Les quantités de N lixiviées les plus importantes sont simulées pour la culture de maïs, ce qui confirme les observations précédentes.
Les quantités de N lixiviées du scénario d'utilisation de boues séchées sur un sol riche en MO sont similaires à celles du témoin fertilisé. L'écart entre les quantités de N lixiviées dans le traitement avec boues séchées à l'échelle de la succession de culture est de 1 kgN/ha par rapport aux quantités de N lixiviées du témoin.

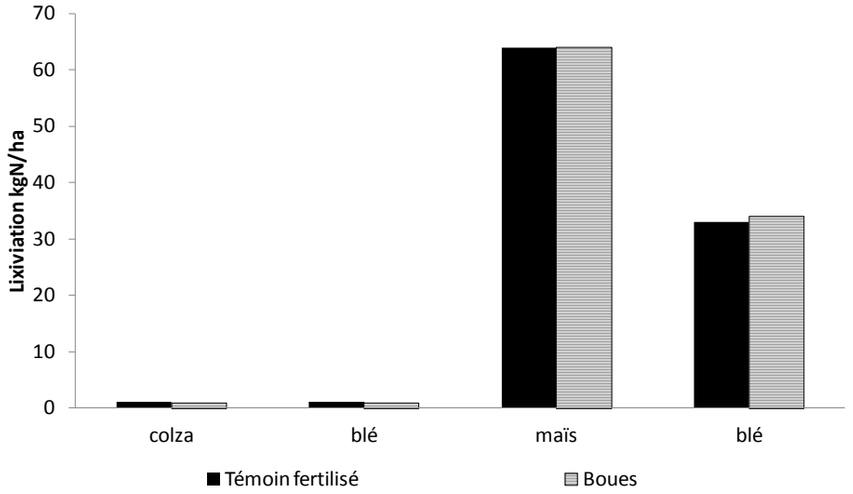


Figure 5.14: Quantités de N lixiviées du scénario d'utilisation de boues séchées **sur un sol riche en MO**

Tableau 5.19: Quantités d'azote lixiviées et volatilisées des différents scénarios avec utilisation de PRO fertilisants de la succession de culture Colza/Blé/Maïs/Blé **sur un sol riche en MO**

				Norg = 0,17 %
	Norg apporté (kgNorg/ha)	Culture	Qt N lixiviées kgN/ha	Qt N volatilisées kgN/ha
Boues séchées	170	Colza	1	1
	170	Blé	1	1
	170	Maïs	64	6
	170	Blé	34	1

- Bilan Norg :

Pour les deux situations (témoin et traitement avec épandage de boues séchées), le bilan global en Norg est largement négatif (Figure 5.15, Tableau 5.20).
Ce bilan est de -349 kg Norg/ha dans le cas d'apports répétés de boues et de -712 kg Norg/ha dans le témoin. Ces quantités sont importantes et l'épandage de boues ne peut, à lui seul, entretenir de manière efficace les teneurs en MO des sols. Mais l'épandage de boues permet de réduire de 51% les pertes en Norg par rapport au témoin fertilisé.
Dans ce cas de sol à Norg initial riche avec enfouissement des résidus et présence de Cipan, outre l'obtention de bons rendements qui peuvent même dépasser les niveaux de rendements obtenus sur un témoin fertilisé et les quantités très faibles d'azote lixiviées par rapport au témoin fertilisé, on arrive à avoir un niveau d'entretien meilleur du Norg dans le sol par rapport au témoin fertilisé malgré un bilan global nettement négatif.

Après analyse de ces résultats, on peut conclure que **la substitution des engrais *via* l'épandage fréquent des PRO fertilisants est intéressante dans cette situation au moins, bien que ne permettant pas le maintien d'un niveau élevé de MO**.

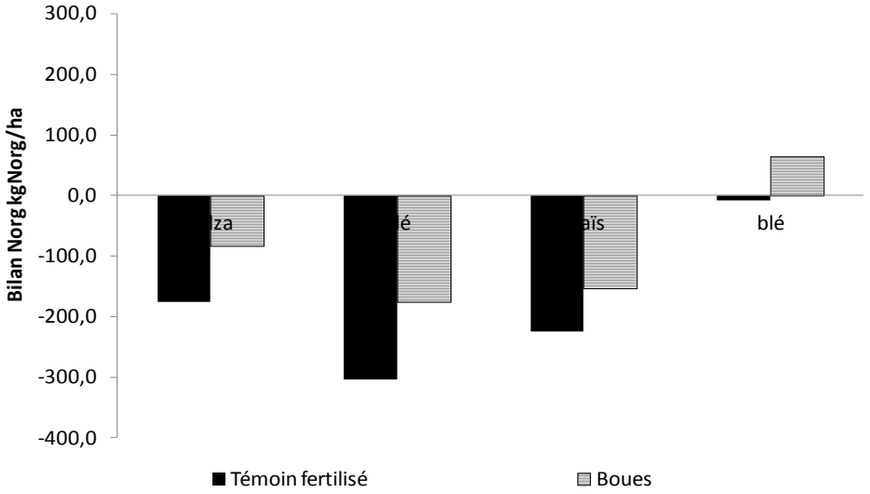


Figure 5.15: Bilan Norg du scénario d'utilisation de boues séchées **sur un sol riche en MO**

Tableau 5.20: Bilan d'azote organique des différents scénarios avec utilisation de PRO fertilisants de la succession de culture Colza/Blé/Maïs/Blé **sur un sol riche en MO**

			Norg = 0,17 %
	Norg apporté (kgNorg/ha)	Culture	Bilan Norg (kgNorg/ha)
Boues séchées	170	Colza	-83,6
	170	Blé	-176,0
	170	Maïs	-153,0
	170	Blé	64,0
TOTAL			-348,6

5.4.1.3 <u>Bilan P et K des scénarios de PRO fertilisants</u>

Un calcul des flux de N, P_2O_5 et de K_2O apportés via les apports de PRO fertilisants a été effectué. Les résultats sont présentés dans le tableau 5.21.

Tableau 5.21: Quantités totales d'azote, de phosphore et potassium apportées suite à l'épandage de PRO fertilisants à l'échelle de la succession de culture

type de PRO	N kg/ha	P_2O_5 kg/ha	K_2O kg/ha
Humival	680	595,0	183,1
Boues séchées	680	478,4	110,9

Dans tous les scénarios précédemment décrits, on rappelle que les apports de PRO sont faits tous les ans à hauteur de 170 kgN total par hectare, dans le but de se substituer aux engrais minéraux azotés. Les quantités de P_2O_5 et de K_2O apportées varient de façon importante selon les PRO épandus.
Les quantités de P_2O_5 à l'échelle de la succession de culture sont de 478 kg/ha pour la Boue séchée et de 595 kg/ha pour Humival.
Selon la fiche COMIFER (2007), les exportations des cultures sont exprimées dans le tableau 5.22.

Tableau 5.22: Exportations des cultures en phosphore et potassium en fonction des rendements obtenus

	Culture	Rendements moyens sur les deux types de sols riches et pauvres en Norg (100%MS) Qx/ha	Exportations cultures en P_2O_5 kg/ha	Exportations cultures en K_2O kg/ha
Epandage de Humival	Colza	44,2	61,3	41,7
	Blé de colza	69,6	52,0	40,0
	Maïs	85,3	58,9	54,0
	Blé de maïs	54,7	40,9	31,5
	TOTAL		213,1	167,1
Epandage de Boues séchées	Colza	61,4	85,1	57,9
	Blé de colza	100,1	74,8	57,6
	Maïs	85,5	59,0	54,0
	Blé de maïs	98,0	73,2	56,3
	TOTAL		292,1	225,8

Les quantités de phosphore apportées par Humival sont 2,8 fois plus importantes que les exportations des cultures en place, ce qui représente *un risque important de saturation du sol et donc de lixiviation et érosion qui pourrait conduire à l'eutrophisation des nappes souterraines et eaux superficielles*. La boue représente un risque légèrement plus faible d'eutrophisation mais qui reste élevé à l'échelle d'une succession.
Les quantités de K_2O apportées sont relativement faibles dans le cas des boues séchées et sont 2 fois moins importantes que les besoins des cultures. Il faudra envisager un apport supplémentaire important d'engrais potassiques afin de répondre aux besoins des cultures. Pour le cas d'épandage d'Humival, les flux de potassium répondent aux besoins des cultures.
Pour tous ces scénarios, les boues d'épuration sont les PRO dont le risque de lixiviation est le moins important, qui permettent des rendements les plus proches voire supérieurs aux situations témoin agriculteur. Le produit Humival reste un PRO intéressant à utiliser moyennant complémentations minérales.

5.4.2 Scénarios de substitution des engrais azotés via l'utilisation de PRO amendants

On rappelle qu'on a retenu comme PRO amendants le fumier de cheval pailleux composté ou non composté et le compost de déchets verts de Versailles. Nous allons effectuer un bilan agro-environnemental de l'épandage répété de ces 3 PRO sélectionnés dans des conditions d'implantation de Cipan et d'enfouissement des résidus de culture. Dans le sol à niveau bas de Norg, nous allons également tester l'impact de l'exportation des résidus de blés avec enfouissement de composts de fumiers de chevaux. Cette situation existe bel et bien dans la réalité (échange paille-fumier) et nous faisons cette simulation afin d'étudier l'impact de cet échange sur les teneurs en Norg du sol. En revanche dans les sols à Norg élevé, nous ne testerons pas l'effet de l'exportation des résidus de culture sur un sol riche parce qu'il est important d'enfouir ces résidus afin de permettre au mieux l'entretien des teneurs en Norg du sol.
Nous nous intéresserons particulièrement aux bilans de Norg sur les deux sols, riches et pauvres en MO, avec implantation de Cipan afin de répondre aux deux questions suivantes : peut-on maintenir les niveaux de Norg dans le sol riche en MO en utilisant les PRO amendants ? Quel est le potentiel de ces PRO amendants à augmenter les teneurs en MO du sol pauvre ?
Nous nous intéresserons également aux niveaux de rendements obtenus ainsi qu'aux quantités de N lixiviées. Par contre, nous les commenterons brièvement puisqu'il est évident que les niveaux de rendements seront faibles du

fait que l'épandage de seuls PRO amendants ne permet pas d'avoir des quantités de N disponibles suffisantes pour les cultures.

5.4.2.1 Scénarios d'utilisation de PRO amendants : sol pauvre en MO avec ou sans exportation des résidus de blé

- Estimation des rendements :

La figure 5.16 et le Tableau 5.23 représentent les rendements en cas d'épandages répétés de PRO amendants sur un sol riche en MO. *Les rendements de toutes les cultures sont faibles par rapport au traitement témoin fertilisé*. Les rendements simulés pour les deux cultures de blé sont particulièrement faibles par rapport à ce témoin fertilisé.
L'écart en rendements sur le blé de colza varie entre -3,7 tMS/ha (Compost de fumier de chevaux) et -4,7 TMS/ha (Fumier de chevaux pailleux). L'écart simulé entre les rendements sur la culture de blé de maïs, varie quant à lui, entre -4,0 tMS/ha (Fumier de chevaux pailleux) et -4,2 tMS/ha (Compost de déchets verts). Sur colza, l'écart est relativement moins important mais reste élevé, puisqu'il varie entre -1,2 tMS/ha (Compost de fumier de chevaux) et -2,2 TMS/ha (Fumier de chevaux pailleux). En ce qui concerne la culture de maïs, les écarts sont également moins importants tout en restant élevés et varient entre -1,2 tMS/ha (Compost de fumier de chevaux) et -2,0 tMS/ha (Fumier de chevaux pailleux). Cet écart moins important sur la culture de maïs est expliqué par le fait que, même s'il existe des périodes d'immobilisation de l'azote, ces périodes seront déjà passées lors du semis du maïs, et cette culture ne souffrira pas autant de « faim d'azote » que les autres cultures d'hiver. Par ailleurs on a vu dans l'analyse des courbes de réponse à l'azote que, dans le sol riche en Norg, les rendements du maïs répondent très peu à l'engrais.
Ces résultats de simulation conduisent à des valeurs de Keq très faibles voir nulles ou mêmes négatifs (Annexe 5.1) qui ne dépassent pas, dans le meilleur des cas la valeur de 0,1.

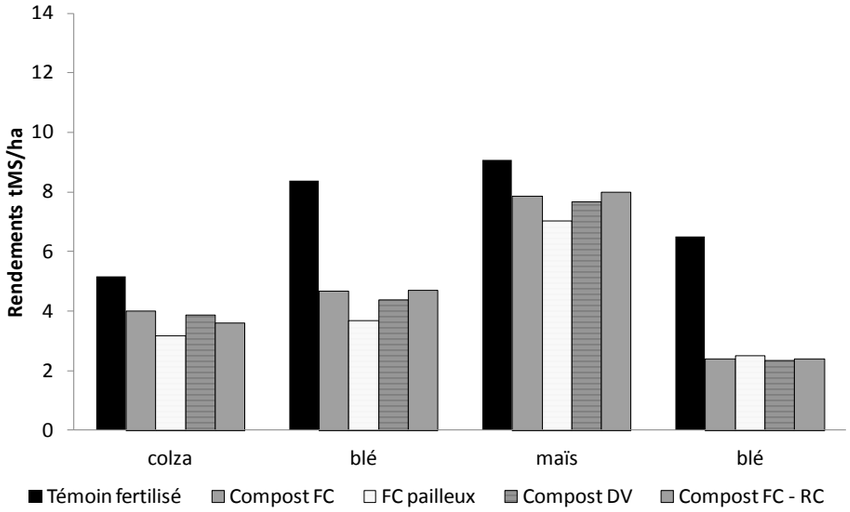


Figure 5.16: Rendements simulés des scénarios d'utilisation de PRO amendants **sur un sol pauvre en MO** avec ou sans exportation des résidus de blé. Compost FC : Compost de fumier de chevaux, FC pailleux : fumier de chevaux pailleux, Compost DV : Compost de déchets verts de Versailles, Compost FC – RC : Compost de fumier de chevaux avec exportation des résidus de culture de blé.

Tableau 5.23: Rendements simulés, quantités de N absorbées des plantes et Keq calculés des différents scénarios avec utilisation de PRO amendants de la succession Colza/Blé/Mais/Blé **sur un sol pauvre en MO**

				Norg = 0,088 %	
			Résidus enfouis		
	Norg apporté (kgNorg/ha)	Culture	Rendement tMS/ha	N absorbé par les cultures kgN/ha	Keq calculé
Compost de fumier de chevaux	170	Colza	4,0	174	0,1
	170	Blé	4,67	104	0,1
	170	Maïs	7,86	185	0,1
	170	Blé	2,4	41	0,0
Fumier de chevaux pailleux	170	Colza	3,16	138	-0,2
	170	Blé	3,67	75	-0,1
	170	Maïs	7,03	158	-0,1
	170	Blé	2,51	43	0,0
Compost de déchets verts	170	Colza	3,87	167	0,0
	170	Blé	4,36	94	0,0
	170	Maïs	7,68	178	0,0
	170	Blé	2,35	45	0,1

On ne constate pas d'effet important de l'exportation des résidus de blé sur les rendements et les écarts des rendements obtenus avec épandage de compost de fumiers de chevaux avec ou sans exportation des résidus de blé sont très faibles.
Les rendements simulés sur un sol pauvre en MO avec Cipan sont très faibles (Figure 5.16). Une complémentation minérale azotée est indispensable si on veut maintenir des niveaux de rendements intéressants.

- Estimation des quantités de N lixiviées :

Les niveaux de lixiviation d'azote des différents traitements avec épandage de PRO amendants sur un sol pauvre en Norg sont plus élevés que sur témoin fertilisé (Figure 5.17, Tableau 5.24). Cette observation reste logique puisque les apports répétés de ces PRO augmenteraient potentiellement les teneurs en Norg dans le sol et donc, des quantités de N disponible *via* la minéralisation du Norg du sol seraient plus importantes que dans le témoin fertilisé. De plus, malgré les faibles quantités de N disponible de ces PRO lors de leur épandage, ces quantités restent potentiellement lixiviables durant la période hivernale.
Les quantités de N lixiviées à l'échelle de la succession de culture, malgré la présence de Cipan varient entre 62 kgN/ha (Fumier de chevaux pailleux) et 69 kgN/ha (Compost de fumier de chevaux). L'écart entre les quantités de N lixiviées des différents scénarios et le témoin varient entre 8 kgN/ha (Fumier de chevaux pailleux) et 15 kgN/ha (Compost de fumier de chevaux). L'exportation de résidus de culture a permis dans le cas que nous étudions, une baisse des quantités de N lixiviées de 5kgN/ha entre le traitement avec et sans exportation des résidus de blé (scénarios incluant le compost de fumier de chevaux). Cette baisse n'est pas très conséquente mais reste quand même intéressante quant à la préservation des nappes phréatiques contre la pollution des nitrates.

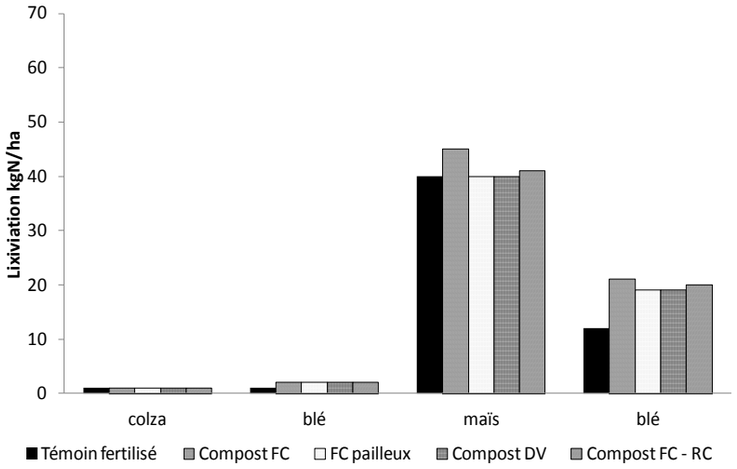


Figure 5.17: Quantités de N lixiviées des scénarios d'utilisation de PRO amendants **sur un sol pauvre en MO** avec ou sans exportation des résidus de blé. Compost FC : Compost de fumier de chevaux, FC pailleux : fumier de chevaux pailleux, Compost DV : Compost de déchets verts de Versailles, Compost FC – RC : Compost de fumier de chevaux avec exportation des résidus de culture de blé.

Tableau 5.24: Quantités d'azote lixiviées et volatilisées des différents scénarios avec utilisation de PRO amendants de la succession de culture Colza/Blé/Maïs/Blé **sur un sol pauvre en MO**

			Norg = 0,088 %			
			Résidus enfouis		Résidus de blés exportés	
	Norg apporté (kgNorg/ha)	Culture	Qt N lixiviées kgN/ha	Qt N volatilisées kgN/ha	Qt N lixiviées kgN/ha	Qt N volatilisées kgN/ha
Compost de fumier de chevaux	170	Colza	1	1	1	1
	170	Blé	2	1	2	1
	170	Maïs	45	1	41	1
	170	Blé	21	1	20	1
Fumier de chevaux pailleux	170	Colza	1	0	-	-
	170	Blé	2	0	-	-
	170	Maïs	40	0	-	-
	170	Blé	19	0	-	-
Compost de déchets verts	170	Colza	1	2	-	-
	170	Blé	2	1	-	-
	170	Maïs	40	3	-	-
	170	Blé	19	1	-	-

- Bilan Norg :

Pour toutes les situations avec épandage de PRO amendants, le bilan global en Norg est positif (Figure 5.18, Tableau 5.25) et varie entre 252 kg Norg/ha (Compost de fumier de chevaux avec exportation des résidus de blé) et 388 kg Norg/ha (Fumier de chevaux pailleux). *Les fumiers de chevaux sont les PRO qui entretiennent le plus les teneurs en matières organiques des sols*. Par contre, le compost de fumier de chevaux est le PRO qui maintient le moins ces teneurs, comparativement aux autres PRO.

Ce résultat sur l'entretien organique des sols en faveur des fumiers de chevaux pailleux est *a priori* étonnant. L'explication à ce constat est que nous avons additionné systématiquement les quantités de Norg des résidus restants dans le sol et les quantités de Norg dans la biomasse microbienne. De ce fait, étant le seul PRO parmi les PRO testés ayant une immobilisation importante tout au long de sa dégradation, le fumier de chevaux pailleux permet d'accumuler des quantités considérables d'azote minéral réorganisées dans la biomasse microbienne. La somme des quantités de N non minéralisées dans la biomasse et les résidus est donc importante et dépasse les quantités de Norg restituées par les deux autres PRO.
Ce résultat concorde avec les valeurs d'ISMO calculées, à une exception près, le fumier de chevaux pailleux qui restitue plus d'azote organique que les deux autres PRO, alors que son ISMO calculé est inférieur aux deux autres PRO (Voir Chapitre 3). On retrouve la hiérarchie suivante pour l'entretien organique des sols : Fumier de chevaux pailleux > Compost de déchets verts > Compost de fumier de chevaux > Compost de fumier de chevaux avec exportation des résidus de blé.
Si on compare ces résultats au bilan organique du témoin, *on constate que l'apport de PRO amendants permet un entretien très important des teneurs en MO des sols par rapport à une parcelle témoin*. Les gains en MO des traitements avec épandage de PRO par rapport au témoin fertilisé varient entre 603 kgNorg/ha (Compost de fumier de chevaux avec exportation des résidus de blé) et 740 kgNorg/ha (Fumier de chevaux pailleux).

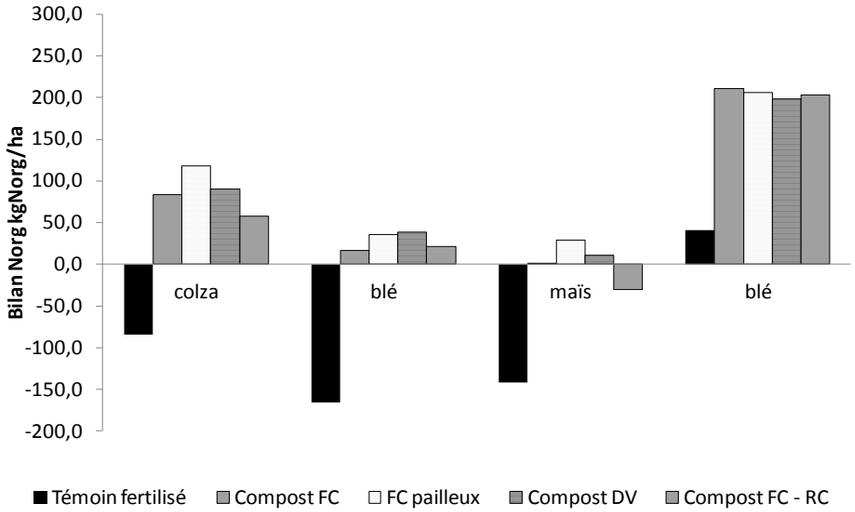


Figure 5.18: Bilan Norg des scénarios d'utilisation de PRO amendants **sur un sol pauvre en MO**, avec cipan

Tableau 5.25: Bilan d'azote organique des différents scénarios avec utilisation de PRO amendants de la succession de culture Colza/Blé/Maïs/Blé **sur un sol pauvre en MO**

			Norg = 0 ,088 %	
			Résidus enfouis	Résidus de blés exportés
	Norg apporté (kgNorg/ha)	Culture	Bilan Norg (kgNorg/ha)	Bilan Norg (kgNorg/ha)
Compost de fumier de chevaux	170	Colza	83,4	57,5
	170	Blé	16,0	21,0
	170	Maïs	1,0	-30,0
	170	Blé	211,0	203,0
TOTAL			311,4	251,5
Fumier de chevaux pailleux	170	Colza	117,4	-
	170	Blé	36,0	-
	170	Maïs	29,0	-
	170	Blé	206,0	-
TOTAL			388,4	-
Compost de déchets verts	170	Colza	90,4	-
	170	Blé	38,0	-
	170	Maïs	11,0	-
	170	Blé	198,0	-
TOTAL			337,4	-

On conclut, d'après les résultats d'épandage de PRO amendants sur un sol pauvre en MO que la substitution des engrais par ces PRO est loin d'être efficace à court terme. Une complémentation azotée est indispensable sur toutes les cultures et notamment sur les blés.
Par contre, *l'utilisation de ces PRO est très intéressante quant au maintien et à l'augmentation des teneurs en MO des sols*. Les bilans d'azote organique sont largement positifs et permettent donc un entretien très important des teneurs en MO. Les fumiers de chevaux pailleux sont les PRO les plus intéressants quant à l'entretien et l'augmentation de ces teneurs en MO des sols. Le compost de fumier de chevaux est le produit le moins intéressant pour cet entretien organique.
On remarque également que les quantités de N volatilisées *via* les PRO sont très faibles (volatilisation variant entre 0 et 6kgN/ha ; voir Annexe 5.1) puisque les quantités de N initiales dans les PRO sont faibles.

5.4.2.2 - Scénarios d'utilisation de PRO amendants (cas du Compost de fumier de chevaux): sol riche en MO avec enfouissement des résidus de blé

Dans cette partie, nous allons nous intéresser à l'étude agro-environnementale de l'épandage répété de compost de fumiers de chevaux sur un sol riche en Norg. Nous avons effectué le choix de ce PRO puisqu'il existe un problème majeur d'évacuation des fumiers de chevaux des centres équestres sur le territoire mais aussi de leur valorisation en aval. Une des solutions envisageables est de concentrer les flux de fumiers sur une plateforme de compostage, qui sera chargée de la procédure de compostage. Une fois les fumiers compostés, leur valorisation locale sera simplifiée puisqu'il n'y aura qu'un seul fournisseur proche géographiquement des exploitations agricoles.

- Estimation des rendements :

La figure 5.19 et le tableau 5.26 présentent les rendements des cultures de la succession après épandages répétés de compost de fumier de chevaux sur un sol riche en MO. Les *rendements de toutes les cultures sont plus faibles que dans le témoin fertilisé*. Le rendement simulé est particulièrement faible pour le second blé de la succession.
L'écart en rendements sur le blé de colza est de -3,9 tMS/ha et de -8,45 tMS/ha pour blé de maïs. Sur colza et maïs, les écarts sont beaucoup moins importants (-1,1 tMS/ha pour le colza et -0,2 tMS/ha pour le maïs).
Ces simulations conduisent encore à des valeurs de Keq proches de 0 qui ne dépassent pas 0,2 dans le meilleur des cas (Annexe 5.1).

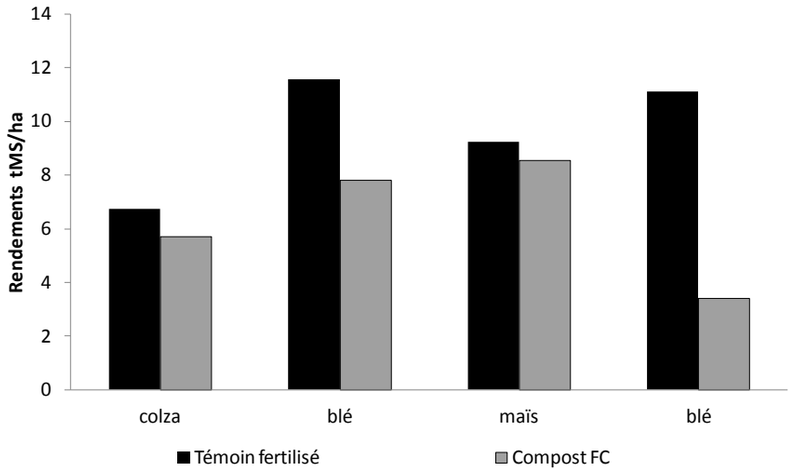


Figure 5.19: Rendements simulés des scénarios d'utilisation de PRO amendants **sur un sol riche en MO** avec ou sans exportation des résidus de blé. Compost FC : Compost de fumier de chevaux

Tableau 5.26: Rendements simulés, quantités de N absorbées des plantes et Keq calculés des différents scénarios avec utilisation de PRO amendants de la succession Colza/Blé/Mais/Blé **sur un sol riche en MO**

				Norg = 0,17 %		
				Résidus enfouis		
	Norg apporté (kgNorg/ha)	Culture	Rendement tMS/ha	Qt N absorbées par les cultures kgN/ha	Keq calculé
Compost de fumier de chevaux	170	Colza	5,68	265	0,2
	170	Blé	7,79	183	0,1
	170	Maïs	8,54	265	0,0
	170	Blé	3,38	113	0,1

- Estimation des quantités de N lixiviées :

Les niveaux de lixiviation d'azote avec épandage du compost de fumier de cheval sur un sol riche en Norg sont similaires à ceux du témoin fertilisé (Figure 5.20, Tableau 5.27). Les quantités de N lixiviées à l'échelle de la succession de culture, malgré la présence de Cipan est de 105kgN/ha, ce qui ne représente que 6 kgN/ha supplémentaires par rapport au témoin fertilisé. La quantité de N lixiviée diminue pour le maïs mais augmente pour le second blé.

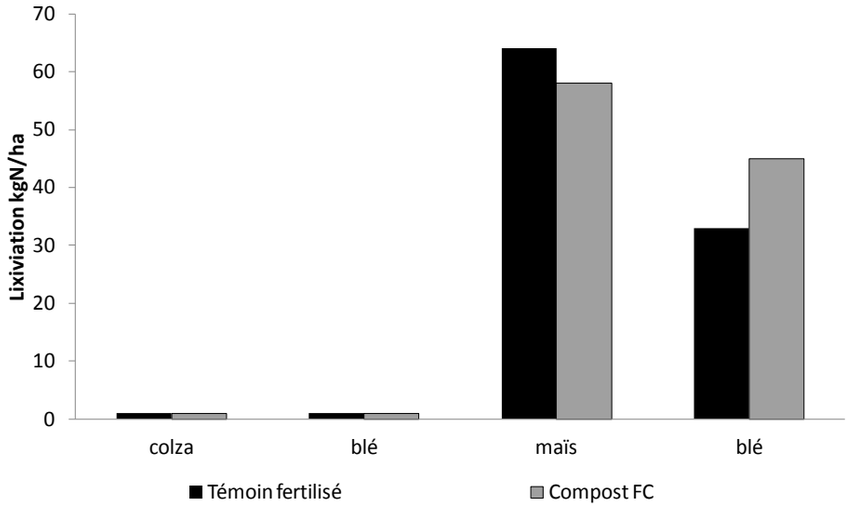


Figure 5.20: Quantités de N lixiviées des scénarios d'utilisation de PRO amendants **sur un sol riche en MO** avec ou sans exportation des résidus de blé. Compost FC : Compost de fumier de chevaux.

Tableau 5.27: Quantités d'azote lixiviées et volatilisées des différents scénarios avec utilisation de PRO amendants de la succession de culture Colza/Blé/Maïs/Blé **sur un sol riche en MO**

			Norg = 0,17 %	
			Résidus enfouis	
	Norg apporté (kgNorg/ha)	Culture	Qt N lixiviées kgN/ha	Qt N volatilisées kgN/ha
Compost de fumier de chevaux	170	Colza	1	1
	170	Blé	1	1
	170	Maïs	58	1
	170	Blé	45	1

- Bilan Norg :

Le bilan global en Norg suite à l'apport répété de compost de fumier de chevaux est légèrement négatif (Figure 5.21, Tableau 5.28) et est de -34,6 kgNorg/ha.
Le compost de fumier de chevaux permet quand même un entretien très important des teneurs en Norg du sol et diminue de 95% les pertes en Norg simulées sur un témoin fertilisé qui atteignent -712 kgNorg/ha.

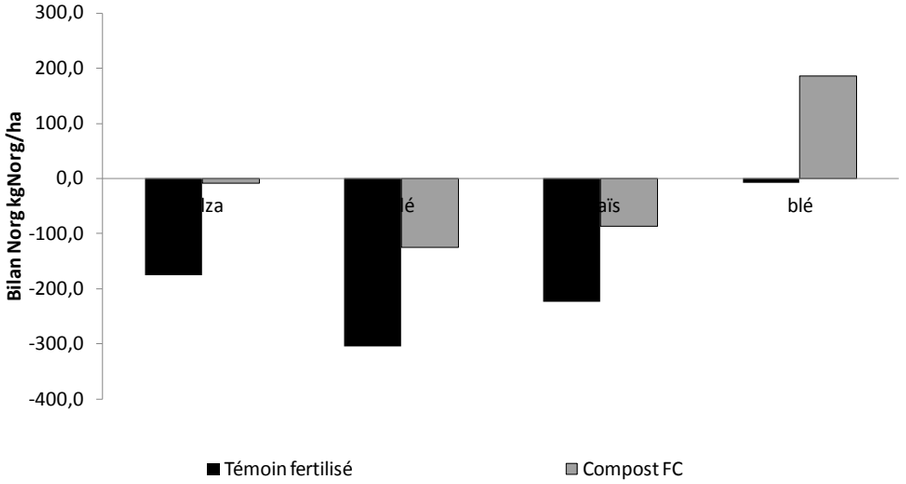


Figure 5.21: Bilan Norg des scénarios d'utilisation de PRO amendants **sur un sol riche en MO** avec ou sans exportation des résidus de blé. Compost FC : Compost de fumier de chevaux.

Tableau 5.28: Bilan d'azote organique des différents scénarios avec utilisation de PRO amendants de la succession de culture Colza/Blé/Maïs/Blé **sur un sol riche en MO**

			Norg = 0 ,17 %
			Résidus enfouis
	Norg apporté (kgNorg/ha)	Culture	Bilan Norg (kgNorg/ha)
Compost de fumier de chevaux	170	Colza	-8,6
	170	Blé	-125,0
	170	Maïs	-87,0
	170	Blé	186,0
TOTAL			-34,6

5.4.2.3 Bilan P et K des scénarios de PRO amendants

Le tableau 5.29 présente les flux de P_2O_5 et de K_2O suite à l'épandage des PRO amendants testés. Le tableau 5.30 présente les exportations des cultures en ces deux éléments en fonction des rendements simulés obtenus.

Tableau 5.29: Quantités totales d'azote, de phosphore et potassium apportées suite à l'épandage de PRO amendants à l'échelle de la succession de culture

type de PRO	N kg/ha	P_2O_5 kg/ha	K_2O kg/ha
Compost de Fumier de chevaux	680	629,2	1749,7
Fumier de chevaux pailleux	680	381,6	1328,4
Compost de déchets verts	680	266,0	824,2

Tableau 5.30: Exportations des cultures en phosphore et potassium en fonction des rendements obtenus

	Culture	Rendements moyens sur les deux types de sols riches et pauvres en Norg (100%MS) Qx/ha	Exportations en P_2O_5 kg/ha	Exportations en K_2O kg/ha
Epandage de Compost de Fumier de chevaux	Colza	48,4	67,2	45,7
	Blé de colza	62,3	46,6	35,8
	Maïs	82,0	56,6	51,9
	Blé de maïs	28,9	21,6	16,6
	TOTAL		191,9	150,0
Epandage de Fumier de chevaux pailleux	Colza	31,6	43,8	29,8
	Blé de colza	36,7	27,4	21,1
	Maïs	70,3	48,5	44,5
	Blé de maïs	25,1	18,8	14,4
	TOTAL		138,5	109,8
Epandage de Compost de déchets verts	Colza	38,7	53,7	36,5
	Blé de colza	43,6	32,6	25,1
	Maïs	76,8	53,0	48,6
	Blé de maïs	23,5	17,6	13,5
	TOTAL		156,8	123,7

Les quantités de phosphore apportées pour tous les PRO amendants sont 1,7 à 3,3 fois plus importantes que les exportations des cultures en place, ce qui représente *un risque important de saturation du sol et donc de lixiviation et érosion qui pourrait conduire à l'eutrophisation des nappes souterraines et eaux superficielles*. Le compost de fumier de chevaux est le PRO qui représente le plus de risque de saturation des sols alors que le compost de déchets verts est le PRO qui saturerait le moins les sols en P_2O_5 (par rapports aux exportations des cultures).
Les quantités de K_2O apportées par rapports aux exportations des cultures sont également très importantes et sont 6,6 à 11,7 fois plus importantes que les exportations des cultures. Ici aussi, il existe un risque considérable de la saturation des sols en cet élément. Le compost de fumier de chevaux ainsi que les fumiers de chevaux pailleux sont les deux PRO qui apporteraient le plus de potassium dans le sol. Le compost de déchets verts apporterait des quantités moins importantes en cet élément au sol.
On conclut, d'après les résultats d'épandage de PRO amendants sur les deux types de sols riches et pauvres en MO, *que la substitution des engrais à court terme est loin d'être efficace.* Une complémentation azotée est indispensable sur toutes les cultures et plus précisément sur les deux cultures de blé.
Par contre, *l'utilisation de ces PRO est très intéressante quant au maintien et à l'augmentation des teneurs en MO des sols*. Les bilans d'azote organique sont *largement positifs dans le cas d'un sol pauvre en MO et très légèrement négatifs sur un sol riche en Norg :* on peut donc affirmer que ces PRO permettent un bon entretien des teneurs en Norg des sols limoneux.
Les fumiers de chevaux pailleux sont les PRO les plus intéressants quant à l'entretien et l'augmentation de ces teneurs en MO des sols. Le compost de fumier de chevaux quant à lui garantit des niveaux de rendements plus intéressants que le fumier pailleux et permet également un entretien intéressant, quoique moindre, des teneurs en Norg du sol.
On constate dans le cas de l'épandage des PRO amendants (Annexe 5.1) que les quantités de N volatilisées par les PRO sont très faibles (volatilisation variant entre 0 et 3 kgN/ha). Ces PRO ont des teneurs en N minéral initiales

faibles. Cette observation constitue également un avantage majeur dans l'utilisation des PRO en substitution des engrais azotés.

5.4.3 Scénarios de substitution des engrais azotés via l'utilisation mixte de PRO amendants et fertilisants

Nous testons ici des scénarios d'apports mixtes de PRO amendants et fertilisants et plus particulièrement l'association boue séchée et compost de fumier de chevaux. Ces scénarios ont pour objectifs, à la fois de substituer à court terme l'utilisation des engrais azotés *via* l'épandage de PRO fertilisants et d'entretenir au mieux, voire d'augmenter les teneurs en MO des sols, *via* l'utilisation de PRO amendants.
Nous présentons d'abord les résultats obtenus sur un sol pauvre en MO avec exportation ou pas des résidus de culture de blé (5.4.3.1). Ensuite (5.4.3.2), nous présenterons les résultats obtenus sur un sol riche en MO avec enfouissement des résidus de culture.
Nous avons testé une seule dose d'apport de ces PRO : 340 kgNtot/ha avec 170 kgNtot/ha de PRO fertilisant et 170 kgNtot/ha de PRO amendant. Nous avons choisi de nous affranchir des barrières réglementaires afin de pouvoir substituer de manière efficace les engrais azotés à court terme et d'augmenter au mieux les teneurs en MO des sols. Nous avons choisi ces doses d'apports puisque, en apportant une dose totale de 170 kgNtot/ha, nous n'obtiendrons pas des niveaux de rendements satisfaisants ni des bilans de Norg intéressants. Il est donc peu intéressant, de point de vue agronomique, de présenter ces résultats. Nous nous intéresserons donc *au test d'un apport mixte de compost de fumiers de chevaux et de boues séchées*.
Nous testerons l'impact de ces deux apports sur les rendements obtenus, l'absorption de N par les plantes (via le Keq), la lixiviation des nitrates et le bilan organique.

5.4.3.1 Scénarios d'utilisation de PRO amendant et fertilisant: cas de l'association boues séchées et compost de fumier de chevaux sur sol pauvre en MO avec ou sans exportation des résidus de blé

- Estimation des rendements :

La figure 5.22 et le Tableau 5.31 représentent les niveaux de rendements après épandage simultané et répété de boue séchée et de compost de fumier de chevaux à hauteur de 170 kgNtot/ha de chaque PRO sur un sol pauvre en MO. Les rendements de toutes les cultures sont très proches du traitement témoin fertilisé.
Les rendements simulés pour les deux cultures de blé sont particulièrement intéressants et dépassent les rendements obtenus sur le témoin. Le rendement obtenu sur le blé de colza est légèrement supérieur au témoin fertilisé et est de 9,2 tMS/ha pour le traitement avec enfouissement des résidus (+0,8 tMS/ha de différence avec le témoin). Le rendement obtenu sur cette même culture en exportant les résidus de récolte du blé est de 9,1 tMS/ha (+0,7 tMS/ha de différence avec le témoin). Les rendements simulés sur la seconde culture de blé sont supérieurs au témoin et sont respectivement de 8,6 tMS/ha et de 9,0 tMS/ha (+2,1 tMS/ha et +2,5 tMS/ha de différence avec le témoin) pour le traitement avec exportation des résidus de blé et le traitement avec enfouissement total des résidus de culture.
De même, pour la culture de colza, les rendements simulés sont supérieurs aux rendements obtenus sur le témoin. L'écart de rendement est de 0,3 tMS/ha pour le traitement avec exportation des résidus et est de 0,6 tMS/ha pour le traitement avec enfouissement des résidus. Enfin, en ce qui concerne la culture de maïs, les rendements simulés sont légèrement inférieurs par rapport au rendement témoin. Les écarts sont de -0,7 tMS/ha pour le traitement avec exportation ou non des résidus.
Ces observations sont confirmées par les valeurs de Keq des mélanges de PRO (Annexe 5.1) où on constate que les Keq calculés sont de 0.5 pour la culture de colza, de 0,4 pour le blé de colza, de 0.3 pour le maïs et de 0,7 pour le blé de maïs pour le traitement avec enfouissement des résidus. Les Keq sont très peu différents en cas d'exportation des résidus de blé.

Le Keq faible calculé pour la culture de maïs est de 0,3 ce qui confirme le fait que le niveau de substitution des engrais dans ce cas n'était pas très efficace, malgré des rendements tout à fait corrects. On a vu précédemment que le maïs répondait assez mal à de fortes quantités de N apportées.
Ces résultats étaient attendus puisque l'utilisation des boues substitue de façon très efficace l'utilisation des engrais azotés.

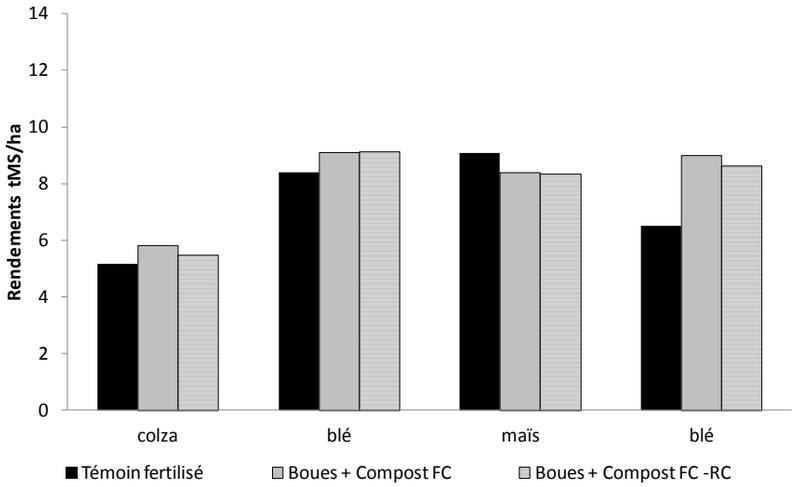


Figure 5.22: Rendements simulés des scénarios d'utilisation mixte de boues séchées et de compost de fumier de chevaux sur **un sol pauvre en MO**, avec ou sans exportation des résidus de culture

Tableau 5.31: Rendements simulés et quantités de N absorbées par les cultures et Keq calculés des scénarios d'apport de boues et de compost de fumier de chevaux de la succession Colza/Blé/Mais/Blé **sur un sol pauvre en MO**

			Norg = 0,088 %					
			Résidus enfouis			Résidus de blés exportés		
	Norg apporté (kgNorg/ha)	Culture	Rendement tMS/ha	N absorbé par les cultures kgN/ha	Keq calculé	Rendement tMS/ha	N absorbé par les cultures kgN/ha	Keq calculé
Compost de fumier de chevaux + Boues séchées	340	Colza	5,82	266	0,5	5,49	252	0,4
	340	Blé	9,2	201	0,4	9,14	201	0,4
	340	Maïs	8,39	261	0,3	8,33	258	0,3
	340	Blé	9,0	227	0,7	8,63	213	0,7

- Estimation des quantités de N lixiviées :

Les quantités de N lixiviées sur le sol ayant des teneurs faibles en MO, à l'échelle de la succession de culture, après épandages répétés de boue séchée et de compost de fumier de chevaux sont supérieures aux quantités de N lixiviées dans le témoin fertilisé (Figure 5.23, Tableau 5.32) mais les écarts restent relativement faibles. Les quantités totales de N lixiviées sont respectivement de 68 kgN/ha et de 80 kgN/ha pour le traitement avec ou sans exportation des résidus de blé, ce qui correspond à 14 kgN/ha supplémentaire pour le traitement avec exportation des résidus de blé et 26 kgN/ha supplémentaires pour le traitement avec enfouissement total des résidus. Ces

quantités supplémentaires de N perdu ne représentent que 1% à 2% de la quantité de N total apporté via l'épandage des PRO.

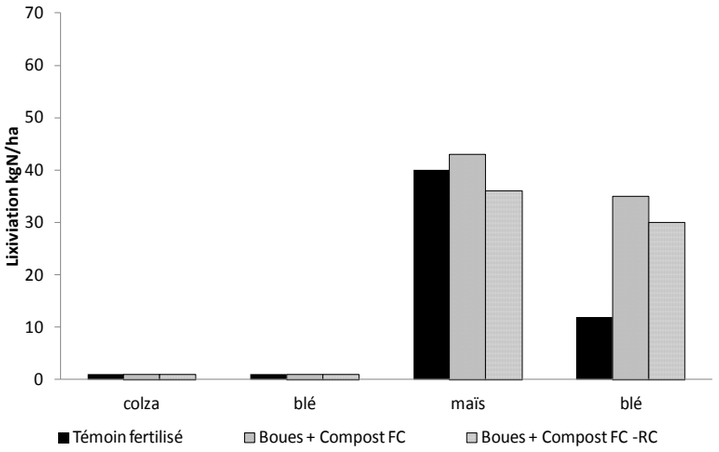


Figure 5.23: Quantités de N lixiviées des scénarios d'utilisation mixte de boues séchées et de compost de fumier de chevaux sur **un sol pauvre en MO**, avec ou sans exportation des résidus de culture

Tableau 5.32: Quantités d'azote lixiviées et volatilisées des scénarios d'apport de boues et de compost de fumier de chevaux de la succession Colza/Blé/Mais/Blé **sur un sol pauvre en MO**

			Norg = 0,088 %			
			Résidus enfouis		Résidus de blés exportés	
	Norg apporté (kgNorg/ha)	Culture	N lixivié kgN/ha	N volatilisé kgN/ha	N lixivié kgN/ha	N volatilisé kgN/ha
Compost de fumier de chevaux	340	Colza	1	2	1	2
	340	Blé	1	1	1	1
	340	Maïs	43	7	36	7
	340	Blé	35	1	30	1

- Bilan Norg :

Le bilan organique, dans le cas d'un sol pauvre en MO après épandage combiné de boue séchée et de compost de fumier de chevaux de manière régulière à l'échelle de la succession de culture (Figure 5.24, Tableau 5.33), est largement positif et est de 540 kg Norg/ha pour le traitement avec exportation des résidus de blé. Il est de 572 kg Norg/ha pour le traitement avec enfouissement des résidus de blé. Cette quantité de Norg est très importante et représente une augmentation d'environ 0,014% de la teneur en Norg du sol sur la durée de la succession pour les deux traitements avec et sans exportation des résidus de blé.
Par rapport au traitement témoin, les gains supplémentaires de Norg dans le sol sont respectivement de 891 kgNorg/ha pour le traitement avec exportation des résidus et de 924 kgNorg/ha pour le traitement avec enfouissement des résidus.

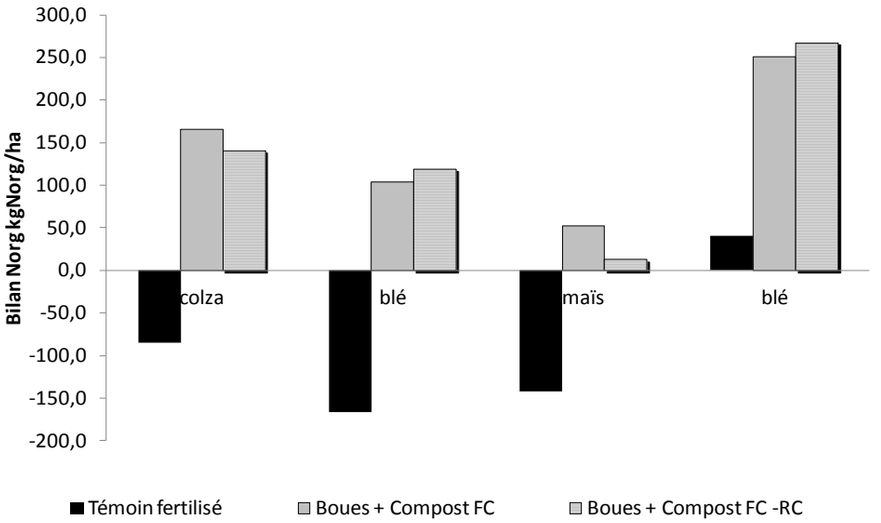


Figure 5.24: Bilan Norg des scénarios d'utilisation mixte de boues séchées et de compost de fumier de chevaux sur **un sol pauvre en MO**, avec ou sans exportation des résidus de culture

Tableau 5.33: Bilan d'azote organique des scénarios d'apport de boues et de compost de fumier de chevaux de la succession Colza/Blé/Mais/Blé **sur un sol pauvre en MO**

			Norg = 0 ,088 %	
			Résidus enfouis	Résidus de blés exportés
	Norg apporté (kgNor	Culture	Bilan Norg (kgNorg/ha)	Bilan Norg (kgNorg/ha)
Compost de fumier	340	Colza	165,4	140,5
	340	Blé	104,0	119,0
	340	Maïs	52,0	13,0
	340	Blé	251,0	267,0
TOTAL			572,4	539,5

Ainsi, en s'affranchissant des barrières réglementaires, nous avons pu substituer de manière très satisfaisante les engrais azotés en obtenant des rendements très intéressants par rapport au témoin fertilisé. De plus, les bilans organiques sont très satisfaisants et permettent une augmentation considérable des teneurs en MO des sols. Ceci sans augmentation considérable des quantités de N lixiviées.

5.4.3.2 - Scénarios d'utilisation de PRO amendants et fertilisants: cas de l'association boue séchée et compost de fumier de chevaux sur sol riche en MO avec enfouissement total des résidus de culture

- Estimation des rendements :

La figure 5.25 et le Tableau 5.34 représentent les rendements après épandage répété de boue séchée et de compost de fumier de chevaux à hauteur de 170 kgNtot/ha de chaque PRO sur un sol riche en MO. On constate que les niveaux de rendements de toutes les cultures sont très proches du témoin fertilisé. Les rendements simulés pour les deux cultures de blé et du colza dépassent légèrement les rendements obtenus sur le témoin. En revanche, pour la culture de maïs, le rendement simulé est légèrement inférieur par rapport au rendement témoin.
Ces simulations permettent de calculer des valeurs de Keq pour l'ensemble des 2 PRO (Annexe 5.1). Ils sont de 0,4 pour la culture de blé de colza, de 0,6 pour le blé de maïs et de 0,5 pour le colza. Par contre, le Keq calculé pour la

culture de maïs est de 0,1 toujours en raison de la faible réponse à l'azote apporté par le maïs surtout en sol riche en Norg.

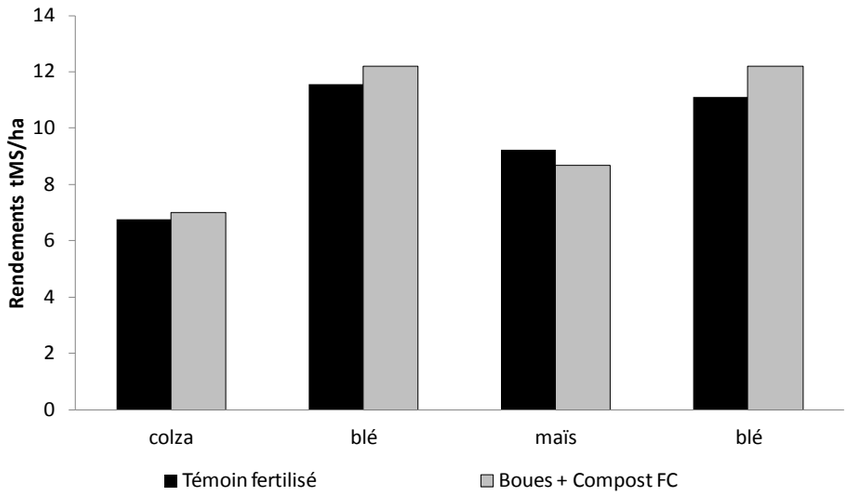


Figure 5.25: Rendements simulés des scénarios d'utilisation mixte de boues séchées et de compost de fumier de chevaux sur **un sol riche en MO**, avec enfouissement total des résidus de culture

Tableau 34: Rendements simulés et quantités de N absorbées par les cultures et Keq calculés des scénarios d'apport de boues et de compost de fumier de chevaux de la succession Colza/Blé/Mais/Blé **sur un sol riche en MO**

				Norg = 0,17 %	
			Résidus enfouis		
	Norg apporté (kgNorg/ha)	Culture	Rendement tMS/ha	N absorbé par les cultures kgN/ha	Keq calculé
Compost de fumier de chevaux + Boues séchées	340	Colza	7,01	367	0,5
	340	Blé	12,21	286	0,4
	340	Maïs	8,67	274	0,1
	340	Blé	12,21	326	0,6

- Estimation des quantités de N lixiviées :

Les quantités de N lixiviées sur le sol ayant des teneurs importantes en MO, à l'échelle de la succession de culture, après épandages répétés de boue séchée et de compost de fumier de chevaux sont de 131 kgN/ha pour l'ensemble de la succession. Cela représente 31 kgN/ha supplémentaire par rapport au témoin fertilisé (Figure 5.26, Tableau 5.35). Ces pertes augmentent surtout lors de la dernière saison culturale avant le blé de maïs puisque le stock de N minéral dans le sol en fin de simulation de culture du maïs est très important (202 kgN/ha). Cette quantité importante se retrouve facilement lixiviable durant la période hivernale où la culture de blé est encore peu développée.

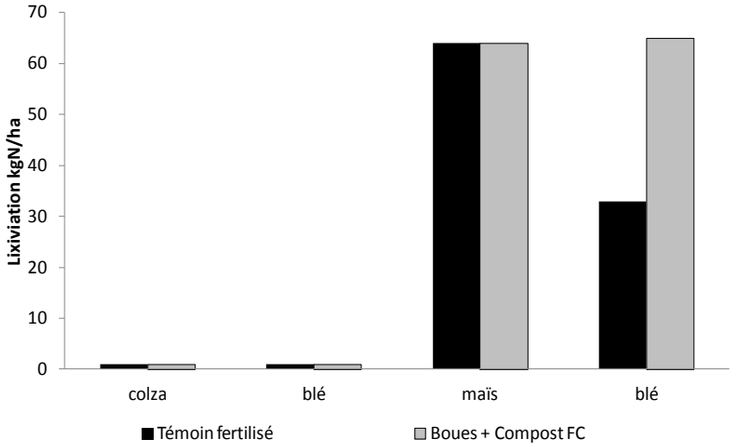


Figure 5.26: Quantités de N lixiviées des scénarios d'utilisation mixte de boues séchées et de compost de fumier de chevaux sur **un sol riche en MO**, avec enfouissement total des résidus de culture

Tableau 5.35: Quantités d'azote lixiviées et volatilisées des scénarios d'apport de boues et de compost de fumier de chevaux de la succession Colza/Blé/Mais/Blé **sur un sol riche en MO**

			Norg = 0,17 %	
			Résidus enfouis	
	Norg apporté (kgNorg/ha)	Culture	N lixivié kgN/ha	N volatilisé kgN/ha
Compost de fumier de chevaux	340	Colza	1	2
	340	Blé	1	1
	340	Maïs	64	7
	340	Blé	65	1

- Bilan Norg :

Le bilan organique, dans le cas d'un sol riche en MO après épandage combiné de boue séchée et de composts de fumiers de chevaux est nettement positif (Figure 5.27, Tableau 5.36). Il est de 185 kgNorg/ha. Cette quantité de Norg est très importante et ne permet pas simplement un entretien des teneurs en Norg du sol, mais peut même permettre une augmentation d'environ 0,003% de la teneur en Norg du sol sur la durée de la succession.
Par rapport au traitement témoin, l'augmentation des stocks de Norg est de 897 kgNorg/ha. Dans cette situation, les doses de PRO amendants pourraient très certainement être diminuées, ceci afin de maintenir le niveau de Norg du sol tout en diminuant les quantités de N lixiviées.



Figure 5.27: Bilan Norg des scénarios d'utilisation mixte de boues séchées et de compost de fumier de chevaux sur **un sol riche en MO**, avec enfouissement total des résidus de culture

Tableau 5.36: Bilan d'azote organique des scénarios d'apport de boues et de compost de fumier de chevaux de la succession Colza/Blé/Mais/Blé **sur un sol riche en MO**

			Norg = 0 ,17 %
			Résidus enfouis
	Norg apporté (kgNorg/ha)	Culture	Bilan Norg (kgNorg/ha)
Compost de fumier de chevaux + Boues séchées	340	Colza	64,4
	340	Blé	-51,0
	340	Maïs	-32,0
	340	Blé	204,0
TOTAL			185,4

En conclusion et comme précédemment, nous avons pu substituer de manière très satisfaisante les engrais azotés en obtenant des rendements très intéressants par rapport au témoin fertilisé. De plus, le bilan organique est très satisfaisant. Il permet l'augmentation des teneurs en MO du sol d'une façon telle que les doses de PRO amendants apportées pourraient être diminuées, ce qui permettrait de diminuer les pertes par lixiviation.

5.4.3.3 Bilan P et K des scénarios combinées d'apports de PRO fertilisants et amendants

Un calcul des quantités totales de P_2O_5 et de K_2O a été effectué. Les résultats sont présentés dans le tableau 5.37.

Tableau 5.37: Exportations des cultures en phosphore potassium en fonction des rendements obtenus

	Culture	Rendements moyens sur les deux types de sols riches et pauvres en Norg (100%MS) Qx/ha	Exportations en P_2O_5 kg/ha	Exportations en K_2O kg/ha
Epandage de Compost de fumier de chevaux + Boues	Colza	54,8	76,0	51,7
	Blé de colza	88,1	65,9	50,7
	Maïs	83,4	57,6	52,8
	Blé de maïs	80,6	60,2	46,3
	TOTAL		259,7	201,5

Les quantités de Boues + compost de fumier de chevaux apportées représentent 1107,6 kg/ha de P_2O_5 et de 1860,5 kg/ha de K_2O.
Selon la brochure Comifer (2007), les exportations totales des cultures en P_2O_5 et de K_2O sont de près de 260 kg de P_2O_5/ha et de 202 kg de K_2O/ha.
Les quantités de phosphore et de potassium apportées sont très largement supérieures aux exportations des cultures dans ce scénario de combinaison de PRO amendant et fertilisant ne respectant pas les barrières réglementaires, ce qui constitue un risque élevé de saturation des sols et de pertes possibles dans les nappes et donc d'eutrophisation. Un tel risque n'est pas envisageable dans la réalité.

5.5. Conclusion :

En conclusion, il est possible, d'après ces simulations, de substituer totalement l'utilisation des engrais via l'épandage répété de PRO fertilisants. Nous avons montré que l'utilisation de ces PRO, dans tous les cas, permet d'obtenir des niveaux de rendement corrects et qui peuvent même dépasser les rendements obtenus sur un témoin fertilisé représentant les pratiques agricoles classiques.
Par contre, nous avons observé que les quantités de N lixiviées sont plus importantes dans les scénarios avec épandage de PRO par rapport au témoin fertilisé. Les Cipan ont un rôle majeur dans la diminution des quantités de N potentiellement lixiviables.
Les boues d'épuration (ici utilisées sous forme séchées en pellets) sont les PRO les plus intéressants pour les rendements et pour contenir le risque de lixiviation. Le produit Humival est également un produit intéressant.
Ces apports de PRO fertilisants ne permettent pas de maintenir les teneurs en matière organique du sol. Les pertes accumulées peuvent être considérables surtout sur un sol riche en Norg. Les bilans en phosphore ne sont satisfaisants que pour les boues, et trop fortement positifs dans le cas de l'utilisation de Humival. L'apport en K_2O de ces substitutions est insuffisant et doit conduire à des complémentations minérales.
L'épandage répété de PRO amendants ne peut permettre une substitution, à court terme, des engrais azotés vis-à-vis des rendements à l'échelle de la succession mais, à long terme, on peut prévoir que l'accumulation de quantités importantes de matières organiques stables dans le sol aura une importance dans la substitution des engrais, comme le montre d'ailleurs dans la réalité l'essai Qualiagro. Le compost de fumier de chevaux est le PRO amendant le plus intéressant permettant d'obtenir les rendements les plus élevés et une bonne augmentation des teneurs en MO du sol. Mais le fumier de chevaux pailleux est le produit qui maintient le mieux les teneurs en MO des sols.
L'impact de l'exportation des résidus de culture est peu important à l'échelle de la succession de culture mais cette exportation risque d'avoir des impacts importants à moyen et long terme.
L'épandage conjoint de PRO amendants et fertilisants vise à la fois la substitution à court terme et également à long terme des engrais. Par contre, pour assurer une substitution correcte sur le plan des rendements et de l'entretien organique du sol, il faut franchir les barrières réglementaires. L'association de compost de fumier de chevaux et de

boue séchée est une association très intéressante quant au maintien des rendements et l'entretien des teneurs en MO des sols : cependant, elle augmente les niveaux de lixiviation de N et surtout, les bilans en phosphore sont non acceptables au regard des risques encourus.

Chapitre 6 :

DISCUSSION

CHAPITRE 6 : DISCUSSION GENERALE

La discussion sera organisée en trois parties (6.1) un retour sur les résultats, en signalant leurs points forts, leurs limites, leurs comparaisons à la bibliographie et en se posant explicitement la question de leur généricité, (6.2) la dimension territoriale de la gestion des PRO, avec là encore nos premiers acquis, les limites et les questions que cela pose et (6.3) les principales perspectives de recherche qu'ouvre ce travail de thèse.

6.1. RETOUR SUR LES RESULTATS

L'objectif de ce travail de thèse est de construire une méthodologie permettant de raisonner, à l'échelle de l'exploitation agricole et dans un territoire donné, l'utilisation de PRO disponibles localement pour substituer, au moins en partie, les engrais chimiques dans les systèmes de culture ne comportant que des grandes cultures.
Cette méthodologie comprend cinq étapes

(i) Le choix du territoire d'étude, ici un territoire périurbain du fait de la diversité *a priori* des PRO locaux que la situation périurbaine peut engendrer
(ii) un inventaire par enquêtes et consultation de données statistiques disponibles, des PRO disponibles sur ce territoire (directement produits ou potentiellement produits sur ce territoire ou accessibles aux agriculteurs de ce territoire)
(iii) un inventaire par enquêtes et par la représentation cartographique des données pluriannuelles du RPG, des systèmes de cultures (successions*itinéraires techniques) et de leurs attributions aux types de sols présents (disponibles par les données pédologiques locales, puis restreints aux principaux sols utilisés)
(iv) le calage sur ces situations agricoles locales et la validation du modèle STICS en utilisant des données acquises à partir d'un essai de longue durée installé sur ce territoire (Qualiagro)
(v) La construction et le test, après vérification de la pertinence des « témoins agriculteurs », des scénarios de substitution des engrais azotés à court et à long terme via l'épandage de PRO fertilisants et amendants.

Pour chacune de ces étapes, nous donnerons ci-dessous les principales conclusions en termes de points forts, de limites, de comparaison à la bibliographie lorsque cela s'avère pertinent et de généricité : en quoi les méthodes et résultats ici obtenus sont-ils transposables à un autre territoire.
On discutera donc les résultats d'inventaire des PRO et des systèmes de cultures (6.1.1 et 6.1.2), les résultats de calage du modèle STICS, de sa validation (6.1.3), ensuite les résultats obtenus sur la substitution des engrais azotés à long terme via l'utilisation de PRO amendants (6.1.4), et enfin les résultats des scénarios de substitution des engrais azotés à court terme via l'utilisation de PRO fertilisants ainsi que des apports mixtes de PRO amendants et fertilisants (6.1.5). Nous terminerons cette partie en nous posant la question de la généricité de la globalité de notre méthode.
On rappelle que l'on a choisi un territoire agricole d'Ile de France, situé en zone périurbaine, fortement marqué par les grandes cultures, la Plaine de Versailles et le Plateau des Alluets.

6.1.1. Inventaire des PRO et des systèmes des cultures :

6.1.1.1. Inventaire territorial des PRO

Sur un territoire préalablement défini, on a pu répertorier l'ensemble des PRO d'origine agricole ou urbaine utilisés ou potentiellement utilisables en agriculture, localiser et quantifier leur production en distinguant la production locale restant sur le territoire, les importations et les exportations (Cf Chapitre 3).
Nous avons été confrontés à **l'hétérogénéité de précisions quant aux natures et aux quantités produites,** fonction des sources d'informations disponibles. Par exemple, nous avons une précision beaucoup plus forte concernant les quantités produites sur ce territoire en boues de station d'épuration, en ordures ménagères et en déchets verts que

celle disponible pour les fumiers de chevaux par exemple. ***Cette précision est d'abord fonction de la source d'information, donc du producteur de PRO*** et de l'intérêt, voire de l'obligation réglementaire pour lui, de tenir une compatibilité précise de ces quantités produites.

Par exemple, concernant les boues et les ordures ménagères, il existe des organismes de centralisation des quantités produites pour les boues (la DDEA : Direction Départementale de l'Equipement et de l'Agriculture) et un incinérateur qui traite les ordures ménagères. Pour les composts de déchets verts, les quantités produites sont également suffisamment précises puisque les différentes plateformes sont amenées à quantifier les tonnages reçus et produits pour des raisons financières. *A priori*, sur le territoire français, au moins métropolitain, des PRO de types boues ou ordures ménagères, voire déchets verts devraient être quantifiables avec une relative bonne précision.

En termes de généricité, il est clair cependant que la nature des PRO et leur quantité globale est fonction des territoires : il est ainsi probable que l'hétérogénéité de précision des quantités selon la nature du producteur soit un problème général, quel que soit le contexte. Ceci a d'ailleurs été montré dans le cadre du projet ISARD dans les différents terrains où un tel inventaire a eu lieu (Ramahefarison, 2011). En particulier, l'atomisation des producteurs de PRO sur le territoire est un problème majeur pour réaliser un inventaire fiable. Or c'est le cas lorsque les effluents d'élevage sont une source majeure de PRO territoriaux. Dans le cas de la Plaine de Versailles, nous avons peu rencontré ce problème de caractérisation des élevages producteurs de PRO (hormis pour les chevaux), mais il peut être majeur ailleurs : on doit alors pour obtenir un inventaire fiable réaliser des enquêtes nombreuses et/ou lorsque c'est possible, tenter d'obtenir des enregistrements réglementaires (dans le cas de plans d'épandage d'effluents).

De même, selon les territoires, on peut obtenir l'inventaire des PRO d'au moins deux façons, pouvant s'hybrider : l'enquête ou l'obtention de données enregistrées à partir du producteur lui-même est la plus directe, et c'est celle que nous avons pratiquée ici ; mais il peut être nécessaire, dans des contextes où les statistiques n'existent pas et/ou où les producteurs sont trop atomisés, de « remonter » des utilisateurs agricoles vers les producteurs : ainsi a-t-on dû procéder pour réaliser un inventaire approximatif des fumiers de chevaux utilisés comme PRO agricole dans la région de Dakar (Diène, 2010) ou pour réaliser l'inventaire des multiples producteurs de PRO « effluents d'élevage » divers dans la zone urbaine de Mahajanga (Madagascar, Ramahefarison, 2011). Enfin, nous n'avons pas rencontré dans notre cas de PRO d'origine agro-industrielles : or ceux-ci sont courants dans d'autres zones et, s'ils font le plus souvent l'objet de plans d'épandage en France (sauf s'ils sont transformés en produits), il peut être difficile, dans les autres cas, d'avoir accès à des données pouvant être considérées comme confidentielles.

Dans le contexte Français, en général et à partir de notre expérience, l'accès à l'information est relativement facile surtout pour les PRO qui sont soumis à un plan d'épandage (les déchets et sous-produits d'élevage) puisque les quantités produites sont répertoriées. Pour les PRO de type produits, l'accès à l'information dépend essentiellement de l'organisme commercial. Les informations sur les quantités peuvent être confidentielles. En ce qui concerne l'échantillonnage de ces PRO, l'obtention d'échantillons est relativement facile à travers les producteurs de déchets. Il est plus difficile d'en obtenir à travers des organismes de traitements tels que les stations d'épuration et les plateformes de compostage. Il est particulièrement difficile d'avoir des échantillons de boues et on peut être confronté à une longue procédure d'obtention d'un accord de la part des directeurs des step.

Un point notable est que nous avons raisonné dans cet inventaire en termes de quantités produites globales plus que de dynamique et de flux de production. Notamment nous n'avons pas décrit de façon précise les rythmes de production de ces différents PRO, ce qui serait indispensable si nous nous intéressions plus directement à la gestion territoriale des PRO (cf Partie 6.2). Enfin, dans le cas des élevages, la double question de la ou des natures de PRO produits et de leur dynamique de production (fonction des modes d'élevage) se pose directement.

6.1.1.2. Caractérisation des PRO

- ✓ Analyses totales :

Nous avons déjà annoncé que les PRO que nous avons échantillonnés répondent bien aux critères d'innocuité issus de la législation en vigueur ; c'est en termes méthodologiques la première connaissance à avoir avant d'envisager quelque substitution que ce soit. Nous allons dans cette partie discuter les résultats des analyses totales effectuées par rapport aux références bibliographiques et voir si nos échantillons sont similaires aux PRO analysés dans la littérature (Tableau 6.1).

Les analyses de MS, teneur en MO, Ntot, C/N, P_2O_5 et K_2O des différents PRO échantillonnés sont relativement proches des caractéristiques de ces catégories de PRO issues de la littérature à quelques exceptions. On va détailler ces résultats en fonction des références déjà citées dans le premier chapitre (état de l'art). Les teneurs N minéral frais, par contre, sont faibles par rapport aux données bibliographiques et ceux, pour tous les PRO caractérisés. Nous avons utilisé pour le dosage du Nmin sur produit frais la méthode d'extraction au KCl et dosage par calorimétrie. Il serait intéressant de vérifier les teneurs en Nmin en utilisant la méthode de Buchi ou la méthode Kjeldahl.

Les caractéristiques du fumier de bovin échantillonné sont proches des caractéristiques décrits par l'institut de l'élevage (2001) notamment en ce qui concerne la teneur en Ntot, le C/N et K_2O. Pour la teneur en MO, nos résultats sont plus proches des données trouvées par Biomasse Normandie (2002). La teneur en P_2O_5 est, par contre, presque deux fois plus importante que ces deux références. Cette différence pourrait être due au régime alimentaire des vaches laitières élevées sur le site expérimental de Grignon. La teneur en MS est également supérieure aux données bibliographiques.

Dans le cas des fumiers de chevaux, nous comparerons les résultats des différents échantillons que nous avons retenus aux fumiers de chevaux pailleux caractérisés dans la littérature.

Le fumier de chevaux pailleux échantillonné a des caractéristiques très proches de celles trouvées par la Fival (2009) pour tous les éléments, exception faite de la teneur en N minéral en frais où nos échantillons ont une teneur plus faible que la référence. Pour expliquer cette différence, nous avons remarqué que les fumiers de chevaux sur le territoire sont très pailleux. Les pailles contiennent généralement très peu de N minéral ce qui pourrait expliquer ces teneurs faibles du produit. Le fumier de chevaux sur litière de copeaux est également très proche des caractéristiques données par la Fival (2009) pour tous les éléments.

Le compost de fumier de chevaux a, quant à lui, une teneur en MO et C/N plus faible que les références de fumier non composté. Par contre les teneurs en Ntot, P_2O_5 et K_2O sont plus importantes. Ce constat est logique puisque le compostage entraine une minéralisation partielle de la MO et donc une baisse du C/N du produit. Le compostage permet également une concentration des éléments d'où les teneurs plus importantes en Ntot, P_2O_5 et K_2O.

Les fientes de volailles ont des caractéristiques très proches pour tous les éléments de celles décrites par Biomasse Normandie (2002) et par l'institut de l'élevage (2001) pour des fumiers de volailles. Ces données analytiques sont également proches des données des fientes de volailles séchées bien que les teneurs en Ntot, P_2O_5 et K_2O de nos échantillons soient inférieures à celles trouvées par l'institut de l'élevage (2001).

On constate par contre, qu'après compostage, la teneur en MO et le ratio C/N ont tous les deux baissé et on note à l'inverse une augmentation des teneurs en Ntot, P_2O_5 et K_2O.

Humival, est un lisier de porc séché thermiquement. Les teneurs en éléments majeurs sont toutes inférieures aux teneurs mesurées dans la littérature sur un lisier de porcs non séché. Le séchage a eu comme conséquence la perte en éléments majeurs par volatilisation (essentiellement N).

Les boues chaulées ont des caractéristiques initiales très proches de la littérature et plus particulièrement par rapport aux résultats données par l'APCA (2007). Par contre, on remarque que la teneur en MS est plus forte dans notre cas. Ceci est probablement dû aux conditions d'échantillonnage car le produit était très sec. Ces boues ont été

échantillonnées au bord d'un champ en conditions estivales. On retrouve également des résultats semblables à la littérature en ce qui concerne les boues séchées malgré quelques écarts comme sur le Ntot et le N minéral frais.
Pour Fertilys et les deux composts de déchets verts, les caractéristiques initiales sont très proches des données publiées par Leclerc (2008) et ce pour tous les éléments à l'exception du Nmin sur produit frais.

Tableau 6.1: Comparaison des caractéristiques générales des PRO échantillonnés et des références bibliographiques

Famille PRO	Origine PRO	Référence	MS	MO	Ntot	N min frais	C/N	P2O5	K2O
			%MB	%MS	%MS	%Ntot		%MS	%MS
Fumiers	Bovin	**Nos échantillons**	36.5 (1.4)	75.1 (0.1)	3.0 (0.0)	0,7	13.8 (0.8)	1.9 (0.1)	5.2 (0.8)
		Biomasse Normandie, 2002	25	75	2,2	X	17	1,0	2,9
		Institut de l'élevage, 2001	22	81	2,6	X	15.5	1,0	4,3
Fumiers	Cheval sur copeaux	**Nos échantillons**	34.0 (1.7)	81.2 (0.2)	1.3 (0.0)	2,3	32.9 (1.2)	1.0 (0.0)	3.3 (0.2)
	Cheval pailleux	**Nos échantillons**	35.0 (0.0)	73.9 (0.7)	1.6 (0.0)	0,5	25.4 (1.8)	0.9 (0.1)	3.1 (0.5)
	Cheval composté	**Nos échantillons**	44.3 (6.0)	36.6 (0.2)	1.4 (0.0)	1,2	13.9 (0.1)	1.3 (0.0)	3.6 (0.1)
	Cheval pailleux	Biomasse Normandie, 2002	50	75	1,6	X	23.4	0,6	1,8
		FIVAL, 2009	35	78	1,4	11	27.8	0,9	2,4
		Guide des MO, 2001	54	76	1,5	X	25.3	0,6	1,7
Fientes	Volailles Bretagne	**Nos échantillons**	44.3 (6.0)	36.6 (0.2)	1.4 (0.0)	5,8	13.9 (0.1)	1.3 (0.0)	3.3 (0.1)
	Volailles Compostées	**Nos échantillons**	48.7 (0.9)	70.0 (0.2)	4.0 (0.2)	4,0	9.3 (0.4)	4.4 (0.3)	6.8 (0.3)
	Volailles séchées	Institut de l'élevage, 2001	80,0	60	5,0	70	6.0	5,0	3,5
Fumiers	Volailles	Biomasse Normandie, 2002	70,0	75	4,1	X	9.1	4,1	2,9
		Institut de l'élevage, 2001	75,0	60	3,9	70,0	7.8	3,3	2,7
Lisiers	Porcin séché (Humival)	**Nos échantillons**	88.0 (3.2)	73.4 (0.1)	5.2 (0.3)	1,1	8.0 (0.5)	4.7 (0.2)	1.4 (0.4)
	Porcin	Biomasse Normandie, 2002	6,0	75	8,3	X	4.5	6,7	5,0
		Institut de l'élevage, 2001	9,3	75	10,3	60,0	3.6	5,2	6,3
Boues de STEP	Déshydratées chaulées	**Nos échantillons**	67.1 (5.9)	53.0 (0.6)	4.5 (0.0)	0,3	6.0 (0.0)	8.5 (0.0)	2.5(0.0)
	Déshydratées chaulées	ADEME, 2001	27,0	46	3,3	X	9,7	3,5	0,3
		ADEME, 1996	25	30	2,4 à 3,6	<10	8 à 11	2,4 à 4,0	0,4
		APCA, 2007	35	30	2,7	7	6	X	X
	Aérobies séchées thermiquement	**Nos échantillons**	88.5 (0.1)	76.6 (0.1)	7.2 (0.2)	3,4	5.8 (0.1)	5.2 (2.4)	1.2 (0.0)
	Aérobies séchées thermiquement	ADEME, 1996	>90		3,5 à 6	10 à 15	6 à 7,5	X	X
		APCA, 2007	95	55	4,5	2	6,1	X	X
Composts	Fertilys (Compost DV+Farine animale)	**Nos échantillons**	48.9 (0.2)	47.1 (0.2)	1.5 (0.1)	0,1	17.1 (1.5)	2.0 (0.5)	1.8 (0.4)
	Compost DV Versailles	**Nos échantillons**	58.4 (0.9)	35.9 (0.4)	1.8 (0.1)	2,1	15.7 (2.8)	0.7 (0.1)	2.1 (0.1)
	Compost DV Grignon	**Nos échantillons**	35.9 (0.3)	62.9 (0.5)	1.4 (0.0)	0,0	23.9 (2.3)	0.5 (0.0)	1.14 (0.0)
	Compost DV	Echo MO, 2008	59,0	46,0	1,5	7,0	15.3	0,6	1,4
		ADEME, 2001	50,0	45,0	0,8	X	15,0	0,4	0,7

✓ Valeur fertilisante :

Les échantillons collectés et ensuite caractérisés au laboratoire (incubations en conditions contrôlées) ont des valeurs fertilisantes azotées (disponibilité de l'azote) généralement proches des données bibliographiques, malgré l'existence de différences parfois importantes pour certains types de PRO du territoire par rapport aux caractéristiques des PRO théoriquement semblables issus de la littérature (Tableau 6.2)
Les pourcentages de N disponibles des deux boues séchées et chaulées sont respectivement de 50,8 et 41.7% du Ntot. D'après les références, ces mêmes boues minéralisent respectivement 35% et 40% de leur Ntot. Les boues séchées dans notre cas minéralisent plus de N par rapport aux références trouvées alors que les résultats de disponibilité du N de la boue chaulée sont compatibles avec les données bibliographiques.
Pour les fientes de volailles et Humival, les quantités de N disponibles sont largement inférieures dans notre cas par rapport aux références. Cette différence est expliquée par les quantités de N minéral très faibles dans nos échantillons suite à leur séchage. Les lisiers de porc et les fientes de volailles humides (données bibliographiques) ont des quantités de N minéral importantes ce qui augmente considérablement le pourcentage de N disponible de ces échantillons.
Pour les composts de déchets verts (Fertilys et les deux composts de déchets verts), le pourcentage de N disponible dans la littérature de ces composts est de 9% environ. Fertilys et le compost de déchets verts de Versailles ont des quantités de N disponibles faibles (1 et 3% N total, respectivement) et les résultats que nous avons trouvés sont légèrement inférieurs aux données trouvées dans la littérature. Par contre, le compost de déchets verts de Grignon immobilise plus d'azote (-41% Ntotal). Ceci est très probablement dû à la durée de compostage qui est de deux mois et qui ne permet pas d'atteindre une stabilisation et une bonne maturité du compost, ce qui a pour conséquences un C/N élevé et l'immobilisation de l'azote après apport au sol.
Enfin, concernant les fumiers de chevaux et le fumier de bovin, les quantités de N disponibles varient entre -73,3% et 2,6% Ntot alors que les données trouvées dans la littérature prédisent une teneur en N disponible variant entre 20% et 40% Ntot. Ces PRO, d'après la littérature, semblent comporter des quantités notables de N disponible et on peut même les comparer aux boues séchées et chaulées (40% Ntot). Nos résultats sont ainsi largement inférieurs aux données bibliographiques. Nous supposons que dans notre cas, les fumiers échantillonnés étaient très pailleux ou trop ligneux (fumier sur copeaux) et les C/N de ces PRO sont alors importants ce qui expliquent ces quantités de N immobilisées.

Tableau 6.2 : Comparaison des valeurs fertilisantes azotées des PRO échantillonnés et des références bibliographiques

	N disponible (références : Institut de l'élevage (2001) ; Fival (2009) ; ADEME (1996) ; Leclerc et al (2008)	N potentiellement disponible	
	% Ntot	% Ntot	Kg N/t MS
Boues séchées	35,0	50,8	35,6
Humival	80,0	47,4	25,0
Boues chaulées	40,0	41,7	18,6
Fientes volailles Bretagne	90,0	40,6	15,4
Fientes volailles compostées	X	12,6	3,5
Fertilys (Compost DV+Farine animale)	X	3,2	0,9
Fumier bovin	40,0	2,6	0,5
Fumier de chevaux composté	20,0 à 40,0	3,0	0,4
Compost DV Versailles	9,0	0,6	0,1
Compost DV Grignon	9,0	-41,4	-5,6
Fumier de chevaux sur copeaux	20,0 à 40,0	-43,3	-5,8
Fumiers chevaux pailleux	20,0 à 40,0	-73,3	-6,1

Ainsi, en ce qui concerne la caractérisation des PRO, les méthodes analytiques que nous avons utilisées sont génériques. Nous sommes cependant dépendants des manières d'effectuer sur le terrain les prises d'échantillon

(période, accessibilité); un autre élément spécifique peut être la nature précise des PRO qui dans certains cas peuvent être assez éloignés de ceux que l'on trouve dans la littérature (par exemple la variabilité de la part du paillage dans les fumiers de chevaux).
Retenons aussi que ces caractérisations sont toujours faites au laboratoire : or nous savons que la dynamique de libération des éléments minéraux au champ peut être modifiée par l'irrégularité des conditions climatiques dans la réalité, par rapport aux conditions contrôlées du laboratoire. Par ailleurs, le broyage au laboratoire exacerbe et maximise le processus d'organisation du N, en raison de l'augmentation des surfaces d'attaque pour les microorganismes. Cette caractérisation uniquement en laboratoire constitue une limite commune à tous ces types d'études.

6.1.2. Inventaire et caractérisation des systèmes de culture et des types de sols dans le territoire

Un point majeur de notre méthodologie est de considérer que la substitution possible de fertilisants chimiques par des PRO en agriculture suppose de partir de l'existant, c'est-à-dire d'une connaissance actuelle des systèmes de culture et de leur attribution aux types de sols. Cette posture nous semble généralisable, car l'identification des triplets [types de sols*successions de culture*itinéraires techniques de fertilisation des cultures] permet de prévoir des quantités, des rythmes (places dans la succession), des moments dans l'itinéraire de conduite des cultures où la substitution pourra se faire en fonction des PRO utilisables.
Mais cette identification, nous l'avons vu, n'est pas aisée : dans la plaine de Versailles, nous sommes pourtant dans une situation relativement simple et même privilégiée de ce point de vue, compte tenu d'une connaissance préalable des grands types de sols, de la dominance spatiale de deux d'entre eux et de la focalisation sur des systèmes de grande culture fondés là aussi sur la domination forte de quelques cultures (Colza, Blé, orges, Maïs). Mais même dans ce cas, nous avons vu que :

(i) nous sommes obligés de recourir à des enquêtes relativement précises de pratiques culturales dans les exploitations pour identifier les itinéraires techniques (et avec eux, les objectifs de rendement fondement pour les agriculteurs du raisonnement de la fertilisation), dont l'utilisation actuelle des Pro, car aucune base statistique n'existe sur ces données. De ce fait, les enquêtes sont nécessairement peu nombreuses et doivent être choisies en fonction de critères de représentativité pertinents. Nous avons dû croiser plusieurs sources d'information de précision variées pour cela (données structurelles disponibles sur les exploitations du territoire, parcellaires, mais aussi avis du conseiller agricole local)

(ii) concernant les successions de culture, nous sommes parvenus à une « généricité » à l'échelle du territoire, en utilisant les bases d'information géographique du RPG sur plusieurs années, afin de « reconstituer » les successions et d'en connaitre la représentativité approchée à l'échelle spatiale. Outre que cela demande un lourd travail et une compétence forte en SIG, le grain minimal de description territorial est alors l'îlot de parcelles (attribution d'une culture à un îlot) et non pas la parcelle agricole, et certains îlots peuvent ne pas être retrouvés d'une année sur l'autre (80% de cas utilisables néanmoins dans notre situation)

(iii) Dans le cas de territoires situés en France, et de cultures soumises à la PAC et donc déclarées au RPG, cette méthodologie peut être considérée comme générique. Dans les situations, où des enregistrements de type RPG n'existent pas, l'identification des successions de culture doit alors faire l'objet d'enquêtes nombreuses. Néanmoins, nous avons montré que les enquêtes restent indispensables d'une part pour bien identifier les catégories de successions de culture « automatisables » et surtout pour identifier les pratiques culturales et les objectifs de rendement des agriculteurs, ainsi que leurs utilisations actuelles de PRO. Concernant les types de sols, nous avons pu disposer dans notre territoire d'une carte des sols détaillée, qu'il nous a fallu simplifier : en effet la correspondance successions de culture*itinéraires techniques dans les exploitations se fait

sur la base de grandes catégories de sols et de terrains, et non de sous-classes pédologiques. Là encore, les enquêtes en exploitations sont nécessaires pour identifier les grands types de sols pertinents du point de vue des agriculteurs.

En termes de généricité, en France métropolitaine au moins, la disponibilité de cartes pédologiques dans les territoires est fréquente mais pas à toutes les échelles. De plus, nous avons montré, dans l'analyse de l'essai Qualiagro et dans les scénarios de substitution, que l'efficacité des PRO en termes de substitution par rapport aux engrais azotés dépend fortement, pour un type de sol donné, de sa teneur initiale en N organique. Or cette donnée n'est pas disponible dans les cartes pédologiques classiques. Dans d'autres contextes (comme nous l'avons vu dans le cadre du projet ISARD notamment au Sénégal et à Madagascar, mais aussi dans une moindre mesure à la Réunion) les cartes pédologiques sont peu ou pas disponibles et il faut dès lors établir pour l'étude et le territoire concernés une typologie ad-hoc des types de sols et les caractériser.

Dans notre cas, des mesures ont été effectuées sur des parcelles d'agriculteurs enquêtés. Nous avons également des données issues de l'essai Qualiagro.

Enfin, une limite importante de notre travail est que nous n'avons pas traité des systèmes maraîchers, peu importants en termes spatiaux dans ce territoire, mais forts consommateurs de matières organiques et pouvant présenter des spécificités fortes quant à l'attribution possible ou pas de certaines d'entre elles (par exemple, les maraîchers ne peuvent pas réglementairement utiliser du lisier ni des boues non compostées). Deux raisons majeures expliquent cette limite:

(i) la grande complexité des successions de culture et des conduites techniques en maraîchage, qui est dans notre cas un maraîchage diversifié largement destiné aux circuits courts (Aubry et Chiffoleau, 2009) et donc caractérisé par une très forte diversité des cultures et une instabilité forte des successions de culture sur une parcelle (raisonnement entre années mais aussi intra-annuelle) (Pourias, 2010). Leur étude demande des suivis très précis d'occupation du sol par les cultures, des enquêtes fines, alors que cette population de maraîchers est très peu disponible pour des enquêtes du fait de sa surcharge de travail ; De plus, il n'y a généralement pas possibilité pour ces exploitations de recourir au RPG, puisque celles qui ne sont pas aussi céréalières n'y sont pas répertoriées.

(ii) la grande difficulté de trouver des références techniques précises et des outils d'évaluation (type modèle de culture tel que STICS 6.9) pour ces diverses cultures.

Il reste que les cultures maraîchères, notamment en zones périurbaines, sont loin d'être négligeables et représentent même une catégorie de productions d'un intérêt croissant pour les urbains. Leur demande en matière organique est quantitativement forte (dans la Plaine de Versailles, nous savons que les maraîchers font partie des forts consommateurs de fumiers de chevaux, par exemple).

6.1.3. Insertion des produits résiduaires organiques (PRO) dans les systèmes de culture: intérêt et calage du modèle STICS pour décrire la dynamique de l'azote en cas d'apports répétés de PRO ; exemple de l'essai Qualiagro

La majeure partie de la discussion de cette partie a été effectuée dans le chapitre 4. Nous allons donc continuer, dans cette partie, à discuter la fiabilité du calage et de l'étape de validation du modèle ainsi que les principales idées quant à la substitution des engrais azotés, à moyen et à long terme, via l'épandage répété de PRO amendants dans le cas de l'essai de longue durée « Qualiagro ».

6.1.3.1. Calage du modèle et Validation:

Nous sommes arrivés à utiliser l'outil de modélisation STICS pour évaluer les conduites actuelles à l'échelle des successions de culture dans les grands types de sols pertinents et évaluer les scénarios de substitution. STICS était *a*

priori dans son domaine de validité (contexte pédoclimatique, types de cultures) et on avait la chance d'avoir un dispositif local de validation du modèle (Essai de longue durée « Qualiagro »).
Cependant, il a fallu procéder à un travail de calage et de validation du modèle STICS et plus particulièrement du module STICS résidus, compte tenu des difficultés rencontrées pour rendre compte de la dynamique de N minéral dans le sol (minéralisation des résidus de récolte).
Le nouveau calage du modèle et plus particulièrement pour la dynamique de N issue de la minéralisation des résidus de récolte n'est pas parfait mais semble satisfaisant vis-à-vis des résultats obtenus.
Ceci renvoie au fait que la dynamique de N minéral dans le sol et essentiellement celle de la minéralisation des résidus de récolte et des PRO et leur impact sur les rendements ne sont pas encore suffisamment compris pour être modélisés dans un modèle intégrateur comme STICS. En effet, la prédiction de la dynamique du N issue de la minéralisation des résidus (résidus de récolte et PRO) se base actuellement sur leur seul rapport C/N. Une des solutions qui existe pour aller plus loin dans les mecanismes, serait d'intégrer les caractéristiques biochimiques (fractions biochimiques : Lignines, Hemicellulose, Cellulose et fraction soluble) afin de mieux prédire la dynamique du C et N. Ce travail a déjà débuté par Lashermes et al (2009) pour la dynamique du C des PRO et, ce, en mettant au point un indice de stabilité de la matière organique (ISMO) qui permet d'avoir une meilleure prédiction du devenir de la matière organique dans le sol suite à des apports répétés de PRO. Lashermes en 2005 ainsi que Askri en 2011, ont modifié le formalisme de STICS résidus en subdivisant le compartiment résidus en 2 sous-compartiments dont un s'intègre directement à la matière organique humifiée. Elles ont également essayé de trouver des relations statistiques entre les paramètres de STICS résidus et les fractions biochimiques de différents types de PRO sans parvenir à des relations intéressantes. D'autres modèles tels que CANTIS et PASTIS (Garnier et al., 2003; Chalhoub et al., 2013) qui sont des modèles plus mécanistes pour simuler l'évolution des MO seraient peut-être plus adéquats mais leur robustesse n'a jamais été testé sur des périodes de simulation de l'ordre de la dizaine d'années.
Concernant la généricité de notre approche, a priori, dans des conditions pédoclimatiques voisines (Bassin Parisien au moins) et sur des systèmes de culture voisins, on devrait pouvoir utiliser notre calage de STICS. Mais, nous ne pouvons pas être surs de cette généricité. Tester ce calage sur d'autres situations parait obligatoire.

6.1.3.2. Substitution des engrais azotés à long terme en cas d'apports répétés de PRO « amendants »:

Les apports répétés de PRO à valeur amendante importante contribuent, l'essai Qualiagro le montre, à l'augmentation des teneurs en MO des sols cultivés. En conséquence, les quantités de N minéralisés provenant de la dégradation de la MO du sol contribuent à l'alimentation des cultures et peuvent donc participer à la substitution des engrais azotés, en permettant d'obtenir des niveaux de rendements proches des rendements obtenus dans un traitement témoin fertilisé classiquement avec des engrais minéraux. Ce niveau de substitution varie en fonction du type de PRO amendant et de sa capacité à faire augmenter les teneurs en Norg du sol. Le traitement DVB (compost de déchets verts et Boues) est le traitement dans Qualiagro qui permet le plus d'augmenter les teneurs en Norg du sol, et par conséquent, d'obtenir des niveaux de rendements les plus proches d'un témoin fertilisé. Le traitement OMR (compost d'ordures ménagères résiduelles) est par contre, le traitement le moins efficace quant à l'entretien des teneurs en Norg du sol et donc des rendements.
Notons cependant comme limites à ces résultats que les quantités de N lixiviées sont plus importantes, durant la saison hivernale, sur les traitements amendés de manière répétée par des PRO amendants que sur le traitement témoin fertilisé, et ce suite à l'augmentation conséquente des teneurs en Norg dans le sol sur les parcelles amendées en PRO. Cependant, nous rappelons l'absence de CIPAN dans l'itinéraire technique de l'essai Qualiagro. Leur implantation devrait permettre de limiter les flux de N minéral lixiviés.
En termes de généricité, a priori dans des conditions pédoclimatiques voisines (Bassin Parisien au moins) en utilisant les mêmes types de PRO et sur les mêmes systèmes de culture on devrait pouvoir obtenir les mêmes résultats acquis sur l'essai Qualiagro. Il est clair cependant que le comportement de ces PRO amendants dans des conditions différentes de types de sols, de climats et de systèmes de cultures devrait en théorie donner lieu à un

contrôle expérimental. Pour le moins, l'effet des conditions climatiques sur les paramètres du modèle devra être validé.

6.1.4. Insertion des produits résiduaires organiques (PRO) dans les systèmes de culture: Cas de la succession de culture Colza/Blé/Maïs/Blé

6.1.4.1. Scénarios de substitution des engrais azotés via l'apport de PRO fertilisants :

Nous avons élaboré et testé des scénarios montrant que l'on peut substituer, dans la succession de culture Colza/Blé/Maïs/Blé cultivée sur un sol limoneux profond, les engrais chimiques totalement, ou en fort pourcentage, par des PRO fertilisants, et que ceci est d'autant plus facile que le sol est initialement riche en MO.
Les boues séchées sont les PRO les plus efficaces, en termes d'obtention de niveaux de rendements importants qui peuvent dépasser dans les simulations, les niveaux de rendements obtenus sur un témoin fertilisé avec des engrais minéraux. Les quantités de N lixiviées en appliquant ce PRO sont faibles et comparables à celles simulées en cas d'utilisation d'engrais minéraux (traitement témoin). Les boues contribuent également légèrement à l'entretien voire à l'augmentation des teneurs en Norg du sol en cas d'un sol pauvre en MO.
Humival (lisier séché) est également un bon produit quant à la substitution des engrais azotés.
Il est important, par contre, de faire coïncider les besoins des cultures avec la dynamique de minéralisation de N de ces PRO. Un apport de fin d'hiver sur les cultures d'hiver semble très important afin de maximiser les chances d'absorption des quantités de N minéralisées des PRO par les cultures.
Notre travail présente cependant des limites. Dans cette thèse, nous n'avons testé que quelques scénarios parmi tous ceux qui auraient pu l'être. Il est important également de vérifier l'impact agri-environnemental de l'apport répété de ces PRO à long terme : nous avons traité des risques de lixiviation sur la succession mais pas à long terme ; nous avons calculé que nos scénarios de substitution entrainaient des surdosages concernant le phosphore voir de potassium; enfin nous n'avons pas traité, ni sur la succession ni à long terme, des questions d'accumulation de polluants organiques, d'ETM etc.
Nous n'avons pas non plus caractérisé ces scénarios en termes économiques, alors que ceci serait important car le coût des PRO est variable en fonction du type de PRO utilisé : par exemple le coût des boues pour l'agriculteur est proche de 0€/tMF alors que pour Humival il est de l'ordre de 180€/tMF.
Nous n'avons pas non plus caractérisé de manière fine lors de l'établissement de ces scénarios, les contraintes sociales qui peuvent influencer l'adoption ou pas de tels changements au niveau de la conduite des cultures (apports de PRO répétés sans apport d'engrais). L'utilisation même de certains types de PRO tels que les boues peut être remise en question suite à l'inacceptabilité sociale de ces produits que peut engendrer leur stockage ou leur épandage. Il serait donc intéressant d'effectuer une étude approfondie sur le niveau d'acceptabilité sociale de ces PRO. Ce travail a déjà été entamé dans le cadre de la thèse de Stève Joncoux (Joncoux, 2013). Il est certain que leur traitement par séchage et pelletisation tel qu'appliqué aux échantillons étudiés dans ce travail est un mode de traitement qui devrait contribuer à faciliter leur acceptabilité ainsi que les conditions techniques de leur épandage (épandeur à engrais possible).
De plus, il faudrait aussi affiner avec les agriculteurs la faisabilité de ces épandages de PRO sous divers points de vue (équipement, temps de travail, possibilité d'adopter les dates et doses proposées ; mais aussi contraintes logistiques, de stockage etc.) : un tel travail serait au moins à réaliser pour les scénarios les plus intéressants que nous avons pu simuler, voire pourrait amener à en construire et tester d'autres avec les agriculteurs.
Enfin et c'est important, nous restons sur des scénarios modélisés mais pas testés au champ : or nous savons que les dynamiques de minéralisation du N des différents PRO pourraient être différentes de celles que nous simulons car elles dépendent des conditions climatiques : il faudrait donc (cf perspectives) envisager des dispositifs de tests au champ des scénarios les plus prometteurs, y compris en acceptant de modifier les niveaux de rendements si l'on conserve voire améliore des marges économiques.

Le produit Humival est un PRO intéressant de point de vue agronomique. Cependant, son utilisation peut représenter des risques environnementaux tels que l'augmentation des quantités de N lixiviées par rapport à un traitement témoin fertilisé et un risque d'eutrophisation des nappes dû à un niveau d'apport de P_2O_5 largement supérieur aux besoins des cultures. Pour ces scénarios testés, et dans les mêmes grandes conditions pédoclimatiques (Bassin Parisien au moins) en utilisant les mêmes types de PRO fertilisants et sur les mêmes systèmes de culture et de pratiques culturales décrits lors de l'établissement des scénarios, on devrait pouvoir obtenir des résultats similaires à ceux obtenus et un niveau de substitution des engrais a priori intéressant.

6.1.4.2. Scénarios de substitution des engrais azotés via l'apport de PRO amendants et les apports mixtes de PRO amendants et fertilisants :

L'épandage des PRO amendants ne peut substituer les engrais azotés à court terme. Par contre, suite aux épandages répétés de ces PRO, il est tout à fait possible d'avoir un niveau de substitution des engrais (Chapitre 4). Les niveaux de rendements obtenus avec de seuls PRO amendants sont très faibles par rapport à un témoin fertilisé, cependant, l'écart se réduit sur un sol riche en Norg. L'utilisation répétée de ces PRO amendants permet un entretien des teneurs en MO des sols cultivés (cas d'un sol riche en Norg) voire une augmentation très importante de ces teneurs pour le cas d'un sol pauvre en Norg. Ce niveau d'entretien des teneurs en Norg des sols est fonction des types de PRO amendants et de leurs caractéristiques. D'après les résultats obtenus, l'épandage de PRO amendants n'est pas intéressant, de point de vue niveaux de rendements obtenus, si une complémentation azotée n'est pas effectuée à court terme. Ces apports augmentent par contre les teneurs en Norg du sol de manière considérable sur le moyen et long terme, ce qui est intéressant mais risque d'augmenter les quantités de N lixiviées.

Nous avons également testé des apports mixtes de PRO amendant (compost de fumier de chevaux) et de PRO fertilisant (boues séchées). Nous avons montré qu'il fallait doubler les apports totaux en Ntot et par conséquent s'affranchir des contraintes réglementaires pour obtenir à la fois des rendements intéressants et un niveau d'entretien intéressant des teneurs en Norg du sol. L'épandage mixte de compost de fumier de chevaux et de boues a permis alors d'obtenir des niveaux de rendements similaires voire plus importants que le témoin fertilisé avec engrais minéral. Les niveaux de Norg ont augmenté de manière très importante sur un sol pauvre en Norg (+0,014% Norg dans le sol) à l'échelle de la succession de culture. Sur un sol riche en Norg, le bilan est positif ce qui veut dire que ces apports mixtes peuvent permettre, de par un maintien des teneurs en MO du sol, une légère augmentation de ces teneurs.
Cette solution pourrait être intéressante à appliquer dans le cas de sols pauvres en MO et faire adapter la réglementation afin de pouvoir enrichir en MO et en éléments nutritifs, en un laps de temps relativement court, les sols à fertilité réduite en maintenant des niveaux de rendements élevés avec le moins de charges en fertilisation minérale possible. Mais les niveaux de lixiviation sont importants et représentent un risque considérable de pollution des nappes souterraines. Les quantités de P_2O_5 et de K_2O apportées sont également très importantes et largement supérieures aux besoins des cultures. Un risque considérable d'eutrophisation peut exister qui peut poser des problèmes environnementaux non acceptables. Comme nous nous sommes affranchis virtuellement de la législation en vigueur, ce scénario maximaliste ne peut donc, dans les conditions actuelles, pas être appliqué dans les exploitations agricoles. S'il l'était un jour, il faudrait aussi analyser en quoi cet épandage mixte des PRO pourrait également confronter l'agriculteur à des contraintes d'ordre technique (temps de travail, matériel d'épandage etc).
L'exportation des résidus de récolte du blé a un effet négatif sur les rendements et le bilan organique des sols. Il est donc préférable d'enfouir les résidus de culture.
Par contre, comme dit précédemment, nous n'avons pas testé toutes les situations possibles et nous nous sommes contenté de simuler les scénarios qui nous semblaient les plus pertinents. Pareillement, nous n'avons testé qu'un contexte pédoclimatique et une succession de culture. Nous n'avons pas non plus effectué une étude socio-économique sur l'épandage de ces PRO.

En ce qui concerne la généricité de nos résultats, pour ces scénarios également, dans les mêmes conditions pédoclimatiques et en utilisant les mêmes types de PRO et sur les mêmes systèmes de culture et de pratiques culturales décrits lors de l'établissement des scénarios, on devrait pouvoir obtenir les mêmes résultats et un niveau de substitution des engrais considérables. D'autres contextes pédoclimatiques, agricoles ou d'autres natures de PRO nécessiteraient de refaire l'intégralité de la démarche.
Pour les épandages mixtes de PRO amendants et fertilisants et dans les conditions utilisés dans nos scénarios, il ne serait pas possible actuellement de les tester au champ pour raison de contraintes réglementaires.

6.2. DIMENSION TERRITORIALE DE L'UTILISATION AGRICOLE DES PRO

Nous avons fourni des informations permettant, sur la comparaison d'un bilan inventaire –besoins des cultures de porter un premier diagnostic sur la dimension quantitative territoriale : dans notre territoire, la quantité totale de PRO aujourd'hui produite est largement inférieure (13% y compris en comptabilisant des PRO potentiellement utilisables comme les composts de biodéchets issus des OM) aux besoins actuels des cultures en N. Face à cela il y aurait plusieurs alternatives à tester :

- *L'élargissement du territoire de collecte des PRO aux delà des limites du territoire d'application sur les cultures* : ce scénario territorial est d'autant plus envisageable que l'on pourrait effectivement, sur ce territoire agricole proche de Paris, valoriser des PRO urbains actuels (boues) ou potentiels (composts de déchets ménagers, digestats etc) des villes environnantes (Versailles, les communes constituant le département des Yvelines voire Paris)
- *La construction ou consolidation d'échanges entre territoires à excédent structurel et territoires déficitaires* : ceci est pour partie déjà en place avec les fabrications et /ou utilisations sur le territoire de la PVPA d'Humival venant de Bretagne (voire de fientes venant de Bretagne). Cette solution interroge cependant sur sa durabilité compte tenu du coût du transport, de la non-remise en cause des sources des excédents structurels en Bretagne et sur le coût économique pour les agriculteurs de ces intrants organiques achetés.
- Les *modifications des systèmes de production dans le territoire*, probablement à plus long terme, mais allant dans le sens soit d'une modification des demandes en N des cultures (rendements limités au bénéfice des marges, introduction de légumineuses dans les rotations) à l'autoproduction de PRO plus importante : cela va des projets (pour partie en cours) d'introduction d'ateliers de poules (pourvoyeuses de fientes) dans ces exploitations céréalières parfois en recherche de diversification (perspective de la nouvelle PAC) jusqu'à la mise en place d'autres élevages (bovins, ovins, porcins) ce qui pose d'autres problèmes ne se limitant pas aux choix propres des agriculteurs (problématique de l'absence d'abattoir en IDF par exemple).

Il n'était pas dans les attendus de la thèse de traiter de l'organisation territoriale des flux entre producteurs de PRO et les consommateurs que sont les agriculteurs mais nous sommes conscients que la substitution des engrais par l'épandage de PRO doit certainement passer par une organisation des flux de PRO sur le territoire.
Or, si nous avons pu localiser les producteurs et les consommateurs de ces produits, nous aurions encore à produire des informations sur au moins un point :

- La *caractérisation des moyens logistiques notamment en transport et en stockage* (chez le producteur, chez le consommateur) pour organiser ces flux. Là encore, nous savons déjà que certains modes de stockage chez les agriculteurs peuvent poser des problèmes de voisinage et donc être un obstacle à l'utilisation de certains PRO. Dans le cas de notre territoire d'étude, compte tenu de sa surface relativement faible, de sa topographie et des infrastructures routières importantes, il n'y a pas, contrairement par exemple aux situations enclavées des cirques de l'île de la Réunion, de problèmes majeurs d'accessibilité physique aux PRO. Cependant, vu l'atomisation de certaines sources (comme

les fumiers de chevaux,) la question de l'optimisation des coûts de transport, pour le producteur de PRO comme pour l'agriculteur, peut être à l'avenir importante à traiter.

Une étape ultérieure de ce travail serait alors de pouvoir modéliser ces flux grâce à des outils élaborés et testés tel que le modèle MAGMA (Guerrin, 2001 ; Guerrin, 2007 ; Guerrin et Paillat, 2003)

6.3. PERSPECTIVES A L'ISSUE DU TRAVAIL DE THESE

Trois volets nous semblent importants à court et moyen terme dans la poursuite de ce travail. Chacun pourrait faire l'objet d'une étude particulière :

- L'amélioration des modèles d'évaluation pour les scénarios à partir de la modification des modules de prédiction de la dynamique du N des matières organiques endogènes (résidus de culture) et des matières organiques exogènes (PRO) dans les modèles de culture tel que STICS ou CERES.
- Simulation à long terme des scénarios les plus pertinents et tester des scénarios de substitution partielles de l'utilsiation des engrais via l'épandage de PRO
- Le *test au champ de scénarios de substitution parmi les modélisés actuels* ou ceux qui pourraient être modélisés : ce test au champ devrait s'accompagner (avant, pendant, après) d'une enquête de faisabilité et d'acceptabilité auprès d'agriculteurs (co-construction de scénarios à modéliser). L'idéal serait de pouvoir tester des scénarios non pas seulement en station expérimentale mais aussi en mode applicatif chez des agriculteurs
- La *veille (suivie si besoin de nouvelles caractérisations) sur les évolutions de PRO disponibles sur le territoire ou à ses environs* du fait par exemple de l'émergence de nouveaux PRO tels que les digestats issus du procédé de méthanisation ou de composts issues des déchets de restauration collective. Il serait donc intéressant d'étudier ces nouveaux produits en vue d'une valorisation potentielle en agriculture. Il faudrait donc pouvoir les caractériser, les paramétrer afin de les introduire dans des scénarios à l'avenir voire procéder de façon expérimentale à une application au champ.

Une autre question émergente peut également se poser, c'est celle du devenir dans le sol des contaminants métalliques ou organiques comme des molécules médicamenteuses (antibiotiques ou hormonales notamment) qui pourraient se retrouver dans plusieurs PRO tels que les boues de step ou les fumiers (bovins, chevaux etc). En effet, l'évolution en cours des préconisations sur la qualité de l'eau amène certaines STEP, notamment les plus grandes, à s''équiper de membranes à ultrafiltration, garantissant que ces molécules ne passent pas dans l'eau traitée. Leur présence en conséquence dans les boues suscite aujourd'hui des travaux en agronomie et science du sol pour analyser en quoi elles s'accumulent et/ou peuvent présenter des dangers pour les cultures et, partant, pour les consommateurs.

CONCLUSION

Nous rappelons que la question scientifique initiale était : *Comment raisonner l'insertion de PRO dans les pratiques de fertilisation dans les systèmes de grande culture du Bassin Parisien ?*

Nous rappelons également que les objectifs de la thèse sont d'évaluer la valorisation potentielle des PRO dans un territoire en testant différents scénarios d'insertion de ces PRO dans les systèmes de culture, en substituant les engrais par des PRO (de type fertilisant) et/ou via l'augmentation des teneurs en MO dans les sols par des PRO de type amendant. Cet objectif suppose d'avoir inventorié et caractérisé sur le plan agronomique les PRO de ce territoire, de s'assurer du maintien des niveaux de rendements lors de cette utilisation de PRO, d'évaluer les impacts environnementaux de ces apports de PRO, notamment les flux de nitrates lixiviés. Nous avons travaillé concrètement dans la petite région périurbaine de la Plaine de Versailles et du Plateau des Alluets.

Peu d'informations existaient au début de cette thèse, sur les quantités de PRO produits et/ou consommés sur ce territoire, les systèmes de cultures, les itinéraires techniques et les pratiques de fertilisation des cultures. Des enquêtes ont été effectuées afin d'avoir un inventaire complet des PRO disponibles, des systèmes de culture et des sols cultivés du territoire d'étude. Les PRO ont été caractérisés au laboratoire (dynamique C, N et fractionnement biochimique).

Une classification en fonction de la valeur amendante, basée sur les indices de Stabilité de la Matière Organique (ISMO), et de la valeur fertilisante des PRO basée sur la dynamique du N à partir des résultats d'incubations en conditions contrôlées a été effectuée. L'objectif de cette étape est de définir les PRO qui pourront servir à au moins deux séries de scénarios : (i) scénarios d'entretien et d'augmentation des teneurs en MO des sols cultivés en utilisant des apports répétés de PRO « amendants » existants sur le territoire qui pourront à moyen terme participer à la substitution des engrais azotés; (ii) scénarios de substitution des engrais azotés à court terme via l'épandage de PRO à valeur fertilisante importante.

Trois PRO amendants ont été sélectionnés pour tester les scénarios et sont : Compost de fumier de chevaux, Fumier de chevaux pailleux, Compost de déchets verts. Deux PRO fertilisants ont été choisis afin de tester la substitution des engrais azotés et sont : Humival (lisier de porc séché) et les boues séchées.

Des enquêtes auprès de 15 agriculteurs céréaliers sur les 60 agriculteurs présents ont été menées afin de déterminer les successions de cultures les plus répandues et les itinéraires techniques de chaque succession. Les agriculteurs choisis sont représentatifs des pratiques culturales effectuées sur le territoire, comme cela a été validé par les conseillers de la chambre d'agriculture des Yvelines. Trois successions de culture dominantes ont été repérées et confirmées par des données de répartition géographique des successions de cultures et des superficies cultivées sur le territoire issues des déclarations des agriculteurs à la PAC. Des itinéraires techniques moyens par culture et par succession de culture ont été établis (travail du sol et fertilisation azotée). Ces successions de cultures sont : Colza/Blé/Blé/Orge de printemps, Colza/Blé/Maïs/Blé et Colza/Blé/Escourgeon. Seule la succession de culture Colza/Blé/Maïs/Blé a été étudiée dans ce travail de thèse.

Une fois toutes ces données acquises, nous avons choisi d'utiliser un modèle de culture pour simuler les scénarios de substitution des engrais via l'épandage de PRO. STICS 6.9, un modèle de culture développé par l'INRA (France), simule la croissance des cultures, l'eau du sol et les bilans azotés régis par des données climatiques journalières.

Des problèmes de sous-estimation des rendements et des quantités de N minéral dans le sol ont été constatés lors de l'utilisation des paramètres par défaut du modèle. Ces problèmes viennent essentiellement du fait de la phase d'immobilisation importante qui accompagne la dégradation des résidus de culture, ce qui affecte de manière importante les rendements simulés. Il était indispensable de réduire l'amplitude et la durée de cette phase d'immobilisation et d'accélérer la phase de reminéralisation. L'ajustement des paramètres régissant la dynamique de N des résidus de récolte et la validation du modèle est basée sur la comparaison des données simulées à des données mesurées acquises à partir des mesures effectuées sur un essai de longue durée situé sur le territoire (Qualiagro).

Un paramétrage adéquat a été trouvé après modification, essentiellement, des paramètres régissant la dynamique de N des résidus de culture. Cette étape était très importante sur au moins deux plans : (i) la validation du modèle lui-même pour s'assurer de la fiabilité des résultats obtenus. Cette étape nous a permis de nous poser plusieurs questions quant à la pertinence du paramétrage du module STICS résidus basé sur le rapport C/N des PRO comme pour les résidus de culture et la suggestion de modifications possibles de son paramétrage ; (ii) la mise en évidence du fait qu'en augmentant de manière importante les teneurs en Norg du sol via l'épandage de PRO amendants, il est possible à moyen terme d'avoir des niveaux de rendements équivalents à un traitement témoin fertilisé.

A l'issue de 11 années d'épandage répété de ces PRO, nous avons pu montrer que les rendements obtenus des différentes cultures, étaient proches des rendements obtenus sur un traitement témoin fertilisé. Le niveau de substitution des engrais rendu possible par l'augmentation des stocks de matière organique dans le sol, dépend de la nature du PRO amendé et donc de sa capacité à augmenter les teneurs en Norg des sols.

Le compost de biodéchets était le traitement qui a le plus permis l'augmentation des teneurs en Norg dans le sol. Pour ce traitement, les rendements obtenus sont proches des rendements obtenus avec une fertilisation classique. Ce résultat est donc important dans la perspective d'augmentation future de la valorisation agricole de ces composts de biodéchets.

Une fois l'étape de calage et de validation du modèle effectuée, des scénarios de substitution des engrais azotés via l'épandage de PRO à valeur fertilisante importante ont été testés sur la succession Colza/Blé/Maïs/Blé cultivé sur un sol limoneux profond. Deux niveaux de Norg ont été testés. Un niveau en Norg fort (0,170% Norg) dans le sol correspondant à 3,0% de MO et un niveau faible de Norg (0,088% Norg) dans le sol correspondant à 1,5% de MO. Seule une année climatique moyenne (issue de l'essai Qualiagro) a été testée. L'implantation de Cipan a été systématiquement effectuée afin de réduire au mieux les quantités de N lixiviées. Deux scénarios d'exportation des résidus de blé ont également été testés afin d'étudier l'impact des exportations des résidus de culture sur les rendements et la dynamique du N dans le sol. Ce scénario est testé puisque des cas d'échange paille de blé/Fumier de chevaux ont été observés sur le territoire. Pour tous les scénarios, aucune complémentation azotée n'a été effectuée.

Nous avons pu montrer que l'épandage répété de boues séchées et, à un moindre degré, d'Humival (Lisier de porc séché) permet d'obtenir des niveaux de rendements très proches voire plus élevés que les rendements obtenus sur un traitement témoin fertilisé de manière classique, et ce, sur les deux types de sols (riche et pauvre en Norg). Une substitution totale des engrais azotés est donc envisageable en épandant des boues au « bon moment » en faisant correspondre la dynamique de minéralisation de l'azote du PRO et les besoins des cultures en place. Les pertes de N par lixiviation restent proches des quantités de N lixiviées pour un traitement témoin alors que les bilans organiques sont largement supérieurs aux bilans de Norg du témoin. Donc, d'une part, ces PRO permettent d'obtenir des rendements intéressants, à condition d'effectuer les apports en tenant compte des pics des besoins des cultures en place, mais aussi d'avoir des bilans organiques intéressants qui permettent d'entretenir les teneurs en Norg du sol et par conséquent le maintien de la fertilité des sols cultivés. Il faut par contre être vigilant quant aux quantités de phosphore ainsi apportées, qui peuvent représenter un risque important de saturation des sols en cet élément et d'eutrophisation des eaux des nappes souterraines.

Nous avons également testé des scénarios d'épandage de PRO à valeur amendante importante (compost de fumiers de chevaux, compost de déchets verts, fumier de chevaux pailleux). Ces PRO ont des valeurs fertilisantes faibles et ne peuvent contribuer, à court terme, à la substitution des engrais azotés. Une complémentation azotée conséquente est à prévoir pour maintenir un niveau de rendement correct des cultures. Par contre, l'épandage de ces PRO permet d'avoir une augmentation des teneurs en Norg très importante et plus particulièrement sur un sol initialement pauvre. Un risque de lixiviation plus importante des nitrates est à redouter à moyen terme.

Enfin, des scénarios d'apports mixtes de PRO amendants et fertilisants ont été testés en ne tenant pas compte des contraintes réglementaires. Nous avons pu montrer que nous pouvons à la fois maintenir les niveaux de rendements comparables à un traitement témoin et une augmentation importante des niveaux de Norg dans les sols pauvres. Il serait intéressant d'appliquer des apports mixtes de PRO amendants et fertilisants afin de pouvoir

améliorer de manière rapide la fertilité des sols pauvres, mais là encore les obstacles sont liés à l'enrichissement en phosphore

On conclut, suite à tous ces résultats, que la substitution des engrais azotés via l'épandage de PRO est tout à fait possible à court terme (c'est-à-dire à celui d'une succession culturale) à condition de bien faire correspondre la dynamique de minéralisation de l'azote des PRO aux besoins des cultures, donc d'adapter aussi les formes physiques des PRO à ce qui est utilisable dans la pratique agricole (pellets de boues par exemple). Il est d'autant plus facile d'avoir un niveau de substitution important sur un sol riche en Norg et en enfouissant les résidus de culture. Ces apports de PRO permettent également l'entretien des teneurs en MO des sols et par conséquent le maintien de leur fertilité. Il faut, par contre, être vigilant quant aux flux de phosphore dans les sols suite aux apports de boues et de lisier de porc par exemple.

Une substitution des engrais azotés est également possible à moyen et à long terme suite à des apports répétés de PRO amendants et ce en augmentant les teneurs en Norg dans les sols. Il faut être vigilent, dans ce cas, aux quantités de N lixiviées suite à la minéralisation de la MO stable du sol durant la période hivernale où les sols sont peu couverts.

La dimension territoriale, bien que nous n'ayons pas dans la thèse l'objectif de gérer explicitement les relations territoriales entre producteurs et consommateurs de PRO, nous a permis de mettre en évidence l'insuffisance des quantités de PRO sur le territoire en vue d'un entretien correct des teneurs en MO des sols mais aussi en vue de la substitution, au moins partielle de l'utilisation des engrais azotés. Des solutions potentielles ont été proposées telles que l'agrandissement du territoire d'origine des PRO, voire l'insertion d'élevages dans les systèmes de production à moyen ou à long terme.

Il est important, par ailleurs, de continuer ce travail en effectuant une recherche spécifique sur l'acceptabilité socio-économique de l'insertion des PRO dans les systèmes de culture et sur l'impact des apports de ces PRO à long terme sur la qualité des sols. Il serait aussi important d'étudier la substitution des engrais dans les systèmes de cultures maraichers, malgré les faibles superficies cultivées, mais ils restent des systèmes très demandeurs de PRO.

L'extrapolation possible de ce type d'étude dans d'autres territoires est théoriquement possible en suivant les mêmes étapes mais elle peut se heurter à des obstacles provenant notamment (i) de la difficulté à connaître les pratiques des agriculteurs et à les représenter territorialement (ii) de la non-disponibilité des références techniques suffisantes pour paramétrer des modèles de culture permettant l'évaluation de scénarios de substitution. De ces points de vue, nous sommes dans le territoire choisi dans une situation particulièrement favorable à la mise en œuvre de la démarche.

Enfin, dans tous les cas, il serait important de pouvoir tester en vraie grandeur, au champ et en conditions agricoles, ceux de ces scénarios qui semblent les plus intéressants en termes de maintien des rendements et de limitation des impacts environnementaux. Un tel test nécessiterait cependant de constituer de nouveaux observatoires de moyenne ou longue durée.

Références Bibliographiques

Abad Berjon, M., Climent Morato,M. D., Aragon Revuelta,P.,Camarero Simon,A. 1997. The influence of solid urban waste compost and nitrogen-mineral fertilizer on growth and productivity in potatoes. *Commun.Soil Sci. Plant Anal,* 28: 1653-1661

Abbott, L., Murphy, D.2007. Soil Biology Fertility: A key to sustainable land use in agriculture. Springer.

Abiven,S., Manasseri,S., Chenu,C., 2009. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability- A literature analysis. Soil Biology and Biochemistry. 41 : 1-12.

Abiven,S., Manasseri,S., Angers, D.A., Leterme, P. 2007. Dynamics of aggregate stability and biological binding agents during decomposition of organic materials. European Journal of Soil Science. 58 : 239-247.

ADEME, 1996. Valeur fertilisante des boues d'épuration.

ADEME, 2000. Composts de boues de stations d'épurations municipales: Qualité, performances agronomiques et utilisations.

ADEME, 2001. Les boues chaulées des stations d'épuration municipale : Production, qualité et valeur agronomique.

ADEME. 2005. Impacts environnementaux de la gestion biologique des déchets, rapport final.167-168.

ADEME, 2009. Les déchets en chiffres en France : Données et Références.

ADEME, 2011. Qualité agronomique et sanitaires des digestats.

ADEME, 2012. Rapport Déchets.

Agreste, 2010. HYPERLINK "http://www.terre-net.fr/observatoire-technique-culturale/strategie-technique-culturale/article/ajustement-des-apports-et-strategies-d-achats-217-84227.html" http://www.terre-net.fr/observatoire-technique-culturale/strategie-technique- lturale/article/ajustement-des-apports-et-strategies-d-achats-217-84227.html

Aichberger,K., Wimmer,J., Mayr.R., Auswirkungen der Kompostanwendung auf Ertrag und Bodeneigenschaften, in: Irdning (Ed.), Bundesanstalt für Alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein, 2000, pp. 81–83 6. Alpenländische Expertenforum: Kompostanwendung in der Landwirtschaft, 16–17 März 2000.

Al-Kaisi, M.M., Yin, X.H., Licht, M.A. 2005. Soil carbon and nitrogen changes as influenced by tillage and cropping systems in some Iowa soils. Agr. Ecosyst. Environ. 105: 635–647.

Alluvione, F., Bertora, C., Zavattaro, L., Grignani, C. 2010. Nitrous oxide and carbon dioxide emissions following green manure and compost fertilization in corn. Soil Science Society of American Journal. 74: 384-395.

Ambus, P., Jensen, J.M., Prieme, A., Pilegaard, K., Kjoller, A., 2001. Assessment of CH_4 and N_2O fluxes in a Danish beech (Fagus sylvatica) forest and adjacent N-fertilised barley (Hordeum vulgare) field: effects of sewage sludge amendments. Nutrient cycling in agroecosystems. 60: 15- 21.

Amlinger, F., Gotz, B., Dreher, P., Geszti, J., Weissteiner,C. 2003. Nitrogen in biowaste and yard waste compost : dynamics of mobilisation and availability-a review. European Journal of Soil Science. 39 : 107-116.

Amon, G., Aznar, O., Vollet, D. 2006. Why are some French farmers sludge-takers? Some agronomic and socioeconomic explanations. American Journal of Agricultural Ressources, Governace and Ecology. 5: 289-308.

Andriulo, A., Mary, B., Guerif, J. 1999. Modelling soil carbon dynamics with various cropping sequences on the rolling pampas. Agronomie. 19: 365- 377

Annabi, M., Houot, S., Francou, C., Poitrenaud, M., Le Bissonnais, Y. 2007. Soil aggregate stability improvement with urbain composts of different maturities. Soil Science Society of American Journal. 71: 413-423.

Annabi, M., Le Bissonnais, Y., Poitrenaud, M., Houot, S.2011. Improvement of soil aggregate stability by repeated applications of organic amendments to a cultivated silty loam soil. 2011. Agriculture, Ecosystems & Environment. 144: 382-389.

Antil, R.S., Bar-Tal, A., Fine, P., Hadas, A., Predicting nitrogen and carbon mineralization of composted manure and sewage sludge in soil. Compost science & utilization.19: 33-43.

APCA, 2007. Document interne : Caracérisation des boues comme fertilisants azotés organiques : Synthèse de résultats d'analyses disponibles auprès du réseau des missions "boues".

Arrouays, D., Deslais, W., Badeau, V. 2001. The carbon content for topsoil and its geographical distribution in France. Soil Use and Management. 17: 7-11.

Arrouays, D., Jolivet, C., Boulonne, L., Bodineau, G., Saby, N., Grolleau, E. 2002. A new intiative in France : a multi-institutional osil quality monitoring network. Comptes rendus de l'Academie d'Agriculture de France. 88:93-103.

Askri, A. 2011. Rapport de stage de Master 2. Modélisation de la décomposition des produits résiduaires organiques dans le sol : Reparamétrage du modèle STICS. UMR EGC.26p.

Aubry, C., 1995. Gestion de la sole d'une culture dans l'exploitation agricole. Cas du blé d'hiver en grande culture dans la région picarde. Thèse de Docteur de l'Insitut National Agronomique Paris Grignon, Sciences Agronomiques, INA-PG Paris, 271 p + annexes

Aubry, C., Paillat, J.M., Guerrin F., 2003. Conceptual modeling of the management of organic matter originating frim farms. The example of reunion island. A conference paper.

Aubry, C., Paillat, J.M., Guerrin F., 2006. A Conceptual representation of animal waste management at the farm scale: the case of reunion island. Agricultural systems. 88: 294- 315.

Aubry, C., Ramamonjisoa, J., Dabat, M.H., Rakotoarisoa, J., Rakotondraibe, J., Rabeharisoa, L. 2008. Urban agriculture in Antananarivo district (Madagascar): an inter-disciplinary approach. Natures Sciences Societies. 16: 23-35.

Aubry, C., Kebir, L. 2013. Shortening food supply chains : a way for maintening agriculture close to urban areas ? The cas of the French metropolitan areas of Paris. Food Policy. 41: 85-93.

Barbarick, K.A., Ippolito, J.A. 2007. Nutrient assessment of a dryland wheat agroecosystem after 12 years of biosolid applications. Agronomy Journal. 99:715-722.

Bastida, F., Kandeler, E., Moreni,J.L., Ros,M.,Garcia,C.,Hernandez,T. 2008. Long-term effect of municipal solid waste amendment on microbial abundance and humus-associated enzyme activities under semiarid conditions. Microbial Ecology 55: 651-661.

Beloso, M.C., M.,Villar, C., Cabaneiro,A., Carballas,M., Gonzalez-Pietro,S.J., Carballas,T. 1993. Carbon and nitrogen mineralization in an acid soil fertilized with composted urban refuses. *Bioressource Technology,* 45:123-129.

Beraud, J., Fine, P., Yermiyahu, U., Keinan, M., Rosenberg, R., Hadas, A., Bar-Tal, A. 2005. Journal of Environmental Quality. 34: 664-675.

Bertrand, F., Richard, E. 2010. Adaptation of the island territories: elements of reflection from two French islands (Re and Reunion). VertigO-La revue Electronique en Sciences de l'Environnement. 10: unpaginated.

Beaudoin, N., Launay, M., Sauboua, E., Ponsardin, G., Mary, B. 2008. Evaluation of the soil crop model STICS over 8 years against the "on farm" database of Bruyères catchment. Eur. J. Agron. 29: 46–57.

Biomasse Normandie, 2002. Evaluation des quantités actuelles et futures des déchets épandus sur les sols agricoles et provenance de certaines activités. Lot 3 : Effluents d'élevage.

Bonilla, N., Cazorla,F.M., Martinez-Alonso, J.J.,Gaju,N., Landa, B.B., De Vicente,A. 2012. Organic amendments and land management affect bacterial community composition, diversity and biomass in avocado crop soils." Plant and Soil 357(1-2): 215-226

Brisson, N., Mary, B., Ripoche, D., Jeuffroy, M.H., Ruget, F., Gate, P., Devienne-Barret, F., Antonioletti, R., Durr, C., Nicoullaud, B., Richard, G., Beaudoin, N., Recous, S., Tayot, X., Plenet, D., Cellier, P., Machet, J.M., Meynard, J.M., Delécolle, R., 1998. STICS : a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balance.I. Théory and parametrisation applied to wheat and corn. Agronomie. 18: 311- 346.

Brisson, N., Ruget, F., Gate, P., Lorgeou, J., Nicoullaud, B., Tayot, X., Plenet, D., Jeuffroy, M.H., Bouthier, A., Ripoche, D., Mary, B., Justes, E. 2002. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balance. II. Assessment by comparing with experimental reality for wheat and corn. Agronomie 22 : 69–93.

Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., Bussière, F., Cabidoche, Y.M., Cellier, P., Debaeke, P., Gaudillère, J.P., Hénault, C., Maraux, F., Seguin, B., Sinoquet, H. 2003. An overview of the crop model STICS. European Journal of Agronomy. 18: 309-332.

Bruun, S., Hansen, T.L., Christensen, T.H., Magid, J., Jensen, L.S. 2006. Application of processed organic solid waste on agricultural land- a scenario analysis. Environmental Modelling and Assessment: 251-265.

Businelli, D., Massaccesi, L., Said-Pullicino, D., Gigliotti, G. 2009. Long-term distribution, mobility and plant availability of compost-derived heavy metals in a landfill covering soil. Science oh the Total Environment. 407: 1426-1435.

Butler, F. 2012. Rapport d'étude : Actualisation des connaissances permettant d'objectiver les variabilités des périodes recommandées pour l'épandage des fertilisants azotées en France. 200 pages.

Cabrera, M.L., Kissel, D.E., Vigil, M.F. 2005. Nitrogen Mineralisation from Organic Residues: Research Opportunities. Journal of Environmental Quality. 34: 75-79

Capowiez, Y., Rault, M., Mazzia, C., Lhoutellier, C., Houot, S. 2009. Etude des effets des apports de produits résiduaires organiques sur la macrofaune lombricienne en conditions de grandes cultures. Etude et Gestion des Sols. 16: 175-185.

Caravaca, F., Figueroa, D., Alguacil, M.M., Roldán, A. 2003. Application of composted urban residue enhanced the performance of afforested shrub species in a degraded semiarid land. Bioresour. Technol. 90 : 65-70.

Cayuela, M.L., Oenema, O., Kuikman, P.J., Bakker, R.R., Van Groenigen, J.W. 2010. Bioenergy by-products as soil amendments? Implications for carbon sequestration and greenhouse gas emissions.GCB Bioenergy. 2: 201-213.

Cellier, A., Francou, C., Houot, S., Ballini, C., Gauqyelon, T.2012. Use of urban composts for the regeneration of a burnt mediterranean soil : a laboratory approach. Journal of Environmental Management. 95: 238-244

Chalhoub, M., Garnier, P., Coquet, Y., Mary, B., Lafolie, F., Houot, S.2013 (in press). Modelling the influence of compost organic matter characteristics on nitrogen dynamics in a regularly amended soil.

Charonnat, C., Deportes, I., Feix, I., Merillot, J.K. 2001. Approche de la qualité des composts de déchets en France. ADEME Editions, Paris.

Chéneby D., Nicolardot B., Godden.B., Penninckx M.1994. Mineralization of composted 15N-labelled farmyard manure during soil incubations. *Biological Agriculture and Horticulture,* 10, 255-264.

COMIFER, 2013. Calcul de la fertilisation azotée: Guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales.

Comifer, 2007. Teneurs en P, K et Mg des organes végétaux récoltables : Méthode d'établissement et valeurs de référence. www.comifer.asso.fr/images/stories/publications/livres/tablesexportgrillescomifer2009.pdf

Constantin, J., Beaudoin, N., Launay, M., Duval, J., Mary, B., 2012. Long-term nitrogen dynamics in various catch crop scenarios: Test and simulations with TSICS model in temperate climate. Agr. Ecos &Env 147 : 36–46

Corre-Hellou, G., Faure, M., Launay, M., Brisson, N., Crozat, Y. 2009. Adaptation of the STICS intercrop model to simulate crop growth and N accumulation in pea–barley intercrops. Field Crops Res. 113: 72–81

Diacono, M., Montemurro, F. 2009. Long-term effects of organic amendments on soil fertility. A review. Agron.Sustain.Dev. 30: 401-422.

Diène, J.2012. Rapport de stage : La cartographie des produits résiduaires organiques (PRO) dans la région de Dakar : cas des départements de Pikine et de Rufisque. Laboratoire d'Ecologie Microbienne des Sols et des systèmes tropicaux (LEMSAT). 129p.

Diez, T., Krauss, M., 1997. Effect of long term compost application on yield and soil fertility, Agrobiol. Res. 50:78–84

Donadieu, P., 1998. Campagnes urbaines. Actes Sud /ENSP.

Donadieu, P., Fleury, A. 2003. La construction contemporaine de la ville-campagne en Europe. Revue de Géographie Alpine Tome 1, n°4.

Doublet, J., Francou, C., Poitrenaud, M., Houot, S. 2010. Sewage sludge composting : influence of initial mixtures on organic mattr evolution and N availability in the final composts. Waste Management. 30: 1922- 1930.

Eghball, B., Gilley, J.E., Baltensperger, D.D., Blumenthal, J.J. 2002. Long-term manure and fertilizer application effects on phosphorus and nitrogen in runoff. Transactions of the ASAE. 45: 687-694.

Eghball, B., Ginting, D., Gilley, J.E. 2004. Residual effects of manure and compost applications on corn production and soil properties. Agronomy Journal. 96: 442-447.

Eriksen,G.N., Coaleand,F.J., Bollero,G.A. 1999. Soil nitrogen dynamics and maize production in municipal solid waste amended soil. *Agron. J.,* 91:1009-1016.

Fangueiro,D., Lopes.C., Surgy, S., Vansconcelos, E.2012. Effect of the pig slurry separation techniques on the characteristics and potential availability of N to plants in the resulting liquid and solid fractions. Biosystems Engineering. 113: 187-194.

Flénet, F., Villon, P., Ruget, F. 2004. Methodology of adaptation of the STICS model to a new crop: spring linseed (Linum usitatissimum L.). Agronomie. 24: 367–381

FIVAL. 2009. Etude de caractérisation des fumiers de cheval issus de centres équestres afin d'aider à la décision sur les possibilités de valorisation : rapport final.

Foley, B.J., Cooperband, L.R. 2002. Paper mill residuals and compost effects on soil carbon and physical properties. Journal of Environmental Quality. 31: 2086-2095.

http://france-inflation.com/graph_oil.php

Francou, C. 2003. Thèse de doctorat: Stabilisation de la Matière Organique au cours du Compostage de Déchets Urbains : Influence de la nature des déchets et du procédé de compostage - Recherche d'indicateurs pertinents. Soutenue à Agroparistech.

Gabrielle,B., Da Silveira,J., Houot,S., Francou,C.2004.Simulating urbain waste compost effects on Carbon and Nitrogen dynamics using a biochemical index.Journal of Environment quality. 33 : 2333- 2342.

Gabrielle,B. Da Silveira,J., Houot,S., Michelin,J.2005. Field scale modeling of carbon and nitrogen dynamics in soils amended with urban waste composts.Agriculture, Ecosystems & Environment. 110 : 289- 299.

Gagnon, B., Simard,R.R., Robitaille,R., Goulet ,M., Rioux,R.1997. Effect of composts and inorganic fertilizers on spring wheat growth and N uptake.Canadian journal of Frest Research.27:1263-1267.

Gagnon, B., Simard,R.R. 1999. Nitrogen and phosphorus release from on-farm and industrial materials. Canadian Journal of Soil Science. 79:201-210.

Garcia, F., Guerrin, F., Martin-Clouaire, R., Rellier, J.-P., 2005. The human side of agricultural production management: The missing focus in simulation approaches. Proc. Modsim 2005, Int. Congress on Modelling and Simulation, Advances and application for management and decision-making, Melbourne, Australia.

Garcia-Gil, J.C., Plaza,C.,Soler-Rovira,P., Polo,A.2000. Long-term effects of municipal solid waste compost application on soil enzyme activities and microbial biomass.Soil Biology & Biochemistry. 32: 1907-1913

Garnier, P., Neel, C., Aita, C., Recous, S., Lafolie, F., Mary, B. 2003. Modelling carbon and nitrogen dynamics in a bare soil with and without straw incorporation. European Journal of Soil Science. 54: 555-568.

Gavalda, D., Scheiner, J.D., Revel, J.C., Merlina, G., Kaemmerer, M., Pinelli, E., Guiresse, M. 2004. Agronomic and environmental impacts of a single applicatop, of heat-dried sludge on Alfisol.

Genermont, S., Cellier, P. 1997. A mechanistic model for estimating ammonia volatilization from slurry applied to bare soil. Agricultural and Forest Meteorilogy. 88: 145-167.

Gerke, H.H., Arning, M., Stoppler-Zimmer, H. 1999. Modelling long-term compost application effects on nitrate leaching. Plant and Soil. 213: 75-92.

Goulding, K.W.T., Poulton, P.R., Webster, C.P., Howe, M.T. 2000. Nitrate leaching from the Broadbeack wheat experiment, Rothamsted, UK, as influenced by fertilizer and manure inputs and the weather. Soil Use and Management. 16: 244-250.

Guerrin, F.2001. MAGMA: a simulation model to help manage animal wastes at the farm scale. Computers and Electronics in Agriculture. 33: 35-54.

Guerrin, F., Paillat, J.M. 2003. Modelling biomass fluxes and fertility transfers; Case of animal waste management on reunion Island.Seminar Proceedings, Montpellier, France.

Guerrin, F.2004.Simulation of stock control policies in a two-stage production system: application to pig slurry management involving multiple farms. Computers and Electronics in Agriculture. 45: 27-50.

Guivarch, A. 2001. Valeur fertilisante à court terme du phosphore des boues de stations d'épuration urbaines ? Thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Lorraine.

Gray, L.C., et Morant, P. 2003. Reconciling indigenous knowledge with scientific assessment of soil fertility changes in southwestern Burkina Faso. Geoderma. 111: 425- 437.

Grifin.T.S., Porter.G.A. 2004. Altering soil carbon and nitrogen stocks in intensively tilled two years rotations. Biol Fertil Soils. 39: 366-374.

Guerin, F. Paillat, J.M. 2003. Modélisation des flux de biomasse et des transferts de fertilité. Cas de la gestion des effluentes d'élevage à l'ile de la Réunion. Actes du séminaire de l'ATP 99/60, 2002/06/19-20 à Montpellier, France.

Gutser, R., Ebertseder, T., Weber, A., Schraml, M., Schmidhalter, U. 2005. Short term and residual availability of nitrogen after long term application of organic fertilizers on arable land. Journal of Plant nutrition and Soil Science.168: 439-446.

Hacala S., Bodet J.M., Aubert C.,Texier C., 2001. Fertiliser avec les engrais de ferme. Institut de l'Elevage, ITAVI, ITCF, ITP. 104p.Hadas,A. and Portnoy,R. 1994. Nitrogen and carbon mineralization rates of composted manures on incubated soil. *J. Environ. Qual.* 23:1184-1189.

Hadas, A. and Portnoy,R. 1997. Rates of decomposition in soil and release of available nitrogen from cattle manure and municipal waste composts. Compost science&Utilization. *5* :48-54.

Hansen, S., Jensen, H.E., Nielsen, N.E., Svendsen, H. 1991. Simulation of nitrogen dynamics and biomass production in winter wheat using the Danish simulation model DAISY. Fertilizer research. 27: 245-253.

Hargreaves, J.C., Sina Adl, M., Warman, P.R., Rusasinghe, H.P.V. 2008. The effects of organic and conventional nutrient amendments on strawberry cultivation: fruit yield and quality. Journal of the science of food and agriculture. 88:2669-2675.

Hartl, W., Erhart, E. 2005. Crop nitrogen recovery and soil nitrogen dynamics in a 10-year fiels experiment with biowaste compost. Journal of Plant Nutrition and soil science. 168:781-788.

Henin, S. and M. Dupuis. 1945. Essai de bilan de la matière organique du sol. *Annales agronomiques,*17-29.

Houlès, V. Mary, B. Guérif, M. Makowski, D. Justes, E. 2004. Evaluation of the ability of the crop model STICS to recommend nitrogen fertilisation rates according to agro-environmental criteria. Agronomie. 24 : 339–349

Houot, S., Clergeot D., Michelin J., Francou C., Bourgeois S., Caria G., Ciesielski H. 2002. Agronomic value and environmental impacts of urban composts used in agriculture. In *Microbiology of Composting*, H.Insam,N.Riddech,S.Klammer ed. (Springer-Verlag Berlin Heidelberg).457-472.

Houot, S., Da Silveira,J., Gabrielle B., Génermont S., Michelin J., Rampon J.N., and Le Villio-Poitrenaud M. 2003. N dynamics in a long term field experiment after 3 years of compost application: variation with compost origin. Paper presented at ORBIT.

Iakimenko,O., Ottabong,E., Sadovnikova,L., Persson J., Nilsson I., Orlov D., Ammosova Y. 1996. Dynamic transformation of sewage sludge and farmyard manure components.1.content of humic substances and mineralisation of organic carbon and nitrogen in incubated soils. Agriculture Ecosystems and Environment. 58:121-126.

INERIS, 2012. Etude comparative de la qualité de composts et de digestats issus de la fraction fermentiscible d'ordures ménagères, collectée séparement ou en mélange (Rapport Final)

Insee. 2007. Prix et couts de production de six grandes cultures: blé, mais, colza, tournesol, betterave et pomme de terre. L'agriculture, nouveaux défis.

Insee. 2009, http://www.insee.fr/fr/ppp/bases-de-donnees/recensement/populations-legales/francedepartements.asp?annee=2009

Institut de l'élevage, ITAVI, ITCF, ITP, 2001. Fertiliser avec les engrais de ferme.

ITAB, 2001 . Guide des matières organiques, Tome 2.

Jégo, G., Martinez, M., Antiguedad, I., Launay, M., SDanchez-Perez, J.M., Justes, .E. 2008. Evaluation of the impact of various agricultural practices on nitrate leaching under the root zone of potato and sugar beet using the STICS soil-crop model. Science of the total environment 394: 207-221.

Jégo, G., Pattey,, E., Bourgeois, G., Morrison, M.J., Drury, C.F., Tremblay, N., Tremblay, G. 2010. Calibration and performance evaluation of soybean and spring wheat cultivars using the STICS crop model in Eastern Canada. Field Crops Res. 117:183–196.

Jégo, G., Pattey, E., Bourgeois, G., Drury, C.F., Tremblay, N. 2012.Evaluation of the STICS crop growth model with maize cultivar parameters calibrated for Eastern Canada. Agronomy.Syst.Developm. 31: 557-570

Joncoux, S., 2013. Thèse de doctorat : Les « produits résiduaires organiques pour une intensification écologique de l'agriculture : ressources, décehts, ou produits. Sociologie des formats de valorisation agricole. Soutenue à l'université Toulouse 2 Le Mirail.

Jousseaume, D. 2011. Rapport de stage de M2. Evolution des stocks de carbone dans des systèmes de culture incluant le recyclage des produits résiduaires organiques : paramétrage du modèle AMG. UMR EGC. 48p.

Justes. E., Mary. B., Nicolardot. B., 2009. Quantifying and modelling C and N mineralisation kinetics of catch crop residues in soil: parameterization of the residue decomposition module of STICS model for mature and non mature residues. Plant soil. 325: 171-185.

Kallenbach, C., Grandy. 2011. Controls over soil microbial biomass responses to carbon amendments in agricultural systems: a meta-analysis. Agriculture, Ecosystems&Environment. 144:241-252.

Kanal, A. and Kuldkepp, P. 1993. Direct and residual effect of different organic fertilizers on potato and cereals. J. Agronomy & crop science. 171:185-195.

Khaleel, R., Reddy, K.R., Overcash, M.R. 1981. Changes in soil physical properties due to organic waste applications: a review. Journal of Environmental Quality.10: 133-141.

Kleber, M., Nikolaus, P., Kuzyakov, Y., Stahr, K. 2000. Formation of mineral N (NH_4^+, NO_3^-) during mineralization of organic matter from coal refuse material and municipal sludge. Journal of Plant nutrition and Soil Science. 163: 73-80.

Kunito, T., Saeki, K., Goto, S., Hayashi, H., Oyaizu, H., Matsumoto, S. 2001. Copper and Zinc fractions affecting microorganisms in long-term sludge-amended soils. Bioresource Technology. 79:135-146.

Lashermes, G. 2005. Rapport de stage de Master 2. Etude et modélisation de la décomposition dans le sol des produits résiduaires organiques.54p.

Lashermes, G., Nicolardot, B., Parnaudeau, V., Thuriès, L., Chauddos, R., Guillotin, M.L., Lineres, M., Mary, B., Metzeger, L., Morvan, T., Tricaud, A., Villette, C., Houot, S. 2009. Indicator of potential residual carbon in soils after exogenous organic matter application. European Journal of Soil Science. 60:297-310.

Lashermes, G., Nicolardot, B., Parnaudeau, V., Thuriès, L., Chauddos, R., Guillotin, M.L., Lineres, M., Mary, B., Metzeger, L., Morvan, T., Tricaud, A., Villette, C., Houot, S. 2009. Typology of exogenous organic matters based on chemical and biochemical composition to predict potential nitrogen mineralization.Bioresource technology. 101:157-164.

Latour, B., 1993. Petites leçons de sociologie des sciences. Paris, La Découverte

Laville, P., Michelin, J., Houot, S., Gueudet, J.C., Rampon, J.N., Labat, C., Vaudour, E. 2013. Soil N_2O emission from recovered organic waste application in Versailles Plain (France) : A laboratory approach. Waste Biomass Valor. Published online

Leclerc B. 2001. Guide des matières organiques. (eds Guide Technique de l'ITAB),

Leclerc, B., Plumail, D., Chenon, P. 2008. Production et qualité des composts de boues en France métropolitaine. Echo-MO. 78. 8 pages.

Lei Meng., Weixin Ding., Zucong Cai. 2005. Long-term application of organic manure and nitrogen fertilizer on N_2O emissions, soil quality and crop production in a sandy loam soil. Soil Biology&Biochemistry. 37: 2037-2045

Lemaire, G., Gastal, F., 1997. Nitrogen uptake and distribution in plant canopies. In: Lemaire, G. (Ed.), Diagnosis of the Nitrogen Status in Crop. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, pp. 3–43

Leyval, C., Steinberg, C., Norini, M.P., Beguiristain, T., Edel-Hermann, V., Leglize, P., Gautheron, N., Lebeau, T., Houot, S. 2009. Impact d'amendements organiques sur la structure des communautés microbiennes des sols: Choix des methods, validation et resultants. Etude et Gestion des Sols. 16 : 299-312.

Le Villio, M., D. Arrouays, W. Deslais, J. Daroussin, Y. Le Bissonnais, and D. Clergeot. 2001a. 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,47-63.

Linères, M. and J. L. Djakovitch. 1993. Caractérisation de la stabilité biologique des apports organiques par analyse biochimique. Matières organiques et agriculture. Actes des 4èmes journées du GEMAS et du 5ème forum du COMIFER. Blois, France. Ed. Decroux et Ignazi,159-168.

Loubet, B., Genermont, S., Ferrara, R., Bedos, C., Decuq, C., Personne, E., Fanucci, O., Durand, B., Rana, G., Cellier,P. 2010. An inverse model to estimate ammonia emissions from field. European journal of Soil Science. 61:793-805.

Loveland, P., Webb, J. 2002. Is there a critical level of organic matter in the agricultural soils of temperate regions: a review. Soil & Tillage Research. 70 : 1–18.

Lupton, S., 2005. Shared quality uncertainty and the introduction of indeterminate goods. Cambridge *Journal of Economics*, vol. 29, n° 3, pp. 399-421.

Machado, D., Sarmiento, L., Gonzalez-Prieto, S. 2010. The use of organic substrates with contrasting C/N ratio in the regulation of nitrogen use efficiency and losses in potato agroecosystem. Nutrient Cycling in Agroecosystems. 88: 411-427.

Mallory, E.B., Griffin, T.S. 2007. Impacts of soil amendment history on nitrogen availability from manure and fertilizer. Soil Biology&Biochemistry. 71:964-973.

Mamo, M., Rosen C.J., Halbach T.R. 1999. Nitrogen avaibility and leaching from soil amended with municipal solid waste compost. J. Environ. Qual. 28:1074-1082.

Mandal, B., Majumder, B., Bandyopadhyay, P.K., Hazra, G.C., Gangopadhyay, A., Samantaray, R.N., Mishra, A.K., Chaudhury, J., Saha, M.N., Kundu, S. 2007. The potential of cropping systems and soil amendments for carbon sequestration in soils under long-term experiments in subtropical India. Global Change Biology. 13: 357-369.

Ministère de l'Energie, du Développement Durable et de la Mer (MEEDDM). 2009. Bilan de dix années d'application de la réglementation relative à l'épandage de boues issues du traitement des eaux usées.

Moller, K., Muller, T. 2012. Effects of anaerobic on digestate nutrient availability and crop growth : a review. Engineering in Life Sciences. 12: 242-257.

Morel, C., Lineres, M., Guivarch, A., Kvarnstrom, E., Parnaudeau, V., Nicolardot, B., Morel, J.L. 2003. Phytodisponibilité et valeur fertilisante du phosphore de déchets urbains. Les dossiers de l'environnement de l'INRA. 25 : 35-44.

Morvan, T., Nicolardot, B., Pean, L. 2006. Biochemical composition and kinetics of C and N mineralization of animal wastes: a typological approach. Biology and Fertility of Soils. 42:513-522.

Mougeot, L., Moustier, P. 2004. Développement durable de l'agriculture urbaine en Afrique Francophone. Enjeux, concepts et méthodes. Canada.CRDI. 1-173

Muller, T., Hoper, H. 2004. Soil organic matter turnover as a function of the soil clay content: consequences for model applications. Soil Biology&Biochemistry. 36:877-888.

Nardi, S., Morari, F., Berti, A., Tosoni, M., Giardini, L. 2004. Soil organic properties after 40 years of different use of organic and mineral fertilisers. European Journal of Agronomy. 21: 357- 367.

N'Dienor, M. (2006). Fertilité et gestion de la fertilisation dans les systèmes maraîchers périurbains des pays en développement : intérêts et limites de la valorisation agricole des déchets urbains dans ces systèmes, cas de l'agglomération d'Antananarivo (Madagascar). Thèse de Doctorat, Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris.

Nevens, F., Reheul, D. 2003. The application of vegetable, fruit and garden waste (VFG) compost in addition to cattle slurry in a silage maize monoculture: nitrogen availability and use. European Journal of Agronomy. 19: 189-203.

Nicolardot, B., Recous, S., Mary, B. 2001. Simulation of C and N mineralisation during crop residue decomposition: A simple dynamic model based on the C:N ratio of the residues. Plant and Soil. 228: 83–103.

ORDIF, 2006. Rapport sur l'observation environnementale de la gestion des déchets ménagers et assimilés en Ile-de-France.

Ojeda, G., Alcaniz, J.M., Le Bissonnais, Y. 2008. Differences in aggregate stability due to various sewage sludge treatments on Mediterranean calcareous soil. Agriculture, Ecosystems & Environment. 125: 48-56.

Padioleau, J., 1982. L'Etat au concret. Paris, L'Harmattan.

Parnaudeau, V., Nicolardot, B., Pages, J. 2004. Relevance of organic matter fractions as predicators of wastewater sludge mineralization in soil. J.Environ.Qual. 33: 1885-1894.

Parnaudeau, V., Nicolardot, B., Robert, P., Alavoine, G., Pages, J., Duchiron, F. 2006. Organic matter characteristics of food processing industry wasterwaters affecting their C an N mineralization in soil incubation. Bioresource Technology. 97: 1284-1295.

Parnaudeau, V., Robert, P., Nicolardot, B. 2009. Measured and simulates nitrogen fluxes after field application of food-processing and municipal organic wastes. J.Environ.Qual. 38: 268-280.

Paschold, J.S., Wienhold, B.J., Mcallister, D.L., Ferguson, R.B. 2008. Crop nitrogen and phosphorus utilization following application of slurry from swine fed traditional or law phytate corn diets. Soil Science Society of American Journal. 72: 1096-1101.

Peltre, C., Christensen, B.T., Dragon, S., Icard, C., Katterer, T., Houot, S. 2012. RothC simulation of carbon accumulation in soil after repeated application of widely different organic amendments. Soil Biology&Biochemistry. 52:49-60.

Peretti-Water, P. 2000. Sociologie du risque. Paris, A Colin.

Poquet G. 2001. Nouveau regard dans nos poubelles , CREDOC, n° 152, juillet.

Poulot, M. 2008. Des territoires de projet en périurbain : les programmes agri-urbains. In Historiens et Géographes. 403 : 159-172.

Ramahefarison, H. 2011. Thèse de doctorat: *Amélioration des pratiques de compostage et de l'utilisation des matières compostées dans les systèmes de production en zone péri-urbaine*. Soutenue à l'université d'Antananarivo.

Reeves, D.W. 1997. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. Soil Tillage Res. 43 : 131–167.

Ritchie, J.T., et Otter, S. 1984. Ceres wheat : a user-oriented wheat yield model.Preliminary documentation. Agristars Publ. N°YM-U3-04442-JSC-18892.

Rodriguez, J.C., Duchemin, B., Hadria, R., Watts, C., Garatuza, J., Chehbouni, A., Khabba, S., Boulet, G., Palacios, E., Lahrouni, A. 2004. Wheat yield estimation using remote sensing and the STICS model in the semiarid Yaqui valley, Mexico. Agronomie. 24: 295-304.

Ros, M., Klammer, S., Knapp, B., Aichberger, K., Insam, H. 2006. Long-term of compost amendment of soil on functional and structural diversity and microbial activity. Soil Use and Management. 22: 209-218.

Saffih-Hdadi,K., Mary,B. 2008. Modeling consequences of straw residues export on soil organic carbon. Soil Biology&Biochemistry. 40:594-607.

Sanchez,L., Diez,J.A., Polo,A., and Roman,R.. 1997. Effect of timing of application of municipal solid waste compost on N availibility for crops in central spain. *Biol. Fertil. Soils.*25:136-141.

Saviozzi, A., Biasci, A., Riffaldi, R., Levi-Minzi, R. 1999. Long-term effect of farmyard manure ans sewage sludge on some soil biochemical characteristics. Biology and Fertility of Soils. 30: 100-106.

Schlegel, A.J. 1992. Effect of composted manure on soil chemical properties and nitrogen use by grain sorghum. Journal of Production Agriculture. 5: 153-157.

Sebillotte, M. 1978. Itinéraires techniques et évolution de la pensée agronomique. C.R.Acad.Agric,Fr. 64: 906-914.

Sebillotte, M. 1990. Système de culture : un concept opératoire pour les agronomes. In les systèmes de culture, L.Combe, D.Picard (Eds.), INRA, Paris.165-196.

Siebert, S., Leifield, J., Kogel-Knabner, I. 1998. Nitrogen mineralization of biowaste compost with different maturity after application on arable and recultivated soils. Journal of Environmental Engineering and Land development. 39:69-74.

Sierra, J., Brisson, N., Ripoche, D., Noel, C. 2003. Application of the STICS crop model to predict nitrogen availability and nitrate transport in a tropical acid soil cropped with maize. Plant and soil. 256: 333-345.

Sikora,L.J. and Yakovchenko,V. 1996. Soil organic matter mineralization after compost amendment. *Soil Sci.Soc.Am. J.* 60:1401-1404.

Silva-Leal, J., Torres-Lozada, P., Cardoza, Y.J. 2013. Thermal drying and alkaline treatment of biosolids: effects on nitrogen mineralization. Clean Soil Air Water. 41: 298-303.

Singh, M.V., Manna, M.C., Wanjari, R.H., Singh, Y.V., Rajput, G.S. 2003. Organic pools and dynamics in relation to land use, tillange and agronomic practices for maintenance of soil fertility. IISS, Bhopal. 19:1-92

Susanne, A., Michelle, M.W. 1998. Long-term trends of corn yield and soil organic matter in different crop sequences and soil fertility treatments on the Morrow Plot. Adv. Agron. 62: 153–197.

Tarrason, D., Ojeda, G., Ortiz, O., Alcaniz, J.M. 2008. Differences on nitrogen availability in a soil amended with fresh, composted and thermally-dried sewage sludge. Bioresources Technology. 99: 252-259.

UNIFA, 2009. Evolution de la fertilisation en France et bilans régionaux depuis 20 ans.

Van Soest, P.J. 1963. Use of detergents in the analysis of fibrous feeds: II. A rapid method for the determination of fibre and lignin. J. Assoc. Off.Anal. Chem. 46:829–835.

Van Soest, P. J. and R. H. Wine. 1967. Use of detergents in the analysis of fibrous feeds. IV. Determination of plant cell-wall constituents. Journal of A.O.A.C., 50, 1:50-55.

Vayssieres, J., Lecomte, P. 2007. Modelling decisional practices and nitrogen flows at the whole farm scale: the case of dairy farming on a tropical island. Conference paper : 14emes rencontres autour des recherché sur les ruminants, Paris. 45-48.

Véron, J. 2007. La moitié de la population mondiale vit en ville. *Population et Sociétés*, n° 435, juin 2007, INED, 1-4.

Villar, M.C., González-Prieto, S.J., Carballas, T. 1998. Evaluation of three organic wastes for reclaiming burnt soils: improvement in the recovery of vegetation cover and soil fertility in pot experiments. Biol. Fertil. Soils. 26: 122-129.

Von Fragstein, P., Schmidt, H. 1999. External N sources in an organic stockless crop rotation-usefull or useless additives?. Designing and testing crop rotations for organic farming. Proceedings from an international workshop. 203-211.

Zhang, M., Heaney, D., Henriquez, B., Solberg, E., Bittner, E. 2006. A four-year study on influence of biosolids/MSW cocompost application in less productive soils in Alberta: nutrient dynamics. Compost Sci.Util. 14:68-80.

Zhao, F.J. Rooney, C.P., Zhang, H., Mc Grath, S.P. 2006. Comparaison of soil solution speciation and diffusive gradients in thin-films measurements as an indicator of copper bioavailability to plants.Environ.Toxicol.Chem. 25:733-742.

Ziegler, D., Heduit, M. 1991. Engrais de ferme, valeur fertilisante, gestion et environnement. ITCF, ITP, ITEB, France, 35 pages.

ANNEXES

Annexe 3.1 : Rendements obtenus par les agriculteurs des différentes successions de culture et ITK de la succession colza/blé/mais/blé

Tableau 3.1 : Rendements obtenus par les agriculteurs des différentes successions de culture

Type de succession	**Successions**	**Rendements agriculteurs (tMS/ha)**			
		Culture 1	**Culture 2**	**Culture 3**	**Culture 4**
M + 2 Céréales	M/B/ Escourgeon	9	8	6,5	
	M/B/B	9	8	8	
C + 2 Céréales	C/B/ Escourgeon	4,5	9	6,5	
	C/B/B	4,5	9	8	
	C/Escourgeon /B	4,5	6,5	8	
C + 3 Céréales	C/B/B/ O printemps	4,5	9	8	4,5
	C/B/ O printemps /B	4,5	9	4,5	8
	C/ O printemps / Escourgeon / Escourgeon	4,5	4,5	6,5	6,5
	C/B/B/B	4,5	9	8	8
	C/B/ O printemps / Escourgeon	4,5	9	4,5	6,5
M + 3 Céréales	M/B/B/ O printemps	9	8	8	4,5
	M/B/ O printemps /B	9	8	4,5	8
	M/Escourgeon / O printemps / Escourgeon	9	6,5	4,5	6,5
	M/B/B/B	9	8	8	8
	M/B/ O printemps/ Escourgeon	9	9	4,5	6,5
C-Céréale-M-Céréale	C/B/M/B	4,5	9	9	8
	C/B/M/ Escourgeon	4,5	9	9	6,5
Monocultures	B/B	8			
	Escourgeon /B	6,5	8		
	Escourgeon / Escourgeon	6,5			
	M/M	9			

Tableau 3.2 : Itinéraire technique de la succession colza/blé/mais/blé

Pratique	**Culture**	**Dates**	**Dose N**	**Nature Apport N**
Labour	COLZA	20/08		
Semis		31/08		
Fertilisation : Apport 1		1402	75	Liquide (39-0-0)
Fertilisation : Apport 2		14/03	75	Liquide (39-0-0)
Récolte/Déchaumage		14/07		
« semis »	REPOUSSES COLZA	17/07		
Destruction/Déchaumage		14/10		
Semis	BLE	21/10		
Fertilisation : Apport 1		14/02	55	Liquide (39-0-0)
Fertilisation : Apport 2		14/03	85	Liquide (39-0-0)
Fertilisation : Apport 3		14/04	30	Liquide (39-0-0)
Récolte/Déchaumage		30/08		
« semis »	MOUTARDE	01/09		
Destruction/Déchaumage		15/01		
Semis	MAIS	15/04		
Fertilisation : Apport 1		15/04	80	Liquide (39-0-0)
Fertilisation : Apport 2		15/05	50	Liquide (39-0-0)
Récolte/Déchaumage		15/11		
Semis	BLE	21/10		
Fertilisation : Apport 1		14/02	60	Liquide (39-0-0)
Fertilisation : Apport 2		14/03	100	Liquide (39-0-0)
Fertilisation : Apport 3		14/04	30	Liquide (39-0-0)
Récolte/Déchaumage		30/08		

Annexe 5.1 : Tableau des rendements, CAU, Keq , bilan N minéral et organique des scénarios testés

5.1.1. Scénarios sur sol pauvre en Norg

5.1.1.1. Rendements

Tableau 5.1 : Rendements, CAU et Keq des différents scénarios

	devenir des pailles du précédent cultural	nom_plt	PRO fertilisant	PRO amendant	Apport total Norg	Apport engrais	Rendements grains	Rendements tiges	Qt d'azote prélevé par la plante	C/N résidus de culture	CAU	Keq
					Kg N/ha		tMS/ha		Kg N/ha			
Témoin non fertilisé	enfouies	colza	0	0	0	0	3,7	5,4	162	243	-	-
	enfouies	blé	0	0	0	0	4,1	5,1	88	62	-	-
	enfouies	maïs	0	0	0	0	7,8	6,9	175	98	-	-
	enfouies	blé	0	0	0	0	2,6	3,2	41	82	-	-
Témoin fertilisé	enfouies	colza	0	0	0	150,0	5,2	7,6	265	191	0,7	-
	enfouies	blé	0	0	0	170,0	8,4	11,5	225	49	0,8	-
	enfouies	maïs	0	0	0	130,0	9,1	8,1	278	72	0,8	-
	enfouies	blé	0	0	0	190,0	6,5	7,6	184	46	0,8	-
Témoin 0 Exportation résidus	enfouies	colza	0	0	0	0	3,3	4,8	154	240	-	-
	enfouies	blé	0	0	0	0	3,9	4,8	81	63	-	-
	enfouies	maïs	0	0	0	0	7,0	6,2	150	102	-	-
	enfouies	blé	0	0	0	0	2,6	3,2	43	79	-	-
Témoin fertilisé Exportation résidus	enfouies	colza	0	0	0	150,0	4,9	7,2	250	183	0,6	-
	enfouies	blé	0	0	0	170,0	8,4	11,0	220	50	0,8	-
	enfouies	maïs	0	0	0	130,0	8,9	7,9	253	78	0,8	-
	enfouies	blé	0	0	0	190,0	5,9	6,9	168	46	0,7	-
Humival	enfouies	colza	Humival	0	170,0	0	4,4	6,5	199	222	0,2	0,3
	enfouies	blé	Humival	0	170,0	0	7,0	8,9	156	57	0,4	0,5
	enfouies	maïs	Humival	0	170,0	0	8,5	7,6	263	71	0,5	0,7
	enfouies	blé	Humival	0	170,0	0	5,5	6,4	138	52	0,6	0,8

Boues	enfouies	colza	Boues	0	170,0	0	5,5	8,0	248	215	0,5	0,7
	enfouies	blé	Boues	0	170,0	0	8,3	10,9	177	62	0,5	0,6
	enfouies	maïs	Boues	0	170,0	0	8,4	7,5	258	71	0,5	0,6
	enfouies	blé	Boues	0	170,0	0	7,8	10,1	178	57	0,8	1,1
Compost FC	enfouies	colza	0	Compost FC	170,0	0	4,0	5,8	174	242	0,1	0,1
	enfouies	blé	0	Compost FC	170,0	0	4,7	5,7	104	59	0,1	0,1
	enfouies	maïs	0	Compost FC	170,0	0	7,9	7,0	185	94	0,1	0,1
	enfouies	blé	0	Compost FC	170,0	0	2,4	2,9	41	77	0,0	0,0
FC pailleux	enfouies	colza	0	FC pailleux	170,0	0	3,2	4,6	138	234	-0,1	-0,2
	enfouies	blé	0	FC pailleux	170,0	0	3,7	4,5	75	64	-0,1	-0,1
	enfouies	maïs	0	FC pailleux	170,0	0	7,0	6,2	158	98	-0,1	-0,1
	enfouies	blé	0	FC pailleux	170,0	0	2,5	3,1	43	77	0,0	0,0
Compost DV	enfouies	colza	0	Compost DV	170,0	0	3,9	5,7	167	244	0,0	0,0
	enfouies	blé	0	Compost DV	170,0	0	4,4	5,3	94	61	0,0	0,0
	enfouies	maïs	0	Compost DV	170,0	0	7,7	6,8	178	96	0,0	0,0
	enfouies	blé	0	Compost DV	170,0	0	2,4	2,9	45	69	0,0	0,0
Compost FC - RC	enfouies	colza	0	Compost FC	170,0	0	3,6	5,3	159	235	0,0	0,0
	Export	blé	0	Compost FC	170,0	0	4,7	5,8	104	60	0,1	0,1
	enfouies	maïs	0	Compost FC	170,0	0	8,0	7,1	191	92	0,1	0,1
	Export	blé	0	Compost FC	170,0	0	2,4	2,9	41	77	0,0	0,0
Boues + Compost FC	enfouies	colza	Boues	Compost FC	340,0	0	5,8	8,5	266	213	0,3	0,4
	enfouies	blé	Boues	Compost FC	340,0	0	9,2	12,1	201	60	0,3	0,4
	enfouies	maïs	Boues	Compost FC	340,0	0	8,4	7,5	261	71	0,3	0,3
	enfouies	blé	Boues	Compost FC	340,0	0	9,0	12,5	227	52	0,5	0,7
Boues + Compost FC -RC	enfouies	colza	Boues	Compost FC	340,0	0	5,5	8,0	252	242	0,3	0,4
	Export	blé	Boues	Compost FC	340,0	0	9,1	12,1	201	59	0,3	0,4
	enfouies	maïs	Boues	Compost FC	340,0	0	8,3	7,4	258	90	0,2	0,3

	Export	blé	Boues	Compost FC	340,0	0	8,6	11,8	213	75	0,5	0,7

5.1.1.2. Bilan azote minéral:

Tableau 5.2: termes d'entrées du bilan N minéral

	devenir des pailles du précédent cultural	nom_plt	teneur en azote organique du sol	quantité d'apport de PRO fertilisant	quantité d'apport de PRO amendant	Apport total Norg	Apport engrais	N pluie	N minéral PRO	minéralisation nette des PRO	minéralisation nette des résidus de culture	minéralisation nette du Norg du sol	stock d'azote minéral initial du sol
			%	tMF/ha	tMF/ha	kgNtot/ha	kgN/ha	kgN/ha	kgN/ha	kgN/ha	kgN/ha	kgN/ha	kgN/ha
Témoin 0	enfouies	colza	0,088	0	0	0	0	14	0	0	-18	149	20
	enfouies	repousses	0,088	0	0	0	0	4	0	0	-26	55	5
	enfouies	blé	0,088	0	0	0	0	14	0	0	57	96	5
	enfouies	Blé+ repousses	0,088	0	0	0	0	18	0	0	31	151	5
	enfouies	CI	0,088	0	0	0	0	4	0	0	7	33	82
	enfouies	Maïs	0,088	0	0	0	0	13	0	0	69	101	35
	enfouies	Maïs + repousses	0,088	0	0	0	0	17	0	0	76	134	82
	enfouies	blé	0,088	0	0	0	0	14	0	0	-29	110	13
Témoin fertilisé	enfouies	colza	0,088	0	0	0	150,0	14	0	0	-1	144	20
	enfouies	repousses	0,088	0	0	0	0,0	4	0	0	-32	55	5
	enfouies	blé	0,088	0	0	0	170,0	14	0	0	121	90	5
	enfouies	Blé+ repousses	0,088	0	0	0	170,0	18	0	0	89	145	5
	enfouies	CI	0,088	0	0	0	0,0	4	0	0	10	33	147
	enfouies	Maïs	0,088	0	0	0	130,0	13	0	0	126	100	76
	enfouies	Maïs + repousses	0,088	0	0	0	130,0	17	0	0	136	133	147
	enfouies	blé	0,088	0	0	0	190,0	14	0	0	43	96	67
Témoin 0 Exportation résidus	enfouies	colza	0,088	0	0	0	0	14	0	0	-24	140	20
	enfouies	repousses	0,088	0	0	0	0	4	0	0	-24	52	5
	enfouies	blé	0,088	0	0	0	0	14	0	0	36	95	4
	enfouies	Blé+ repousses	0,088	0	0	0	0	18	0	0	12	147	5
	enfouies	CI	0,088	0	0	0	0	4	0	0	5	33	67
	enfouies	Maïs	0,088	0	0	0	0	13	0	0	56	98	30
	enfouies	Maïs + repousses	0,088	0	0	0	0	17	0	0	61	131	67
	enfouies	blé	0,088	0	0	0	0	14	0	0	-30	106	20
Témoin fertilisé Exportation résidus	enfouies	colza	0,088	0	0	0	150,0	14	0	0	-4	138	20
	enfouies	repousses	0,088	0	0	0	0,0	4	0	0	-31	55	35
	enfouies	blé	0,088	0	0	0	170,0	14	0	0	79	90	35
	enfouies	Blé+ repousses	0,088	0	0	0	170,0	18	0	0	48	145	35
	enfouies	CI	0,088	0	0	0	0,0	4	0	0	8	33	243
	enfouies	Maïs	0,088	0	0	0	130,0	13	0	0	96	98	199
	enfouies	Maïs + repousses	0,088	0	0	0	130,0	17	0	0	104	131	243
	enfouies	blé	0,088	0	0	0	190,0	14	0	0	14	94	183
Humival	enfouies	colza	0,088	3,7	0	170,0	0	14	2	35	-1	136	20
	enfouies	repou	0,088	0	0	0,0	0	4	0	11	-32	56	5

		sses											
	enfouies	blé	0,088	3,7	0	170,0	0	14	2	45	121	93	6
	enfouies	Blé+ repou sses	0,088	3,7	0	170,0	0	18	2	56	89	149	5
	enfouies	CI	0,088	0	0	0,0	0	4	0	19	10	33	123
	enfouies	Maïs	0,088	3,7	0	170,0	0	13	2	71	126	97	51
	enfouies	Maïs + repou sses	0,088	3,7	0	170,0	0	17	2	90	136	130	123
	enfouies	blé	0,088	3,7	0	170,0	0	14	2	96	43	93	53
Boues	enfouies	colza	0,088	2,7	0	170,0	0	14	6	76	-1	141	20
	enfouies	repou sses	0,088	0	0	0,0	0	4	0	-6	-32	57	5
	enfouies	blé	0,088	2,7	0	170,0	0	14	6	42	121	90	4
	enfouies	Blé+ repou sses	0,088	2,7	0	170,0	0	18	6	36	89	147	5
	enfouies	CI	0,088	0	0	0,0	0	4	0	4	10	33	98
	enfouies	Maïs	0,088	2,7	0	170,0	0	13	6	74	126	97	40
	enfouies	Maïs + repou sses	0,088	2,7	0	170,0	0	17	6	78	136	130	98
	enfouies	blé	0,088	2,7	0	170,0	0	14	6	90	43	90	58
Compost FC	enfouies	colza	0,088	0	18,9	170,0	0	14	1	9	-1	137	20
	enfouies	repou sses	0,088	0	0	0,0	0	4	0	4	-32	57	5
	enfouies	blé	0,088	0	18,9	170,0	0	14	1	-35	121	96	5
	enfouies	Blé+ repou sses	0,088	0	18,9	170,0	0	18	1	-31	89	153	5
	enfouies	CI	0,088	0	0	0,0	0	4	0	2	10	33	96
	enfouies	Maïs	0,088	0	18,9	170,0	0	13	1	-31	126	102	42
	enfouies	Maïs + repou sses	0,088	0	18,9	170,0	0	17	1	-29	136	135	96
	enfouies	blé	0,088	0	18,9	170,0	0	14	1	-47	43	103	30
FC pailleux	enfouies	colza	0,088	0	17,5	170,0	0	14	0	-40	-1	152	20
	enfouies	repou sses	0,088	0	0	0,0	0	4	0	16	-32	52	5
	enfouies	blé	0,088	0	17,5	170,0	0	14	0	-96	121	116	5
	enfouies	Blé+ repou sses	0,088	0	17,5	170,0	0	18	0	-80	89	168	5
	enfouies	CI	0,088	0	0	0,0	0	4	0	-5	10	39	83
	enfouies	Maïs	0,088	0	17,5	170,0	0	13	0	-87	126	128	37
	enfouies	Maïs + repou sses	0,088	0	17,5	170,0	0	17	0	-92	136	167	83
	enfouies	blé	0,088	0	17,5	170,0	0	14	0	-73	43	119	27
Compost DV	enfouies	colza	0,088	0	14	170,0	0	14	3	2	-1	137	20
	enfouies	repou sses	0,088	0	0	0,0	0	4	0	3	-32	56	5
	enfouies	blé	0,088	0	14	170,0	0	14	3	-60	121	99	5
	enfouies	Blé+ repou sses	0,088	0	14	170,0	0	18	3	-57	89	155	5
	enfouies	CI	0,088	0	0	0,0	0	4	0	-3	10	34	85
	enfouies	Maïs	0,088	0	14	170,0	0	13	3	-49	126	109	37
	enfouies	Maïs + repou sses	0,088	0	14	170,0	0	17	3	-52	136	143	85
	enfouies	blé	0,088	0	14	170,0	0	14	3	-54	43	111	26
Compost FC - RC	enfouies	colza	0,088	0	18,9	170,0	0	14	1	18	-24	138	20
	enfouies	repou sses	0,088	0	0	0,0	0	4	0	1	-24	53	5
	Export	blé	0,088	0	18,9	170,0	0	14	1	40	36	94	5
	Export	Blé+ repou sses	0,088	0	18,9	170,0	0	18	1	41	12	147	5
	enfouies	CI	0,088	0	0	0,0	0	4	0	8	5	32	84

	enfouies	Maïs	0,088	0	18,9	170,0	0	13	1	48	56	99	38
	enfouies	Maïs + repousses	0,088	0	18,9	170,0	0	17	1	56	61	131	84
	Export	blé	0,088	0	18,9	170,0	0	14	1	28	-30	101	29
Boues + Compost FC	enfouies	colza	0,088	2,7	18,9	340,0	0	14	7	94	-1	140	20
	enfouies	repousses	0,088	0	0	0,0	0	4	0	-6	-32	57	5
	enfouies	blé	0,088	2,7	18,9	340,0	0	14	7	81	121	89	5
	enfouies	Blé+ repousses	0,088	2,7	18,9	340,0	0	18	7	75	89	146	5
	enfouies	CI	0,088	0	0	0,0	0	4	0	12	10	33	113
	enfouies	Maïs	0,088	2,7	18,9	340,0	0	13	7	117	126	99	45
	enfouies	Maïs + repousses	0,088	2,7	18,9	340,0	0	17	7	129	136	132	113
	enfouies	blé	0,088	2,7	18,9	340,0	0	14	7	149	43	83	101
Boues + Compost FC -RC	enfouies	colza	0,088	2,7	18,9	340,0	0	14	7	104	-24	139	20
	enfouies	repousses	0,088	0	0	0,0	0	4	0	-10	-24	55	5
	Export	blé	0,088	2,7	18,9	340,0	0	14	7	145	36	87	5
	Export	Blé+ repousses	0,088	2,7	18,9	340,0	0	18	7	135	12	142	5
	enfouies	CI	0,088	0	0	0,0	0	4	0	19	5	32	88
	enfouies	Maïs	0,088	2,7	18,9	340,0	0	13	7	176	56	94	37
	enfouies	Maïs + repousses	0,088	2,7	18,9	340,0	0	17	7	195	61	126	88
	Export	blé	0,088	2,7	18,9	340,0	0	14	7	189	-30	81	86

Tableau 5.3: termes de sorties du bilan N minéral

	devenir des pailles du précédent cultural	nom_plt	teneur en azote organique du sol	quantité d'apport de PRO fertilisant	quantité d'apport de PRO amendant	Apport total Norg	quantité d'azote dans les grains	quantité d'azote dans les tiges enfouies	dénitrification	volatilisation engrais	volatilisation PRO	stock d'azote minéral final du sol	lixiviation nitrique cumulée
			%	tMF/ha	tMF/ha	kgNtot/ha	kgN/ha	kgN/ha	kgN/ha	kgN/ha	kgN/ha	kgN/ha	kgN/ha
Témoin 0	enfouies	colza	0,088	0	0	0	55	107	0	0	0	5	1
	enfouies	repousses	0,088	0	0	0	0	33	0	0	0	5	0
	enfouies	blé	0,088	0	0	0	54	34	0	0	0	82	2
	enfouies	Blé+ repousses	0,088	0	0	0	54	67	0	0	0	82	2
	enfouies	CI	0,088	0	0	0	0	83	0	0	0	35	7
	enfouies	Maïs	0,088	0	0	0	133	42	0	0	0	13	30
	enfouies	Maïs + repousses	0,088	0	0	0	133	125	0	0	0	13	37
	enfouies	blé	0,088	0	0	0	25	16	0	0	0	59	8
Témoin fertilisé	enfouies	colza	0,088	0	0	0	191	74	15	18	0	27	1
	enfouies	repousses	0,088	0	0	0	0	28	0	0	0	5	0
	enfouies	blé	0,088	0	0	0	126	99	12	15	0	147	1
	enfouies	Blé+ repousses	0,088	0	0	0	126	127	12	15	0	147	1
	enfouies	CI	0,088	0	0	0	0	113	0	0	0	76	5
	enfouies	Maïs	0,088	0	0	0	211	67	16	20	0	96	35
	enfouies	Maïs + repousses	0,088	0	0	0	211	180	16	20	0	96	40
	enfouies	blé	0,088	0	0	0	115	69	18	22	0	173	12
Témoin 0 Exportation résidus	enfouies	colza	0,088	0	0	0	95	56	0	0	0	0	1
	enfouies	repousses	0,088	0	0	0	0	32	0	0	0	4	0
	enfouies	blé	0,088	0	0	0	70	11	0	0	0	67	2
	enfouies	Blé+ repousses	0,088	0	0	0	70	43	0	0	0	67	2
	enfouies	CI	0,088	0	0	0	0	72	0	0	0	30	6
	enfouies	Maïs	0,088	0	0	0	114	36	0	0	0	20	27
	enfouies	Maïs + repousses	0,088	0	0	0	114	108	0	0	0	20	33

	enfouies	blé	0,088	0	0	0	37	6	0	0	0	53	14
Témoin	enfouies	colza	0,088	0	0	0	188	62	14	18	0	35	1
fertilisé	enfouies	repousses	0,088	0	0	0	0	28	0	0	0	35	0
Exportation	enfouies	blé	0,088	0	0	0	188	32	13	15	0	139	1
résidus	enfouies	Blé+ repousses	0,088	0	0	0	188	60	13	15	0	139	1
	enfouies	CI	0,088	0	0	0	0	85	0	0	0	199	4
	enfouies	Maïs	0,088	0	0	0	192	61	16	20	0	213	34
	enfouies	Maïs + repousses	0,088	0	0	0	192	146	16	20	0	213	38
	enfouies	blé	0,088	0	0	0	146	22	18	22	0	273	14
Humival	enfouies	colza	0,088	3,7	0	170,0	140	59	0	0	0	5	1
	enfouies	repousses	0,088	0	0	0,0	0	38	0	0	0	6	0
	enfouies	blé	0,088	3,7	0	170,0	90	66	0	0	0	123	1
	enfouies	Blé+ repousses	0,088	3,7	0	170,0	90	104	0	0	0	123	1
	enfouies	CI	0,088	0	0	0,0	0	130	0	0	0	51	7
	enfouies	Maïs	0,088	3,7	0	170,0	200	63	0	0	2	53	43
	enfouies	Maïs + repousses	0,088	3,7	0	170,0	200	193	0	0	2	53	50
	enfouies	blé	0,088	3,7	0	170,0	86	52	0	0	0	143	20
Boues	enfouies	colza	0,088	2,7	0	170,0	180	68	0	0	1	5	1
	enfouies	repousses	0,088	0	0	0,0	0	24	0	0	0	4	0
	enfouies	blé	0,088	2,7	0	170,0	103	74	0	0	1	98	1
	enfouies	Blé+ repousses	0,088	2,7	0	170,0	103	98	0	0	1	98	1
	enfouies	CI	0,088	0	0	0,0	0	105	0	0	0	40	5
	enfouies	Maïs	0,088	2,7	0	170,0	196	62	0	0	6	58	33
	enfouies	Maïs + repousses	0,088	2,7	0	170,0	196	167	0	0	6	58	38
	enfouies	blé	0,088	2,7	0	170,0	103	75	0	0	1	107	16
Compost	enfouies	colza	0,088	0	18,9	170,0	117	57	0	0	1	5	1
FC	enfouies	repousses	0,088	0	0	0,0	0	32	0	0	0	5	0
	enfouies	blé	0,088	0	18,9	170,0	63	41	0	0	1	96	2
	enfouies	Blé+ repousses	0,088	0	18,9	170,0	63	73	0	0	1	96	2
	enfouies	CI	0,088	0	0	0,0	0	95	0	0	0	42	8
	enfouies	Maïs	0,088	0	18,9	170,0	140	45	0	0	1	30	37
	enfouies	Maïs + repousses	0,088	0	18,9	170,0	140	140	0	0	1	30	45
	enfouies	blé	0,088	0	18,9	170,0	25	16	0	0	1	82	21
FC pailleux	enfouies	colza	0,088	0	17,5	170,0	95	43	0	0	0	5	1
	enfouies	repousses	0,088	0	0	0,0	0	41	0	0	0	5	0
	enfouies	blé	0,088	0	17,5	170,0	46	29	0	0	0	83	2
	enfouies	Blé+ repousses	0,088	0	17,5	170,0	46	70	0	0	0	83	2
	enfouies	CI	0,088	0	0	0,0	0	87	0	0	0	37	7
	enfouies	Maïs	0,088	0	17,5	170,0	120	38	0	0	0	27	33
	enfouies	Maïs + repousses	0,088	0	17,5	170,0	120	125	0	0	0	27	40
	enfouies	blé	0,088	0	17,5	170,0	26	17	0	0	0	68	19
Compost	enfouies	colza	0,088	0	14	170,0	112	55	0	0	2	5	1
DV	enfouies	repousses	0,088	0	0	0,0	0	31	0	0	0	5	0
	enfouies	blé	0,088	0	14	170,0	57	37	0	0	1	85	2
	enfouies	Blé+ repousses	0,088	0	14	170,0	57	68	0	0	1	85	2
	enfouies	CI	0,088	0	0	0,0	0	85	0	0	0	37	7
	enfouies	Maïs	0,088	0	14	170,0	135	43	0	0	3	26	33
	enfouies	Maïs + repousses	0,088	0	14	170,0	135	128	0	0	3	26	40
	enfouies	blé	0,088	0	14	170,0	27	18	0	0	1	78	19
Compost	enfouies	colza	0,088	0	18,9	170,0	108	51	0	0	1	5	1
FC - RC	enfouies	repousses	0,088	0	0	0,0	0	34	0	0	0	5	0
	Export	blé	0,088	0	18,9	170,0	90	14	0	0	1	84	2
	Export	Blé+ repousses	0,088	0	18,9	170,0	90	48	0	0	1	84	2
	enfouies	CI	0,088	0	0	0,0	0	86	0	0	0	38	8
	enfouies	Maïs	0,088	0	18,9	170,0	145	46	0	0	1	29	33
	enfouies	Maïs + repousses	0,088	0	18,9	170,0	145	132	0	0	1	29	41
	Export	blé	0,088	0	18,9	170,0	35	6	0	0	1	81	20

Boues +	enfouies	colza	0,088	2,7	18,9	340,0	192	74	0	0	2	5	1
Compost	enfouies	repousses	0,088	0	0	0,0	0	24	0	0	0	5	0
FC	enfouies	blé	0,088	2,7	18,9	340,0	116	85	0	0	1	113	1
	enfouies	Blé+ repousses	0,088	2,7	18,9	340,0	116	109	0	0	1	113	1
	enfouies	CI	0,088	0	0	0,0	0	123	0	0	0	45	5
	enfouies	Maïs	0,088	2,7	18,9	340,0	198	63	0	0	7	101	38
	enfouies	Maïs + repousses	0,088	2,7	18,9	340,0	198	186	0	0	7	101	43
	enfouies	blé	0,088	2,7	18,9	340,0	127	100	0	0	1	135	35
Boues +	enfouies	colza	0,088	2,7	18,9	340,0	184	68	0	0	2	5	1
Compost	enfouies	repousses	0,088	0	0	0,0	0	25	0	0	0	5	0
FC -RC	Export	blé	0,088	2,7	18,9	340,0	171	30	0	0	6	88	1
	Export	Blé+ repousses	0,088	2,7	18,9	340,0	171	55	0	0	6	88	1
	enfouies	CI	0,088	0	0	0,0	0	105	0	0	0	37	4
	enfouies	Maïs	0,088	2,7	18,9	340,0	196	62	0	0	7	86	32
	enfouies	Maïs + repousses	0,088	2,7	18,9	340,0	196	167	0	0	7	86	36
	Export	blé	0,088	2,7	18,9	340,0	180	33	0	0	1	103	30

5.1.1.3. Bilan azote organique:

Tableau 5.4: termes du bilan N organique

	devenir des pailles du précédent cultural	nom_plt	teneur en azote organique du sol	quantité d'apport de PRO fertilisant	quantité d'apport de PRO amendant	Apport total Norg PRO	Apport Norg Résidus de culture	minéralisation nette des résidus de culture	minéralisation nette des PRO	minéralisation nette du N du sol	Bilan Norg	Total
				tMF/ha	tMF/ha	kgNtot/ha	kgN/ha	kgN/ha	kgN/ha	kgN/ha	kgN/ha	kgN/ha
Témoin 0	enfouies	colza	0,088	0	0	0	58,4	-18	0	149	-72,6	-246,6
	enfouies	repousses	0,088	0	0	0	107	-26	0	55		
	enfouies	blé	0,088	0	0	0	33	57	0	96		
	enfouies	Blé+ repousses	0,088	0	0	0	107	31	0	151	-75	
	enfouies	CI	0,088	0	0	0	67	7	0	33		
	enfouies	Maïs	0,088	0	0	0	83	69	0	101		
	enfouies	Maïs + repousses	0,088	0	0	0	67	76	0	134	-143	
	enfouies	blé	0,088	0	0	0	125	-29	0	110	44	
Témoin fertilisé	enfouies	colza	0,088	0	0	0	58,4	-1	0	144	-84,6	-345,6
	enfouies	repousses	0,088	0	0	0	74	-32	0	55		
	enfouies	blé	0,088	0	0	0	28	121	0	90		
	enfouies	Blé+ repousses	0,088	0	0	0	74	89	0	145	-160	
	enfouies	CI	0,088	0	0	0	127	10	0	33		
	enfouies	Maïs	0,088	0	0	0	113	126	0	100		
	enfouies	Maïs + repousses	0,088	0	0	0	127	136	0	133	-142	
	enfouies	blé	0,088	0	0	0	180	43	0	96	41	
Témoin 0 Exportation résidus	enfouies	colza	0,088	0	0	0	58,4	-24	0	140	-57,6	-277,6
	enfouies	repousses	0,088	0	0	0	56	-24	0	52		
	enfouies	blé	0,088	0	0	0	32	36	0	95		
	enfouies	Blé+ repousses	0,088	0	0	0	56	12	0	147	-103	
	enfouies	CI	0,088	0	0	0	43	5	0	33		
	enfouies	Maïs	0,088	0	0	0	72	56	0	98		
	enfouies	Maïs + repousses	0,088	0	0	0	43	61	0	131	-149	
	enfouies	blé	0,088	0	0	0	108	-30	0	106	32	
Témoin fertilisé Exportation résidus	enfouies	colza	0,088	0	0	0	58,4	-4	0	138	-75,6	-343,6
	enfouies	repousses	0,088	0	0	0	62	-31	0	55		
	enfouies	blé	0,088	0	0	0	28	79	0	90		
	enfouies	Blé+ repousses	0,088	0	0	0	62	48	0	145	-131	
	enfouies	CI	0,088	0	0	0	60	8	0	33		
	enfouies	Maïs	0,088	0	0	0	85	96	0	98		

	enfouies	Maïs + repousses	0,088	0	0	0	60	104	0	131	-175	
	enfouies	blé	0,088	0	0	0	146	14	0	94	38	
Humival	enfouies	colza	0,088	3,7	0	170,0	58,4	-1	35	136	58,4	42,4
	enfouies	repousses	0,088	0	0	0,0	59	-32	11	56		
	enfouies	blé	0,088	3,7	0	170,0	38	121	45	93		
	enfouies	Blé+ repousses	0,088	3,7	0	170,0	59	89	56	149	-65	
	enfouies	CI	0,088	0	0	0,0	104	10	19	33		
	enfouies	Maïs	0,088	3,7	0	170,0	130	126	71	97		
	enfouies	Maïs + repousses	0,088	3,7	0	170,0	104	136	90	130	-82	
	enfouies	blé	0,088	3,7	0	170,0	193	43	96	93	131	
Boues	enfouies	colza	0,088	2,7	0	170,0	58,4	-1	76	141	12,4	16,4
	enfouies	repousses	0,088	0	0	0,0	68	-32	-6	57		
	enfouies	blé	0,088	2,7	0	170,0	24	121	42	90		
	enfouies	Blé+ repousses	0,088	2,7	0	170,0	68	89	36	147	-34	
	enfouies	CI	0,088	0	0	0,0	98	10	4	33		
	enfouies	Maïs	0,088	2,7	0	170,0	105	126	74	97		
	enfouies	Maïs + repousses	0,088	2,7	0	170,0	98	136	78	130	-76	
	enfouies	blé	0,088	2,7	0	170,0	167	43	90	90	114	
Compost FC	enfouies	colza	0,088	0	18,9	170,0	58,4	-1	9	137	83,4	311,4
	enfouies	repousses	0,088	0	0	0,0	57	-32	4	57		
	enfouies	blé	0,088	0	18,9	170,0	32	121	-35	96		
	enfouies	Blé+ repousses	0,088	0	18,9	170,0	57	89	-31	153	16	
	enfouies	CI	0,088	0	0	0,0	73	10	2	33		
	enfouies	Maïs	0,088	0	18,9	170,0	95	126	-31	102		
	enfouies	Maïs + repousses	0,088	0	18,9	170,0	73	136	-29	135	1	
	enfouies	blé	0,088	0	18,9	170,0	140	43	-47	103	211	
FC pailleux	enfouies	colza	0,088	0	17,5	170,0	58,4	-1	-40	152	117,4	388,4
	enfouies	repousses	0,088	0	0	0,0	43	-32	16	52		
	enfouies	blé	0,088	0	17,5	170,0	41	121	-96	116		
	enfouies	Blé+ repousses	0,088	0	17,5	170,0	43	89	-80	168	36	
	enfouies	CI	0,088	0	0	0,0	70	10	-5	39		
	enfouies	Maïs	0,088	0	17,5	170,0	87	126	-87	128		
	enfouies	Maïs + repousses	0,088	0	17,5	170,0	70	136	-92	167	29	
	enfouies	blé	0,088	0	17,5	170,0	125	43	-73	119	206	
Compost DV	enfouies	colza	0,088	0	14	170,0	58,4	-1	2	137	90,4	337,4
	enfouies	repousses	0,088	0	0	0,0	55	-32	3	56		
	enfouies	blé	0,088	0	14	170,0	31	121	-60	99		
	enfouies	Blé+ repousses	0,088	0	14	170,0	55	89	-57	155	38	
	enfouies	CI	0,088	0	0	0,0	68	10	-3	34		
	enfouies	Maïs	0,088	0	14	170,0	85	126	-49	109		
	enfouies	Maïs + repousses	0,088	0	14	170,0	68	136	-52	143	11	
	enfouies	blé	0,088	0	14	170,0	128	43	-54	111	198	
Compost FC - RC	enfouies	colza	0,088	0	18,9	170,0	19,5	-24	18	138	57,5	251,5
	enfouies	repousses	0,088	0	0	0,0	51	-24	1	53		
	Export	blé	0,088	0	18,9	170,0	34	36	40	94		
	Export	Blé+ repousses	0,088	0	18,9	170,0	51	12	41	147	21	
	enfouies	CI	0,088	0	0	0,0	48	5	8	32		
	enfouies	Maïs	0,088	0	18,9	170,0	86	56	48	99		
	enfouies	Maïs + repousses	0,088	0	18,9	170,0	48	61	56	131	-30	
	Export	blé	0,088	0	18,9	170,0	132	-30	28	101	203	
Boues + Compost FC	enfouies	colza	0,088	2,7	18,9	340,0	58,4	-1	94	140	165,4	572,4
	enfouies	repousses	0,088	0	0	0,0	74	-32	-6	57		
	enfouies	blé	0,088	2,7	18,9	340,0	24	121	81	89		
	enfouies	Blé+ repousses	0,088	2,7	18,9	340,0	74	89	75	146	104	
	enfouies	CI	0,088	0	0	0,0	109	10	12	33		

	enfouies	Maïs	0,088	2,7	18,9	340,0	123	126	117	99		
	enfouies	Maïs + repousses	0,088	2,7	18,9	340,0	109	136	129	132	52	
	enfouies	blé	0,088	2,7	18,9	340,0	186	43	149	83	251	
Boues + Compost FC - RC	enfouies	colza	0,088	2,7	18,9	340,0	19,5	-24	104	139	140,5	539,5
	enfouies	repousses	0,088	0	0	0,0	68	-24	-10	55		
	Export	blé	0,088	2,7	18,9	340,0	25	36	145	87		
	Export	Blé+ repousses	0,088	2,7	18,9	340,0	68	12	135	142	119	
	enfouies	CI	0,088	0	0	0,0	55	5	19	32		
	enfouies	Maïs	0,088	2,7	18,9	340,0	105	56	176	94		
	enfouies	Maïs + repousses	0,088	2,7	18,9	340,0	55	61	195	126	13	
	Export	blé	0,088	2,7	18,9	340,0	167	-30	189	81	267	

5.1.2. Scénarios sur sol riche en Norg

5.1.2.1. Rendements

Tableau 5.5: Rendements, CAU et Keq des différents scénarios

	devenir des pailles du précédent cultural	nom_plt	PRO fertilisant	PRO amendant	Apport total Norg	Apport engrais	Rendements grains	Rendements tiges	Qt d'azote prélevé par la plante	C/N Résidus de culture	CAU	Keq
					Kg N/ha		tMS/ha		Kg N/ha			
Témoin non fertilisé	enfouies	colza	0	0	0	0	5,28	7,7	240	225	-	-
	enfouies	blé	0	0	0	0	7,22	9,22	167	57	-	-
	enfouies	maïs	0	0	0	0	8,66	7,7	268	71	-	-
	enfouies	blé	0	0	0	0	3,34	4,1	94	47	-	-
Témoin fertilisé	enfouies	colza	0	0	0	150,0	6,75	9,77	354	196	0,8	-
	enfouies	blé	0	0	0	170,0	11,57	14,9	302	49	0,8	-
	enfouies	maïs	0	0	0	130,0	9,23	8,21	288	71	0,2	-
	enfouies	blé	0	0	0	190,0	11,1	14,76	307	48	1,1	-
Boues	enfouies	colza	Boues	0	170,0	0	6,76	9,81	346	196	0,6	0,8
	enfouies	blé	Boues	0	170,0	0	11,72	13,91	265	58	0,6	0,7
	enfouies	maïs	Boues	0	170,0	0	8,73	7,76	275	70	0,0	0,3
	enfouies	blé	Boues	0	170,0	0	11,83	14,76	299	51	1,2	1,1
Compost FC	enfouies	colza	0	Compost FC	170,0	0	5,68	8,28	265	216	0,1	0,2
	enfouies	blé	0	Compost FC	170,0	0	7,79	10,14	183	55	0,1	0,1
	enfouies	maïs	0	Compost FC	170,0	0	8,54	7,61	265	71	0,0	-0,1
	enfouies	blé	0	Compost FC	170,0	0	3,38	5,14	113	45	0,1	0,1
Boues + Compost FC	enfouies	colza	Boues	Compost FC	340,0	0	7,01	10,14	367	193	0,4	0,5
	enfouies	blé	Boues	Compost FC	340,0	0	12,21	14,27	286	55	0,4	0,4
	enfouies	maïs	Boues	Compost FC	340,0	0	8,67	7,72	274	70	0,0	0,1
	enfouies	blé	Boues	Compost FC	340,0	0	12,21	15,41	326	49	0,7	0,6

5.1.2.2. Bilan azote minéral:

Tableau 5.6 : termes d'entrées du bilan N minéral

	devenir des pailles du précédent cultural	nom_plt	teneur en azote organique du sol	quantité d'apport de PRO fertilisant	quantité d'apport de PRO amendant	Apport total Norg	Apport engrais	N pluie	N minéral PRO	minéralisation nette des PRO	minéralisation nette des résidus de culture	minéralisation nette du Norg du sol	stock d'azote minéral initial du sol
			%	tMF/ha	tMF/ha	kgNtot/ha	kgN/ha	kgN/ha	kgN/ha	kgN/ha	kgN/ha	kgN/ha	kgN/ha
Témoin 0	enfouies	colza	0,088	0	0	0	0	14	0	0	-40	253	20
	enfouies	repousses	0,088	0	0	0	0	4	0	0	-30	94	5
	enfouies	blé	0,088	0	0	0	0	14	0	0	176	105	7
	enfouies	Blé+ repousses	0,088	0	0	0	0	18	0	0	146	199	7
	enfouies	CI	0,088	0	0	0	0	4	0	0	10	62	134
	enfouies	Maïs	0,088	0	0	0	0	13	0	0	117	183	55
	enfouies	Maïs + repousses	0,088	0	0	0	0	17	0	0	127	245	134
	enfouies	blé	0,088	0	0	0	0	14	0	0	9	164	55
Témoin fertilisé	enfouies	colza	0,088	0	0	0	150,0	14	0	0	-6	240	20
	enfouies	repousses	0,088	0	0	0	0,0	4	0	0	-45	103	34
	enfouies	blé	0,088	0	0	0	170,0	14	0	0	166	171	36
	enfouies	Blé+ repousses	0,088	0	0	0	170,0	18	0	0	121	274	36
	enfouies	CI	0,088	0	0	0	0,0	4	0	0	11	63	199
	enfouies	Maïs	0,088	0	0	0	130,0	13	0	0	150	184	101
	enfouies	Maïs + repousses	0,088	0	0	0	130,0	17	0	0	161	247	196
	enfouies	blé	0,088	0	0	0	190,0	14	0	0	97	149	194
Boues	enfouies	colza	0,088	2,7	0	170,0	0	14	6	80	-6	238	20
	enfouies	repousses	0,088	0	0	0,0	0	4	0	-1	-45	101	5
	enfouies	blé	0,088	2,7	0	170,0	0	14	6	44	166	171	7
	enfouies	Blé+ repousses	0,088	2,7	0	170,0	0	18	6	43	121	272	5
	enfouies	CI	0,088	0	0	0,0	0	4	0	5	11	63	142
	enfouies	Maïs	0,088	2,7	0	170,0	0	13	6	67	150	183	59
	enfouies	Maïs + repousses	0,088	2,7	0	170,0	0	17	6	72	161	246	142
	enfouies	blé	0,088	2,7	0	170,0	0	14	6	88	97	147	140
Compost FC	enfouies	colza	0,088	0	18,9	170,0	0	14	1	-10	-6	253	20
	enfouies	repousses	0,088	0	0	0,0	0	4	0	20	-45	91	5
	enfouies	blé	0,088	0	18,9	170,0	0	14	1	-32	166	175	7

	enfouies	Blé+ repousses	0,088	0	18,9	170,0	0	18	1	-12	121	266	5
	enfouies	CI	0,088	0	0	0,0	0	4	0	5	11	62	146
	enfouies	Maïs	0,088	0	18,9	170,0	0	13	1	-12	150	186	60
	enfouies	Maïs + repousses	0,088	0	18,9	170,0	0	17	1	-7	161	248	146
	enfouies	blé	0,088	0	18,9	170,0	0	14	1	-55	97	165	83
Boues + Compost FC	enfouies	colza	0,088	2,7	18,9	340,0	0	14	7	102	-6	238	20
	enfouies	repousses	0,088	0	0	0,0	0	4	0	1	-45	102	5
	enfouies	blé	0,088	2,7	18,9	340,0	0	14	7	84	166	171	8
	enfouies	Blé+ repousses	0,088	2,7	18,9	340,0	0	18	7	85	121	273	5
	enfouies	CI	0,088	0	0	0,0	0	4	0	14	11	63	163
	enfouies	Maïs	0,088	2,7	18,9	340,0	0	13	7	117	150	184	69
	enfouies	Maïs + repousses	0,088	2,7	18,9	340,0	0	17	7	131	161	247	163
	enfouies	blé	0,088	2,7	18,9	340,0	0	14	7	135	97	148	202

Tableau 5.7 : termes de sorties du bilan N minéral

	devenir des pailles du précédent cultural	nom_plt	teneur en azote organique du sol	quantité d'apport de PRO fertilisant	quantité d'apport de PRO amendant	Apport total Norg	quantité d'azote dans les grains	quantité d'azote dans les tiges enfouies	dénitrification	volatilisation engrais	volatilisation PRO	stock d'azote minéral final du sol	lixiviation nitrique cumulée
			%	tMF/ha	tMF/ha	kgNtot/ha	kgN/ha	kgN/ha	kgN/ha	kgN/ha	kgN/ha	kgN/ha	kgN/ha
Témoin 0	enfouies	colza	0,088	0	0	0	166	74	0	0	0	5	1
	enfouies	repousses	0,088	0	0	0	0	66	0	0	0	7	0
	enfouies	blé	0,088	0	0	0	99	68	0	0	0	134	1
	enfouies	Blé+ repousses	0,088	0	0	0	99	134	0	0	0	134	1
	enfouies	CI	0,088	0	0	0	0	146	0	0	0	55	7
	enfouies	Maïs	0,088	0	0	0	203	65	0	0	0	55	46
	enfouies	Maïs + repousses	0,088	0	0	0	203	211	0	0	0	55	53
	enfouies	blé	0,088	0	0	0	57	37	0	0	0	125	22
Témoin fertilisé	enfouies	colza	0,088	0	0	0	263	91	13	16	0	34	1
	enfouies	repousses	0,088	0	0	0	0	59	0	0	0	36	0
	enfouies	blé	0,088	0	0	0	177	125	11	13	0	230	1
	enfouies	Blé+ repousses	0,088	0	0	0	177	184	11	13	0	230	1
	enfouies	CI	0,088	0	0	0	0	169	0	0	0	101	7
	enfouies	Maïs	0,088	0	0	0	219	69	16	20	0	196	57
	enfouies	Maïs + repousses	0,088	0	0	0	219	238	16	20	0	196	64
	enfouies	blé	0,088	0	0	0	179	128	14	17	0	273	33
Boues	enfouies	colza	0,088	2,7	0	170,0	256	90	0	0	1	5	1
	enfouies	repousses	0,088	0	0	0,0	0	56	0	0	0	7	0
	enfouies	blé	0,088	2,7	0	170,0	165	100	0	0	1	142	1
	enfouies	Blé+ repousses	0,088	2,7	0	170,0	165	156	0	0	1	142	1
	enfouies	CI	0,088	0	0	0,0	0	160	0	0	0	59	7
	enfouies	Maïs	0,088	2,7	0	170,0	209	66	0	0	6	141	57
	enfouies	Maïs + repousses	0,088	2,7	0	170,0	209	226	0	0	6	141	64
	enfouies	blé	0,088	2,7	0	170,0	180	119	0	0	1	158	34
Compost FC	enfouies	colza	0,088	0	18,9	170,0	185	80	0	0	1	5	1
	enfouies	repousses	0,088	0	0	0,0	0	68	0	0	0	7	0
	enfouies	blé	0,088	0	18,9	170,0	106	77	0	0	1	146	1

	enfouies	Blé+ repousses	0,088	0	18,9	170,0	106	145	0	0	1	146	1
	enfouies	CI	0,088	0	0	0,0	0	159	0	0	0	60	7
	enfouies	Maïs	0,088	0	18,9	170,0	201	64	0	0	1	83	51
	enfouies	Maïs + repousses	0,088	0	18,9	170,0	201	223	0	0	1	83	58
	enfouies	blé	0,088	0	18,9	170,0	69	44	0	0	1	147	45
Boues + Compost FC	enfouies	colza	0,088	2,7	18,9	340,0	279	88	0	0	2	5	1
	enfouies	repousses	0,088	0	0	0,0	0	59	0	0	0	8	0
	enfouies	blé	0,088	2,7	18,9	340,0	178	108	0	0	1	163	1
	enfouies	Blé+ repousses	0,088	2,7	18,9	340,0	178	167	0	0	1	163	1
	enfouies	CI	0,088	0	0	0,0	0	178	0	0	0	69	6
	enfouies	Maïs	0,088	2,7	18,9	340,0	208	66	0	0	7	202	58
	enfouies	Maïs + repousses	0,088	2,7	18,9	340,0	208	244	0	0	7	202	64
	enfouies	blé	0,088	2,7	18,9	340,0	196	130	0	0	1	210	65

5.1.2.3. Bilan azote organique

Tableau 5.8: termes du bilan N organique

	devenir des pailles du précédent cultural	nom_plt	teneur en azote organique du sol	quantité d'apport de PRO fertilisant	quantité d'apport de PRO amendant	Apport total Norg PRO	Apport Norg Résidus de culture	minéralisation nette des résidus de culture	minéralisation nette des PRO	minéralisation nette du N du sol	Bilan Norg	Total
				tMF/ha	tMF/ha	kgNtot/ha	kgN/ha	kgN/ha	kgN/ha	kgN/ha	kgN/ha	kgN/ha
Témoin 0	enfouies	colza	0,088	0	0	0	58,4	-40	0	253	-154,6	-625,6
	enfouies	repousses	0,088	0	0	0	74	-30	0	94		
	enfouies	blé	0,088	0	0	0	66	176	0	105		
	enfouies	Blé+ repousses	0,088	0	0	0	74	146	0	199	-271	
	enfouies	CI	0,088	0	0	0	134	10	0	62		
	enfouies	Maïs	0,088	0	0	0	146	117	0	183		
	enfouies	Maïs + repousses	0,088	0	0	0	134	127	0	245	-238	
	enfouies	blé	0,088	0	0	0	211	9	0	164	38	
Témoin fertilisé	enfouies	colza	0,088	0	0	0	58,4	-6	0	240	-175,6	-711,6
	enfouies	repousses	0,088	0	0	0	91	-45	0	103		
	enfouies	blé	0,088	0	0	0	59	166	0	171		
	enfouies	Blé+ repousses	0,088	0	0	0	91	121	0	274	-304	
	enfouies	CI	0,088	0	0	0	184	11	0	63		

	enfouies	Maïs	0,088	0	0	0	169	150	0	184		
	enfouies	Maïs + repousses	0,088	0	0	0	184	161	0	247	-224	
	enfouies	blé	0,088	0	0	0	238	97	0	149	-8	
Boues	enfouies	colza	0,088	2,7	0	170,0	58,4	-6	80	238	-83,6	-348,6
	enfouies	repousses	0,088	0	0	0,0	90	-45	-1	101		
	enfouies	blé	0,088	2,7	0	170,0	56	166	44	171		
	enfouies	Blé+ repousses	0,088	2,7	0	170,0	90	121	43	272	-176	
	enfouies	CI	0,088	0	0	0,0	156	11	5	63		
	enfouies	Maïs	0,088	2,7	0	170,0	160	150	67	183		
	enfouies	Maïs + repousses	0,088	2,7	0	170,0	156	161	72	246	-153	
	enfouies	blé	0,088	2,7	0	170,0	226	97	88	147	64	
Compost FC	enfouies	colza	0,088	0	18,9	170,0	58,4	-6	-10	253	-8,6	-34,6
	enfouies	repousses	0,088	0	0	0,0	80	-45	20	91		
	enfouies	blé	0,088	0	18,9	170,0	68	166	-32	175		
	enfouies	Blé+ repousses	0,088	0	18,9	170,0	80	121	-12	266	-125	
	enfouies	CI	0,088	0	0	0,0	145	11	5	62		
	enfouies	Maïs	0,088	0	18,9	170,0	159	150	-12	186		
	enfouies	Maïs + repousses	0,088	0	18,9	170,0	145	161	-7	248	-87	
	enfouies	blé	0,088	0	18,9	170,0	223	97	-55	165	186	
Boues + Compost FC	enfouies	colza	0,088	2,7	18,9	340,0	58,4	-6	102	238	64,4	185,4
	enfouies	repousses	0,088	0	0	0,0	88	-45	1	102		
	enfouies	blé	0,088	2,7	18,9	340,0	59	166	84	171		
	enfouies	Blé+ repousses	0,088	2,7	18,9	340,0	88	121	85	273	-51	
	enfouies	CI	0,088	0	0	0,0	167	11	14	63		
	enfouies	Maïs	0,088	2,7	18,9	340,0	178	150	117	184		
	enfouies	Maïs + repousses	0,088	2,7	18,9	340,0	167	161	131	247	-32	
	enfouies	blé	0,088	2,7	18,9	340,0	244	97	135	148	204	