Université catholique de Louvain

Earth & Life Institute
-
Pôle agronomie

Fertilisation organique et minérale

en culture de pomme de terre :

Synthèse des résultats expérimentaux 2011-2013

De Toffoli M.[1], Khalidi M.[2], Imbrecht O.[1], Ryckmans D. [3], Lambert R.[1], 2013.

(1) Université catholique de Louvain – Earth and Life Institute agronomy
Place Croix du Sud, 2 boîte L7.05.26
1348 Louvain-la-Neuve
(2) Nitrawal ASBL
Place Croix du Sud, 2 boîte L7.05.11
1348 Louvain-la-Neuve
(3) Filière Wallonne de la Pomme de Terre ASBL
Rue du Bordia, 4
5030 Gembloux

Dossier UCL 13-44

Table des matières

0 Introduction 1
1 Matériel et méthode 2
1.1 Dispositif expérimental 2
1.2 Traitements 2
1.3 Engrais de ferme 3
1.4 Caractéristiques parcellaires 3
1.4.1 Parcelle 2011 3
1.4.2 Parcelle 2012 4
1.4.3 Parcelle 2013 5
1.5 Paramètres de production 5
1.6 Mesure de l'azote potentiellement lessivable (APL) 6
1.7 Détermination de l'équivalent engrais minéral 6
2 Données climatiques 7
3 Résultats et discussion 10
3.1 Évolution de l'azote minéral du sol en cours de saison 10
3.2 Production de pomme de terre 11
3.2.1 Récolte 2011 11
3.2.2 Récolte 2012 18
3.2.3 Récolte 2013 25
3.2.4 Synthèse de la relation rendements – reliquats 33
3.2.5 Synthèse des coefficients d'équivalence minérale 34
4 Conclusion et perspectives 36
5 Bibliographie et sources internet 37
6 Annexes : 39
6.1 Analyses de variance 39
6.1.1 Récolte 2011 39
6.1.2 Récolte 2012 40
6.1.3 Récolte 2013 41

0 Introduction

L'expérimentation pluriannuelle consacrée à la fertilisation en culture de pomme de terre a été mise en place en collaboration entre l'UCL Earth &Life institute - agronomy (membre de la structure d'encadrement Nitrawal) et Nitrawal ASBL (Centre d'action Nord) et avec le soutien de la FIWAP ASBL (Filière Wallonne de la Pomme de Terre). L'objectif initial de ce partenariat est de préciser, par rapport à une fertilisation minérale, des coefficients d'efficacité de l'azote contenu dans les engrais de ferme par la mise en place d'essais répétés sur plusieurs années en Région Wallonne. Une étude similaire est menée sur la culture de maïs ensilage dont une synthèse des premières années d'expérimentation a été publiée dans le rapport d'activité 2012 (Dossier UCL 12-44, 2012). Une parcelle d'essai démonstratif en pomme de terre avait également été mise en place en 2009 par le centre d'action Ouest de Nitrawal ASBL (rapport d'activité de la structure d'encadrement Nitrawal, 2009) et en 2010 par le centre d'action Nord (rapport d'activité de la structure d'encadrement Nitrawal, 2010).
A l'origine de cette recherche, il y a le constat que les références nécessaires à la prise en compte des fertilisations organiques pour le calcul de la fertilisation minérale nécessiteraient une validation scientifique des valeurs qui concernent les grandes cultures (Dossier UCL 08-02, 2008). L'évolution des pratiques agricoles s'oriente vers une meilleure valorisation des engrais de ferme qui va de pair avec une augmentation des apports de printemps au détriment des apports d'automne. C'est pourquoi la recherche présentée dans cette étude vise à améliorer les connaissances sur l'impact des apports d'engrais de ferme au printemps. Il s'inscrit dans le cadre des missions confiées aux membres scientifiques de la structure d'encadrement Nitrawal en contribuant à améliorer les conseils de fertilisation azotée des cultures de printemps en Wallonie.

1 Matériel et méthode

Les objectifs de ce travail sont d'une part d'ajuster les niveaux de fertilisation à l'optimum avec les engrais minéraux et d'autre part d'évaluer l'efficacité des engrais de ferme afin de déterminer *in fine* les coefficients d'équivalence engrais minéral correspondant à chaque matière. Pour chaque modalité une mesure est effectuée de l'impact sur le reliquat azoté en post-culture (début de période d'APL[1]) afin d'évaluer les risques de pertes d'azote par lessivage.

L'essai a été réalisé sur trois années aux caractéristiques climatiques contrastées entre d'une part l'année 2011 favorable à la minéralisation des apports organiques et d'autre part 2012 et 2013, années moins favorables à l'action des engrais de ferme.

1.1 Dispositif expérimental

Le protocole expérimental mis en place repose sur la comparaison des rendements en poids frais des PDT obtenus sur base de fertilisation utilisant les principaux engrais de ferme. Ces rendements sont comparés à une courbe de réponse du rendement à des doses croissantes d'engrais azoté minéral. Les variétés utilisées sont de type transformation (Bintje ou Fontane). Les parcelles ont été différentes chaque année pour éviter les arrières-effets des matières organiques. La méthode d'implantation est réalisée en « blocs aléatoires » et en 4 répétitions de parcelles de 4,5m de large x 8m de long.

1.2 Traitements

Les fertilisations azotées minérales ont été appliquées sous forme solide à des doses allant de 0 à la dose conseil + 20-30% pour la courbe de réponse. Les traitements relatifs aux engrais de ferme n'ont reçu aucune fertilisation azotée minérale (Tableau 1). Les engrais de ferme ont été épandus manuellement avant l'implantation de la culture. Les quantités appliquées ont été définies avec un objectif de 230 kg d'azote total par hectare. Tous les traitements ont été réalisés en 4 répétitions.

Tableau 1. Fertilisations minérales et organiques appliquées sur les objets étudiés.

Objet	Fertilisation minérale (en unité d'azote/ha)		Objet	Fertilisation organique
1.	0		8	fumier bovin (FB)
2.	50		9	fumier bovin composté (FBC)
3.	100		10	lisier bovin (LB)
4.	chlorophyllomètre[2]		11	lisier porcin (LP)
5.	150		12	fumier de volaille (FV)
6.	Conseil (180 à 195)		13	sol nu
7.	230			

[1] APL : Azote potentiellement lessivable.

[2] Méthode consistant à appliquer 70% de la dose conseil avant plantation et à compléter en cours de croissance des PDT avec apport des 30% complémentaires seulement en cas de besoin détecté par mesures avec l'appareillage (chlorophylomètre).
(Source : http://www.fiwap.be/index.php/services/le_chlorophyllometre)

1.3 Engrais de ferme

Les analyses des matières organiques épandues ont été réalisées par le Centre de Michamps asbl, laboratoire de référence de la chaîne minérale produit. Trois à quatre répétitions ont été réalisées par matière. Les valeurs des engrais de ferme utilisés sont présentées ci-dessous (Tableau 2).

Les quantités d'engrais de ferme ont été appliquées avec un objectif de 230 kg d'azote total par hectare, la dose effectivement apportée n'est connue qu'après analyse de la matière échantillonnée lors de l'épandage. Ainsi même si des analyses ont été réalisées à l'avance pour avoir une idée de leur teneur, des écarts parfois importants peuvent exister entre la quantité souhaitée et la quantité d'azote organique effectivement appliquée.

Tableau 2 : Teneurs et doses d'azote organique des engrais de fermes appliqués

Année	Engrais de ferme	teneur N total (kg/t de MF)	teneur N-NH4 (kg/t de MF)	quantité N appliqué (en kg N/ha)
2011	fumier bovin	5,1	0,6	226
	fumier bovin composté	5,0	0,1	171
	lisier bovin	3,1	1,9	223
	lisier porcin	4,7	2,8	264
	fumier de volaille	17,5	5,2	159
2012	fumier bovin	5,81	1,18	258
	fumier bovin composté	7,09	0,10	272
	lisier bovin	4,38	1,81	319
	lisier porcin	4,58	3,02	167
	fumier de volaille	29,56	5,48	239
2013	fumier bovin	6,00	1,71	267
	fumier bovin composté	6,58	0,32	253
	lisier bovin	3,36	1,99	173
	lisier porcin	2,84	2,28	103
	fumier de volaille	25,16	3,84	178

La conséquence de cette valeur déterminée à posteriori est que certaines doses d'azote sont nettement inférieures (LP 2013) ou supérieures (LP 2011, LB 2012) à l'objectif. Il faut dès lors relativiser en conséquence les interprétations des résultats obtenus.

1.4 Caractéristiques parcellaires

1.4.1 Parcelle 2011

Localisation : Houtain-le-val, alt.150m
Type de sol : Aba(b) ; Sol limoneux à drainage favorable et à horizon B textural tacheté (source : Requacarto)
pH - KCl : 6,4
Humus : 2,2%
Précédent : céréale paille enlevée
Reliquat azoté avant culture : 22/02/2011 : 24 kg N/ha sur 60cm (0-30cm :12 ; 30-60cm : 12)
Autre fumure : 0-240-45 (P-K-Mg)

Calcul du conseil de fertilisation azotée :

Besoins (variété Bintje)	250
N non prélevé	30
Besoins+reliquat	**280**
Date de semis	0
Minéralisation	71
Profil	24
Ferti organique	0
précédent	0
cipan	0
prairie	0
N absorbé hiver	0
Fournitures	**95**
CONSEIL calculé	**185**

Date de plantation : 8 avril 2011
Date de défanage : 5 septembre 2011
Date de récolte : 27 septembre 2011

1.4.2 Parcelle 2012

Localisation : Thines, alt.142m
Type de sol : Abp(c) : Sol limoneux à drainage favorable sans développement de profil (source : Requacarto)
pH - KCl : 7
Humus : 1,8%
Précédent : céréale paille enlevée suivie de moutarde à l'interculture (développement moyen)
Reliquat azoté avant culture : 7/03/2012 : 26 kg N/ha sur 60cm (0-30cm :14 ; 30-60cm : 12)
Autre fumure : 42-292-63 (P-K-Mg)
Calcul du conseil de fertilisation azotée :

Besoins (variété Fontane)	250
N non prélevé	30
Besoins+reliquat	**280**
Date de semis	0
Minéralisation	66
Profil	26
Ferti organique	0
précédent	0
cipan	0[3]
prairie	0
N absorbé hiver	0
Fournitures	**92**
CONSEIL calculé	**188**

[3] Le laboratoire qui a prodigué ce conseil, considère que l'azote total mesuré dans l'échantillon de sol comprend celui contenu dans les résidus de la cipan et est donc déjà pris en compte via le poste minéralisation calculé à partir de cet azote total.

Date de plantation : 14 mai 2012
Date de défanage : 5 septembre 2012
Date de récolte : 15 octobre 2012

1.4.3 Parcelle 2013

Localisation : Ophain, alt.150m
Type de sol : Aba(b) Sol limoneux à drainage favorable et à horizon B textural tacheté (source : Requacarto)
pH - KCl : 6,6
Humus : 1,7%
Précédent : céréale paille enlevée + cipan (moutarde développement faible)
Reliquat azoté avant culture : 4/03/2013 : 23 kg N/ha sur 60cm (0-30cm :12 ; 30-60cm : 12 ; 60-90cm : 8)
Autre fumure : 47-300-63 (P-K-Mg)

Calcul du conseil de fertilisation azotée :

Besoins (variété Bintje)	250
N non prélevé	30
Besoins+reliquat	**280**
Date de semis	0
Minéralisation	63
Profil	23
Ferti organique	0
précédent	0
cipan	0
prairie	0
N absorbé hiver	0
Fournitures	**96**
CONSEIL calculé	**194**

Date de plantation : 8 avril 2013
Date de défanage : 13 septembre 2013
Date de récolte : 30 septembre 2013

1.5 Paramètres de production

Sur les 5 rangs de PDT, seules les 2 buttes centrales sont récoltées. La récolte a été réalisée par l'agriculteur en 2011 et par une arracheuse 1 rang spécialement équipée pour les parcelles d'essais en 2012 et 2013. Après la récolte, les rendements ont été mesurés avec détermination de la tare et du poids en relation avec le calibre : 0-35mm, 35-55mm et + de 55mm. Il s'agit de rendements bruts, ne tenant pas compte des éventuelles pertes liées aux traces de pulvérisation ou des forrières Les paramètres de qualités suivants ont été mesurés en collaboration avec la Fiwap asbl : le poids sous eau (PSE) permettant de déterminer le taux de matière sèche, et le taux de « pommes de terre flottantes ». Les rendements sont exprimés en tonnes par hectare.

1.6 Mesure de l'azote potentiellement lessivable (APL)

Les mesures de reliquat azoté ont été réalisées en début de période d'APL, aux alentours du 15 octobre. Chaque répétition a été sondée par 4 trous par parcelle à l'aide d'une sonde hydraulique à une profondeur de 90 cm en trois couches de 30 cm. La détermination de la quantité d'azote nitrique a été déterminée en respectant la législation régissant la procédure d'extraction et d'analyse d'APL en Wallonie.

Un suivi de la minéralisation basale a été réalisé chaque année par mesure de l'azote minéral sur 90 cm en parcelle de sol maintenu sans couvert par pulvérisation après l'implantation de la culture. Les mesures ont été effectuées avant et après la culture et à 2 dates pendant la culture.

1.7 Détermination de l'équivalent engrais minéral

On définit le coefficient d'équivalence azote engrais minéral d'un engrais de ferme comme étant le pourcentage de l'azote total appliqué qui correspond à une fertilisation équivalente en engrais minéral. La détermination de ce coefficient est effectuée à partir du rendement en tubercules de la culture (Figure 1). La réponse du rendement à des doses croissantes de fertilisation azotée minérale permet d'établir une équation de régression (Figure 11). En reportant sur celle-ci le rendement obtenu par les fertilisations avec chaque engrais de ferme, on détermine une fertilisation équivalente engrais minéral. Comme définit plus haut, les coefficients d'équivalence (ou d'efficacité) sont obtenus en faisant le rapport azote équivalent minéral / azote apporté.

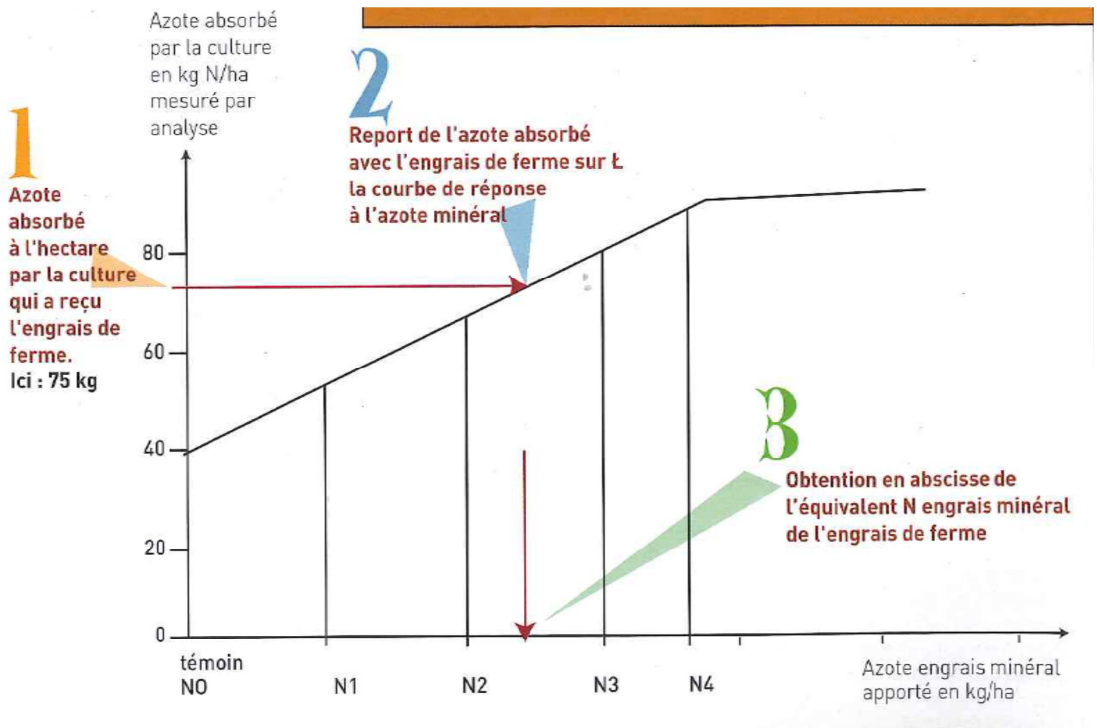

Figure 1. Détermination de l'équivalent azote engrais minéral de l'azote total d'un engrais de ferme à partir d'essais au champ (Bodet et al., 2001).

2 Données climatiques

En 2011, les températures ont été supérieures à la normale, excepté en juillet. Les faibles précipitations du printemps ont engendré un déficit hydrique très exceptionnel, partiellement compensé par les pluies de juin et la forte pluviométrie en août. Les conditions d'implantation étaient excellentes et la minéralisation printanière favorisée par les températures élevées et le retour des pluies en juin (cf. 3.1).

En 2012, les données climatiques moyennes sont proches de la normale[4]. On peut toutefois signaler des températures légèrement supérieures à la normale en mai, juin et en août, des pluies anormalement élevées en avril (qui ont retardé la plantation !) juin, juillet et octobre, et des pluies anormalement basse en août et septembre. L'impact sur global sur la minéralisation est positif avec notamment une forte minéralisation estivale.

En 2013, les températures ont été anormalement basses au printemps. La pluviométrie est restée globalement proche de la normale malgré un mois d'avril inférieur (qui a permis une plantation hative) et un mois de mai supérieur à celle-ci. Le mois d'août a également été marqué par un déficit hydrique plus élevé que la normale.

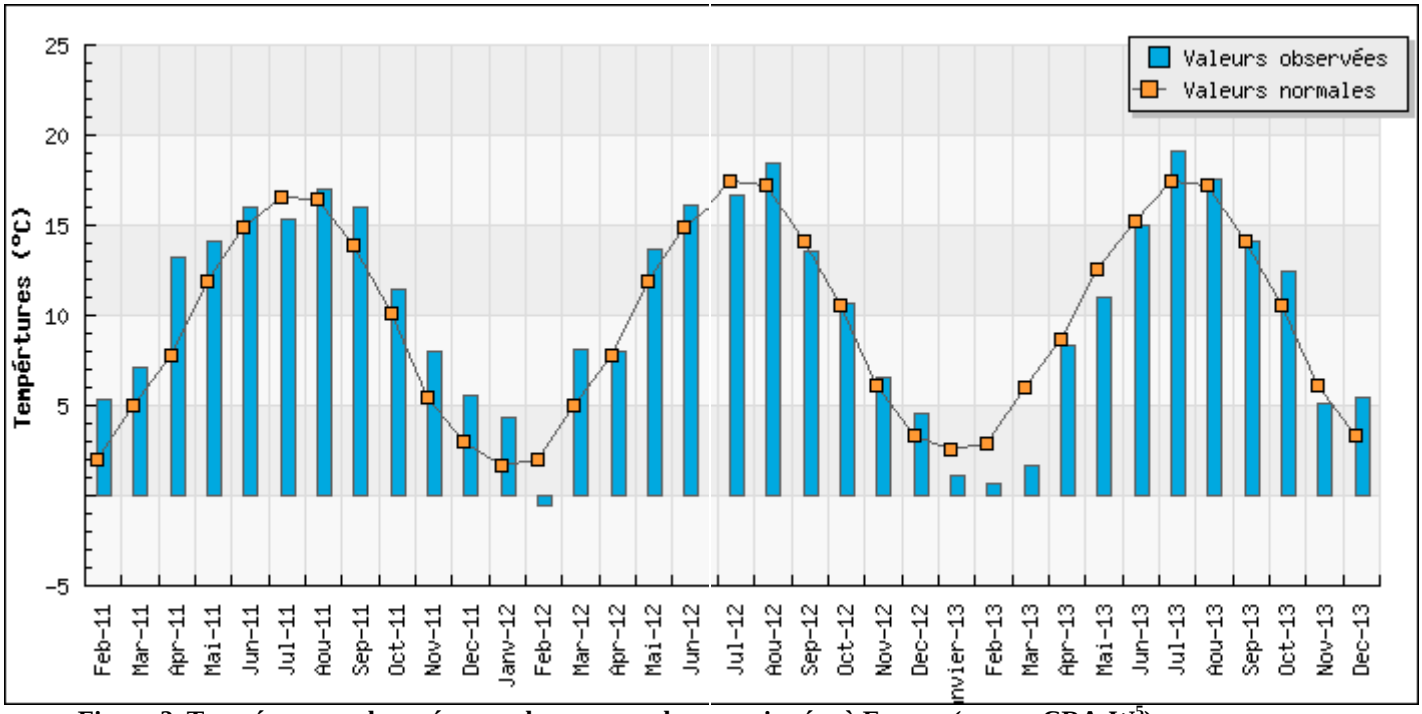

Figure 2. Températures observées et valeurs normales enregistrées à Ernage (source CRA-W[5])

[4] Les informations liées à la normalité des observations proviennent de l'Institut Royal Météorologique. http://www.meteo.be/meteo/view/fr/6042923-Climat+actuel+en+Belgique.html

[5] http://www.cra.wallonie.be/index.php?page=34

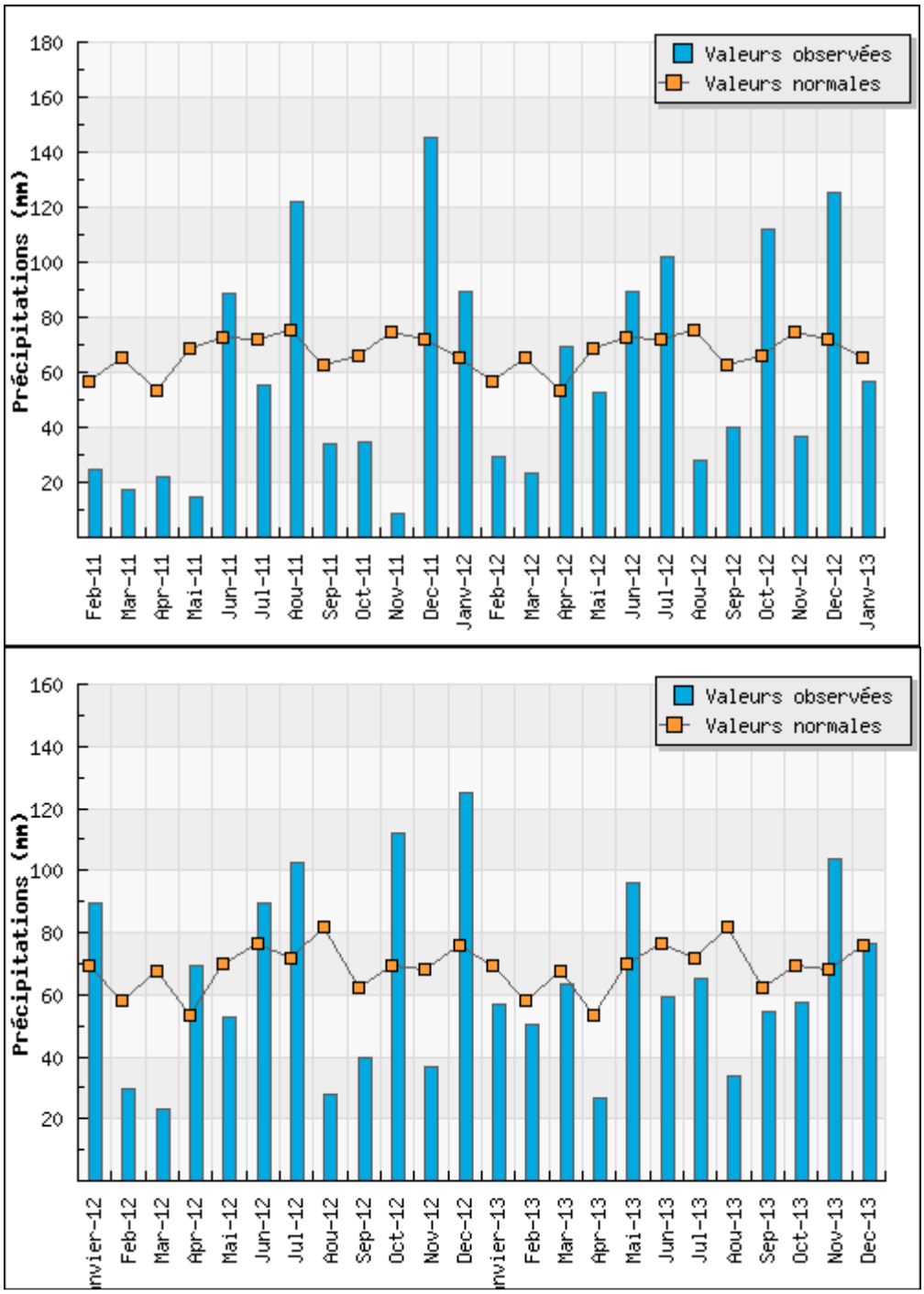

Figure 3. Précipitations observées et valeurs normales enregistrées à Ernage (source CRA-W[6])

[6] http://www.cra.wallonie.be/index.php?page=34

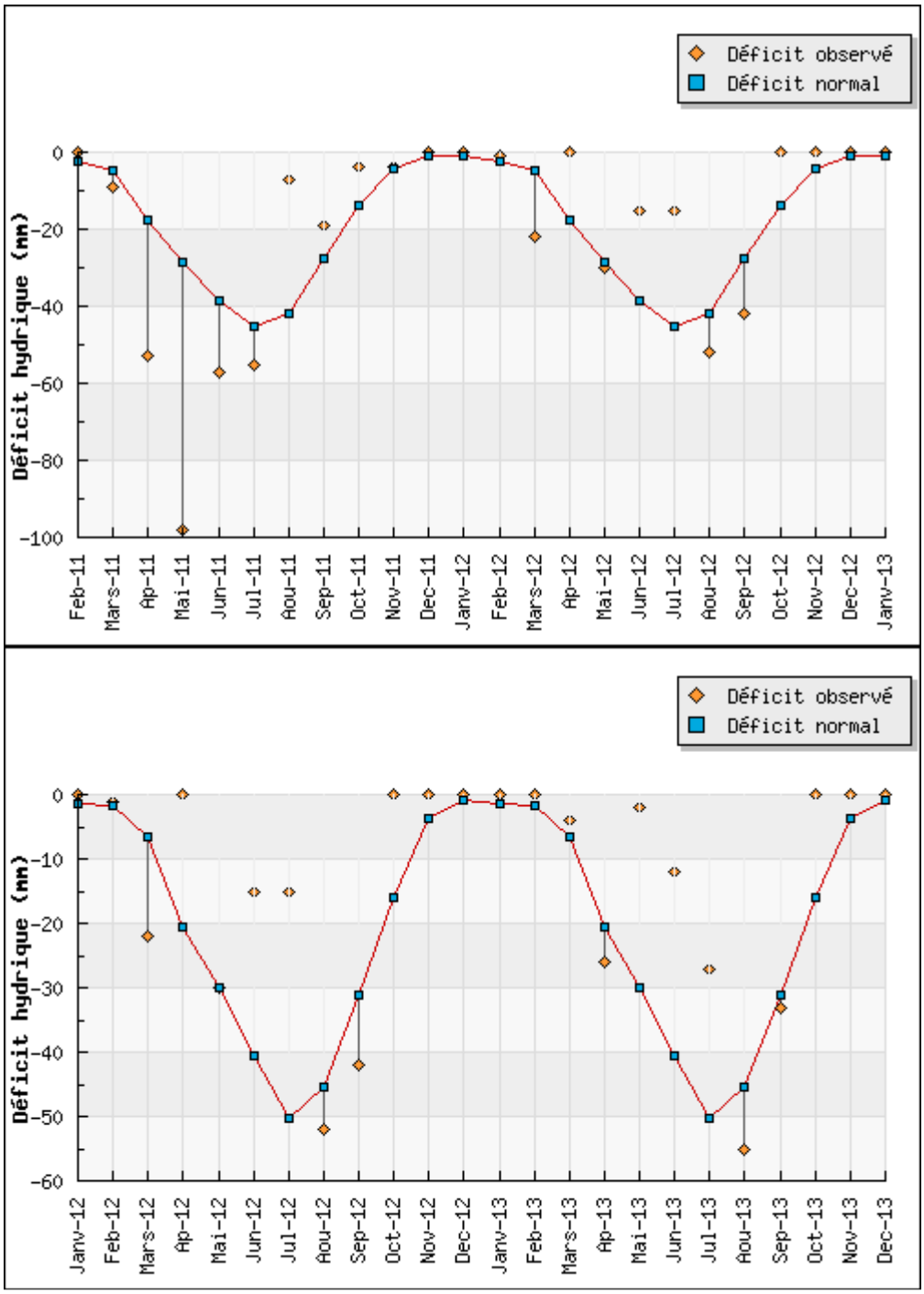

Figure 4. Déficit hydrique observé et valeurs normales enregistrées à Ernage (source CRA-W[7])

[7] http://www.cra.wallonie.be/index.php?page=53

3 Résultats et discussion

3.1 Évolution de l'azote minéral du sol en cours de saison

La mesure en cours de saison de l'azote minéral en parcelle de sol nu permet d'évaluer la dynamique de libération d'azote par les processus de minéralisation de la matière organique. Le potentiel de fourniture d'azote par le sol est lié à la quantité de matière organique contenu dans la couche arable. Ce paramètre est approché par le taux d'humus et le rapport C/N du sol. Les processus de minéralisation liés à l'activité des microorganismes sont dépendants de facteurs climatiques tels que la température et l'humidité et donc aux conditions propres à chaque année culturale. C'est ainsi que des variations plus ou moins importantes peuvent être observées pour des parcelles ayant des taux d'humus proches.

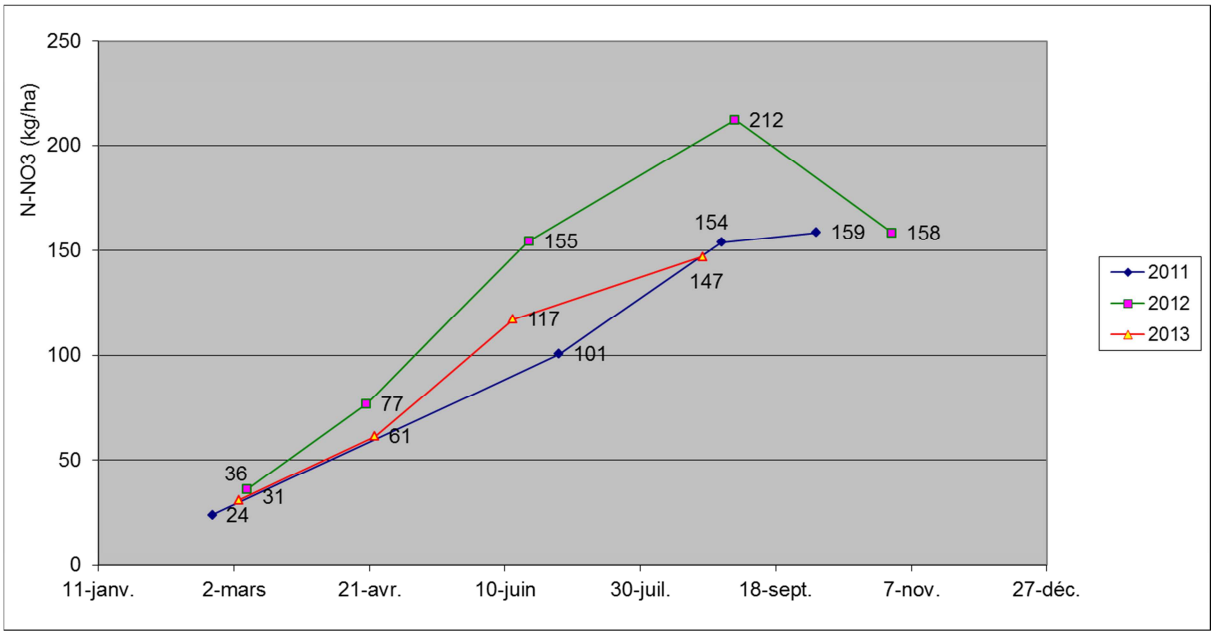

Figure 5. Évolution des quantités moyennes d'azote nitrique dans les parcelles de sol nu au cours des saisons culturales 2011, 2012 et 2013.

En 2011 et en 2013, on observe une augmentation de la quantité d'azote nitrique d'environ 120 kg/ha. Entre la plantation et juillet, la libération d'azote a été plus progressive en 2011 qu'en 2013 (+60 kg) où on voit une forte augmentation au mois de mai. L'année 2012 est marquée par une forte et rapide minéralisation. La quantité d'azote nitrique sur 90 cm a doublé (+78 kg) entre le 20 avril et le 20 juin atteignant plus de 150 kgN/ha. Le pic a été atteint en septembre à plus de 200 kg d'azote disponible ce qui correspond à une minéralisation nette apparente de plus de 170 kg d'azote durant la saison.

Les mesures effectuées dans les différentes parcelles de sol nu suivies en PDT et en maïs montrent qu'après la fin août le reliquat subit un lessivage plus ou moins important en fonction de la quantité de précipitations. L'année 2011 fait exception avec un solde net légèrement positif vraisemblablement dû aux faibles précipitations enregistrées en septembre et octobre et des températures assez élevées pour cette même période. En 2013, l'échantillonnage des parcelles de sol nu n'a pu être réalisé en fin de saison.

3.2 Production de pomme de terre

Malgré un niveau de rendement des témoins sans fertilisation azotée élevé certaines années (2011 et 2013), une bonne réponse du rendement aux doses croissantes de fertilisation minérale a été observée, condition nécessaire à l'établissement des équations permettant de déterminer les coefficients d'équivalence minérale.

3.2.1 Récolte 2011

L'année 2011 a été marquée par une forte réponse du rendement à la fertilisation azotée minérale et ce malgré un rendement témoin « zéro azote » élevé à 45 t/ha. Ce témoin a pu bénéficier d'une libération d'azote par minéralisation importante comme souligné dans le chapitre précédent (cf. 3.1).

Tableau 3. Résultats et traitements statistiques[8] des mesures effectuées en 2011.

Objet	Traitement	Fert. N (kg/ha)	Rendement et erreur st. (t/ha)	stat	flottantes (%)	stat	Poids sous eau (gr/5kg)	stat	Reliquat post-culture (kg N-NO3/ha)	stat
1	0	0	45 ±5	a	7,3	ab	451.75	a	32	a
2	50	50	54 ±4	abc	7	ab	447.50	ab	32	a
3	100	100	60 ±4	bcd	12,5	d	430.00	c	38	a
4[9]	100+50	150	65 ±2	def	4,8	a	415.75	d	42	ab
5	150	150	66 ±5	def	8,8	abcd	409.75	de	44	a
6	180	180	72 ±2	ef	11,5	cd	400.75	e	47	ab
7	230	230	72 ±4	ef	11,8	d	397.25	e	75	c
8	FB	226	57 ±1	bcd	7,5	abc	436.25	bc	33	a
9	FBC	171	52 ±3	ab	7,5	abc	438.25	abc	37	a
10	LB	223	63 ±6	cde	10,5	bcd	410.75	de	40	a
11	LP	264	75 ±3	f	12,3	d	406.00	de	62	bc
12	FV	159	60 ±1	bcd	5,25	a	438.00	abc	40	a
13	sol nu	-	-	-	-	-	-	-	159	d

[8] Sauf mention contraire les résultats statistiques présentés dans la suite du document sont obtenus par une analyse de variance à un facteur et le cas échéant par la réalisation d'un test t de Student d'égalité des moyennes ($\alpha = 0,05$). Les valeurs n'ayant pas de lettre commune sont significativement différentes.

[9] La dose totale apportée de 150 uN correspond à un conseil établi pour des PDT de consommation, l'objectif étant d'évaluer la possibilité d'améliorer l'utilisation de l'engrais par le fractionnement de la fertilisation via la méthode du chlorophylomètre.

3.2.1.1 Rendement total

En 2011, le rendement total en PDT atteint un niveau très élevé avec un maximum à 72 t/ha[10] pour une fertilisation correspondant au conseil prévisionnel de fumure à 180 kg N/ha (Figure 6). Le gain de rendement est alors de 27 t/ha par rapport au témoin.

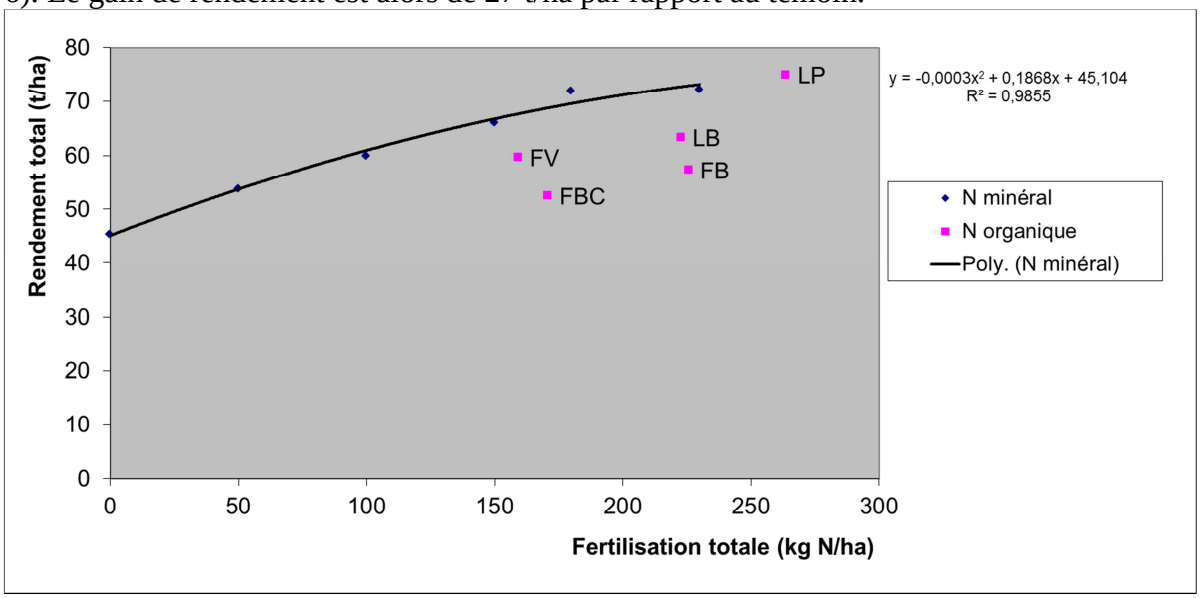

Figure 6. Réponse du rendement en PDT en fonction de la fertilisation totale, 2011

L'analyse de variance (cf. annexe 6.1.1) montre un effet significatif de la fertilisation sur le rendement total en PDT (P-valeur = $3{,}92 \times 10^{-5}$). La comparaison des moyennes (cf. Tableau 3) permet de tirer les enseignements suivants :

- Le traitement 5 (150 kgN/ha) est la fertilisation minérale minimale donnant un rendement statistiquement équivalent au rendement maximum (P-valeur = 0,277).
- Concernant les fertilisations organiques, seuls les traitements lisiers de porc et de bovin ont obtenu un rendement statistiquement équivalent au maximum (P-valeur respectivement de 0,575 et 0, 113).
- Le fumier composté obtient un rendement statistiquement équivalent à une fertilisation de 50 uN (P-valeur = 0,81).
- Les fumiers de bovin et de volaille donnent des résultats intermédiaires comparables au traitement 3 de 100 uN (P-valeur respectivement de 0,62 et 0,96).

3.2.1.2 Calibres

L'analyse des rendements en tenant compte du calibre permet d'affiner l'analyse en sachant que pour la variété testée, les PDT de plus de 55mm sont économiquement bien valorisées.

- La classe 0-35 mm, assimilée à de la tare, est proportionnellement très faible représentant entre 0,3 et 0,6% du total récolté, sans qu'aucune différence significative ne puisse être mise en évidence (P-valeur = 0,323).
- La classe 35-55 mm se situe aux alentours de 17 t/ha, sans qu'aucune différence significative ne puisse être mise en évidence (P-valeur = 0,652).
- La classe 55mm et + est caractérisée par des différences hautement significatives ((P-valeur = $1{,}28 \times 10^{-6}$). Le maximum est atteint par la fertilisation de 180 uN : 54t/ha représentant 75% du rendement total. Cependant les fertilisations 150 et 230 uN (49 et 53 t/ha) ainsi que les traitements lisiers de bovins et de porc (47 et 58 t/ha) ne sont pas

[10] Le rendement moyen en Belgique a été d'environ 57 t/ha pour les variétés de transformation en Belgique (source : Centre Pilote Pomme de terre, 2012).

significativement différents de ce maximum. Les fumiers de bovin et de volaille obtiennent des résultats proches de la fertilisation avec 100 uN (P-valeur respectivement de 0,399 et 0,96) et le compost de fumier de celle avec 50 uN (P-valeur 0,96).

3.2.1.3 Poids sous eau

En termes de qualité, le poids sous eau (PSE) est le paramètre utilisé pour mesurer le taux de matière sèche (MS). Ceci permet de déterminer la qualité de transformation de la PDT, la sensibilité aux coups étant liée à une MS trop élevée. Le cahier de charge de la plupart des transformateurs (production de frites) impose un PSE supérieur à 360 gr/5kg.
De manière attendue, le PSE diminue fortement avec l'augmentation de la fertilisation minérale. Le PSE part d'un maximum de 452 gr/5kg en absence de fertilisation pour atteindre un minimum de 397 gr/5kg pour la fertilisation maximum. Ces valeurs correspondent à des taux de matière sèche allant de 24,2% à 21,5 % (méthode de von Schéele *et al.*, 1937). La Figure 7 représentant les valeurs correspondant aux fertilisations minérales montre une très bonne corrélation entre l'augmentation de la fertilisation et la diminution du poids sous-eau (PSE).

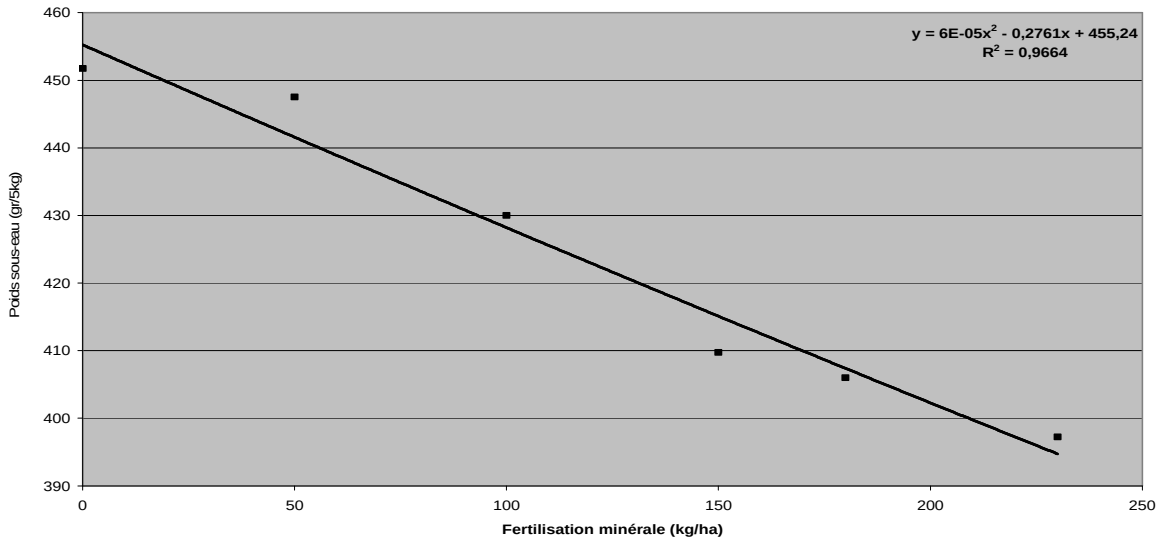

Figure 7. Évolution du PSE en fonction de la fertilisation azotée minérale

En considérant les fertilisations organiques, on observe en Figure 8 que les fumiers et compost ont donné les PSE les plus élevés, de l'ordre de 435 gr/5kg et les lisiers les valeurs les plus basses entre (406 et 411 gr/5kg). L'analyse de variance ayant détecté une influence significative de la fertilisation sur le PSE (P-valeur = $1{,}92*10^{-10}$; cf. annexe 6.1.1), la comparaison des moyennes confirme que, pour ce critère également, les fumiers et compost de fumier sont statistiquement équivalents aux PSE obtenus par des fertilisations faibles à moyennes et les lisiers par des fertilisations élevées (cf. Tableau 3).

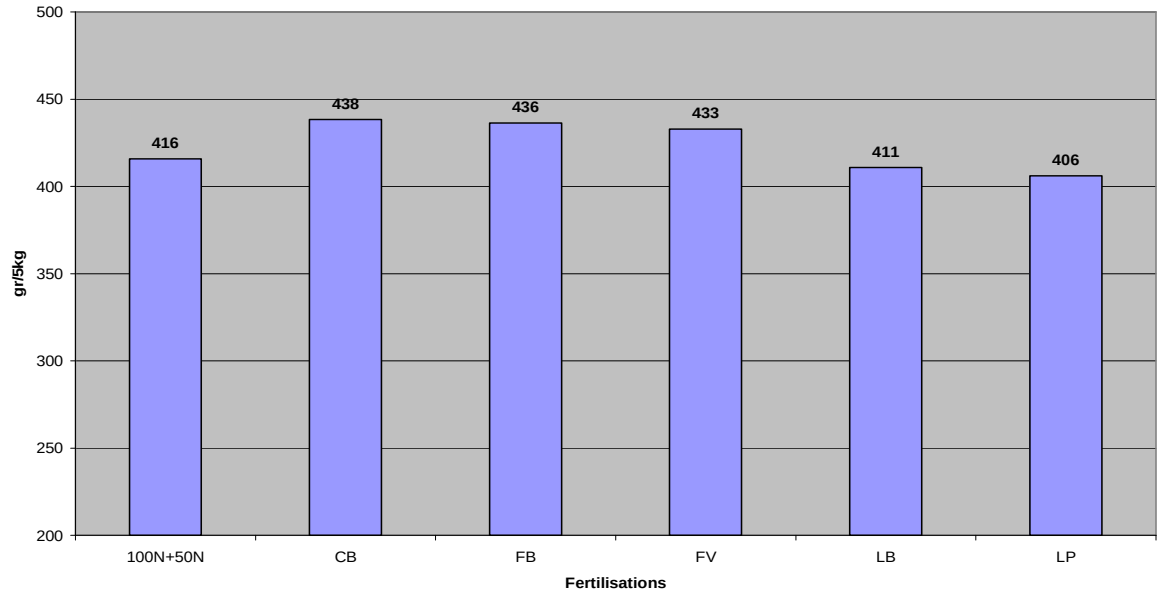

Figure 8. Poids sous eau (en g/5kg) en fonction des fertilisants organiques

3.2.1.4 Proportion de flottantes

Les PDT appelées flottantes en raison de la méthode utilisée pour leur détermination, sont considérées comme une tare. Elles augmentent le risque au niveau du stockage et donc abaissent le rendement net commercialisable. En 2011 des problèmes de stockage ont été fréquemment rencontrés suite à la présence de quantités +/- importantes de flottantes dans certains lots.

La modération de l'apport azoté permet de limiter la proportion de PDT flottantes, même si d'autres facteurs influencent significativement ce paramètre (variété, type de sol, conditions climatiques, etc.). Au niveau des résultats de l'essai, l'évolution des flottantes en fonction de la fertilisation minérale (Figure 9) montre qu'une relation peut être établie entre l'augmentation de la fertilisation et la proportion des flottantes dans l'échantillon.
L'analyse de variance confirme l'existence d'une influence de la fertilisation sur le taux de flottantes (P-valeur = 0,0022 ; cf. annexe 6.1.1).

L'impact d'un fractionnement azoté a été testé, à l'aide de la technique du chlorophyllométre. Un apport initial de 100uN à la plantation a été complété par 50uN à 55 jours après l'émergence. La Figure 9 montre une différence de pourcentage de flottantes entre une fertilisation en un seul apport (8,7%) ou fractionnée (5,1%). Cependant, cette différence n'est pas significative (P-valeur = 0,0616).

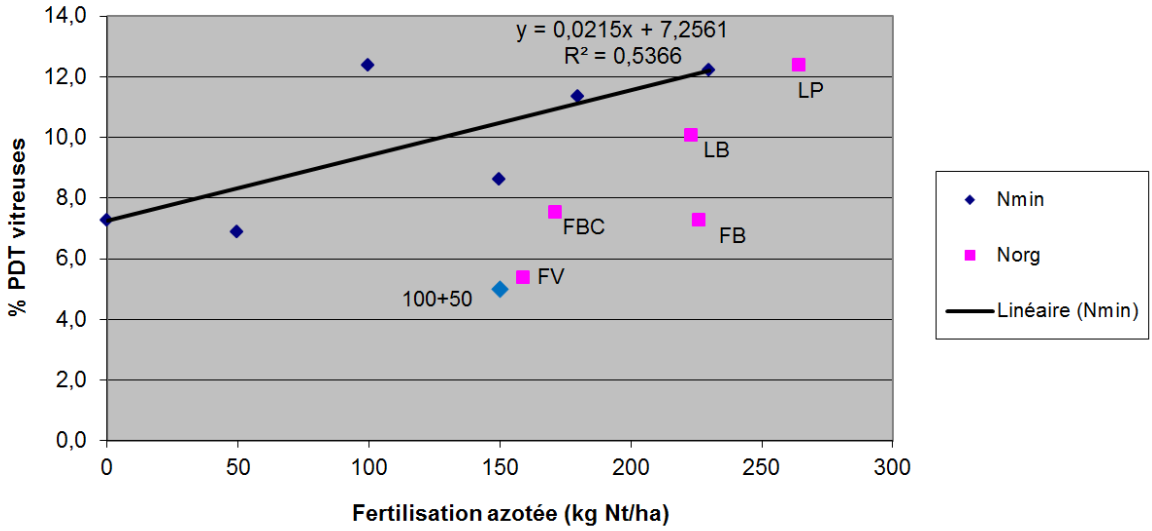

Figure 9. Pourcentage de PDT flottantes en fonction de la fertilisation azotée

On remarque que les engrais organiques à action rapide appliqués en quantité supérieure à 200uN ont donné des proportions plus élevées en flottantes qu'avec des engrais à action lente et/ou appliqués en quantité plus faible. L'application de 230 uN minéral ou de lisier de porc à forte dose offre de hauts rendements bruts, mais donne plus de 12% de flottantes (cf. Tableau 3).

3.2.1.5 Rendement économique

Cette notion de rendement économique permet de relativiser le rendement obtenu en fonction de différents paramètres liés à la production. Dans le calcul suivant (Tableau 4), le rendement total est modifié afin de tenir compte du coût de la fertilisation appliquée et du prix de vente de la récolte. En faisant varier ces deux facteurs, on constate que la fertilisation conseillée (180 uN) correspond à l'optimum économique dans quasiment toutes les situations de prix de vente allant de 5 à 25 €/100kg et des coûts de fertilisants azotés allant de 150 à 300 €/t.

Tableau 4. Détermination de la fertilisation permettant d'obtenir le meilleur rendement économique (surligné) calculé en fonction du prix de l'engrais azoté et du prix de vente de la Bintje en 2011.

	Engrais N27 (€/t) :	150				200				**250**				300			
	Bintje (€/100kg) :	5	10	20	25	5	10	20	25	5	**10**	20	25	5	10	20	25
Nmin	Rendement (t/ha)																
0	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4	45,4
50	53,8	53,2	53,5	53,6	53,7	53,0	53,4	53,6	53,6	52,9	53,3	53,5	53,6	52,7	53,2	53,5	53,6
100	59,9	58,8	59,4	59,6	59,7	58,4	59,2	59,5	59,6	58,1	59,0	59,5	59,5	57,7	58,8	59,4	59,5
150	66,1	64,4	65,2	65,7	65,7	63,9	65,0	65,5	65,6	63,3	64,7	65,4	65,5	62,7	64,4	65,2	65,4
180	72,0	70,0	71,0	71,5	71,6	69,3	70,6	71,3	71,4	68,6	**70,3**	71,1	71,3	68,0	70,0	71,0	71,2
230	72,2	69,6	70,9	71,5	71,6	68,8	70,5	71,3	71,5	67,9	70,0	71,1	71,3	67,0	69,6	70,9	71,1

Le même calcul appliqué au rendement du calibre 'plus de 55mm' conduit à la conclusion que la fertilisation de 180 uN donne le meilleur rendement quel que soit les niveaux du prix de vente et du coût de l'engrais azoté. Pour information le cours de la Bintje fin 2011 était de moins de 5 €/100kg.

3.2.1.6 Reliquat d'azote

Les mesures de reliquat d'azote après récolte ont été effectuées le 3 octobre sur 90 cm de profondeur. Ils sont globalement peu élevés dans cet essai, malgré une très forte minéralisation, les rendements élevés en gros calibres et en PSE témoignant d'une bonne efficacité de l'azote. Toutes les valeurs sont situées sous la référence 2011 correspondant à la médiane des valeurs mesurées en octobre dans les parcelles de référence du Survey Surface Agricole (Vandenberghe *et al.*, 2011).

En fertilisations minérales, jusque 180 uN, le reliquat n'augmente que de 15 unités par rapport au 0 azote. Par contre lorsque l'on dépasse cette dose de 30 uN, le reliquat augmente de presque 30 kg/ha (Figure 10).

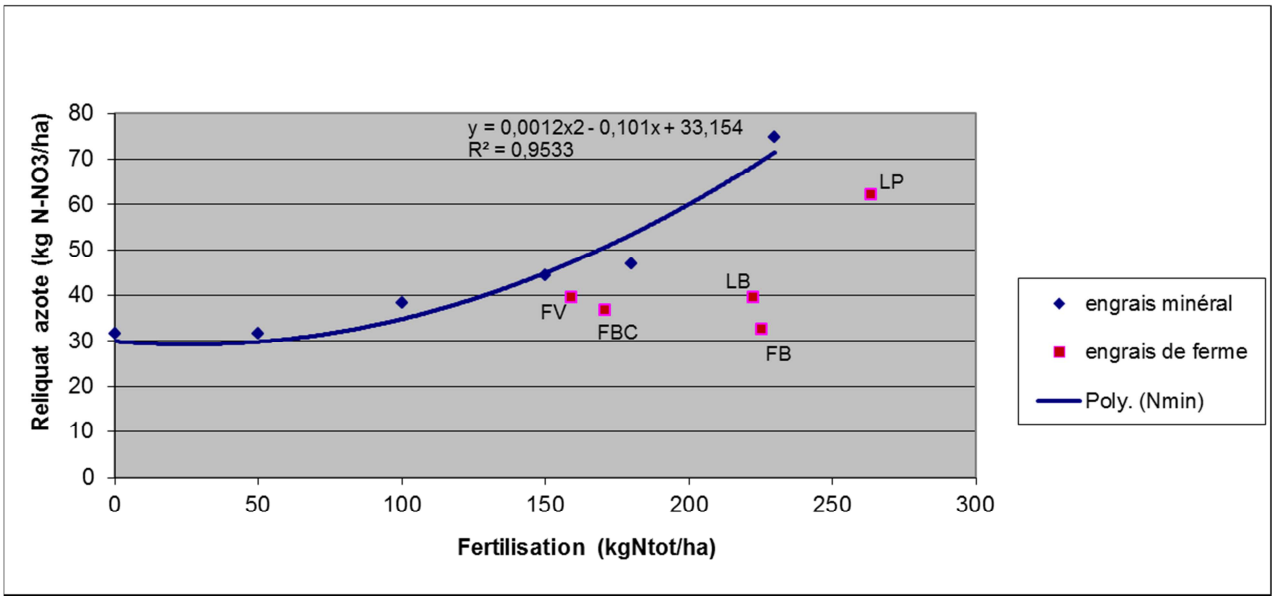

Figure 10. Reliquat d'azote post-récolte en fonction de la fertilisation minérale et organique en 2011.

L'analyse de variance confirme une influence significative de la fertilisation sur le reliquat azoté (P-valeur = 0,000193). La comparaison des moyennes montre que lorsque la fertilisation dépasse le conseil, le reliquat devient significativement supérieur à toutes les autres valeurs excepté le lisier de porc dont la quantité apportée s'est révélée être excédentaire. Les autres fertilisations organiques et les fertilisations minérales inférieures ou égales au conseil présentent de faibles reliquats (entre 30 et 40 kgN/ha) non significativement différents du témoin sans azote.

3.2.1.7 Coefficients d'équivalence engrais minéral

Une régression linéaire est effectuée sur les rendements totaux obtenus par des doses croissantes de fertilisation azotée minérale et ce jusqu'au rendement maximum obtenu. Nous obtenons une droite avec un coefficient de corrélation élevé en 2011 (cf. Figure 10).

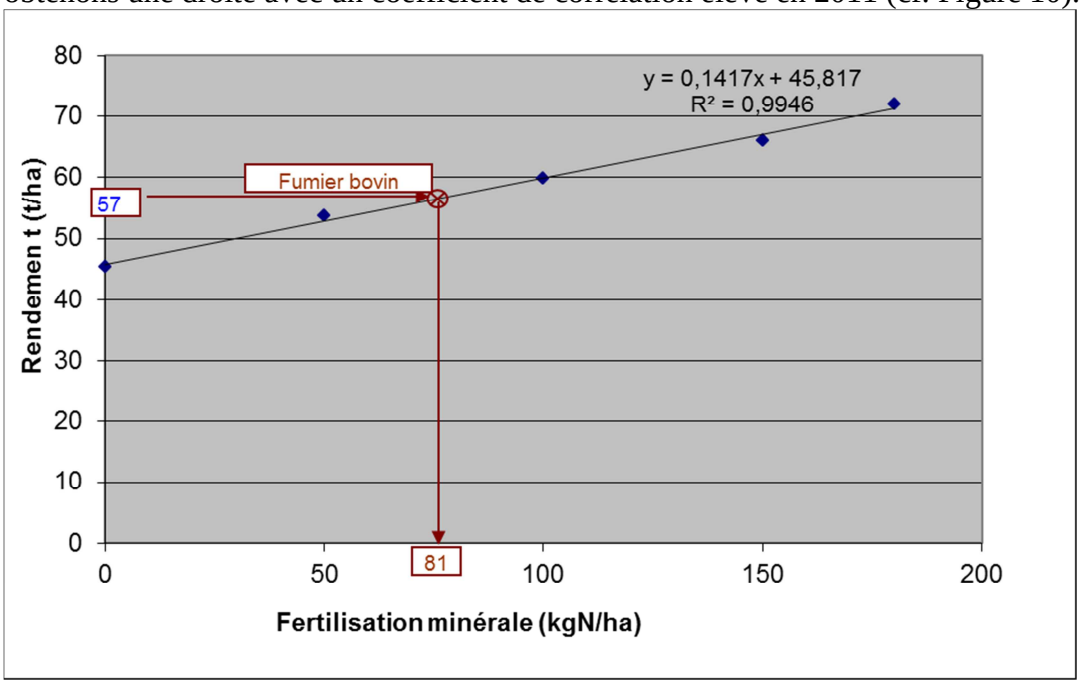

Figure 11. Régression linéaire des rendements obtenus pour des fertilisations minérales croissantes et représentation graphique de la détermination de l'équivalent engrais minéral du fumier de bovin en 2011.

L'équation de cette droite permet de déterminer les coefficients d'équivalence engrais minéral des engrais de ferme (Tableau 5).

Tableau 5. Détermination des coefficients d'équivalence engrais minéral en 2011.

Objet	Traitement	Rendement (t/ha)	Fertilisation minérale équivalente - Néq (kg/ha)	Fertilisation totale appliquée-Napp (kg/ha)	Coefficient d'équivalence (Néq/Napp)
8	FB	57	81	226	36%
9	FBC	52	47	171	28%
10	LB	63	124	223	56%
11	LP	75	206	264	78%
12	FV	60	98	159	61%

Ces résultats montrent une efficacité attendue de l'ordre de 30% pour les engrais de ferme à action lente (FB et FBC) et de l'ordre de 55-60 % pour les engrais de ferme à action rapide (LB et FV). Le lisier de porc se situe à une valeur très élevée, proche de 80%. Ce résultat est à prendre avec précaution car le rendement obtenu est situé au-delà du rendement maximum réalisé avec des engrais minéraux. De plus la dose appliquée est supérieure à l'objectif initial de 230 kg Ntot/ha.

3.2.1.8 Bilan 2011

L'année 2011 a été caractérisée par des rendements très élevés. Les principales conclusions qui peuvent être tirées de l'essai sont les suivantes :

- Le rendement maximum est obtenu avec la dose conseil (195 uN), mais il n'y a pas de différence significative avec celui obtenu avec 150 uN ;
- Les rendements obtenus par les engrais de ferme ont permis de déterminer des coefficients d'équivalence d'un niveau proche de ceux actuellement utilisés
- Le lisier de porc, surdosé lors de cet essai, a donné des résultats particulièrement élevés sur la plupart des paramètres (reliquat y compris) ;
- L'analyse des proportions en calibres confirme les observations du rendement total ;
- Les paramètres de qualité (PSE et proportion de flottantes) sont corrects, ils mettent en évidence une évolution négative avec la fertilisation ;
- Les reliquats d'azote sont assez faibles et augmentent avec la fertilisation pour atteindre une valeur maximale à la dose la plus élevée.

Le conseil du laboratoire (180 uN) est la fertilisation permettant d'obtenir le rendement maximum sur la plupart des paramètres mesurés (rendement total, calibre, rendement économique) tout en gardant un faible reliquat. Cependant 150 uN est la fertilisation minérale la plus faible pour laquelle il n'y a pas de différence significative avec le maximum pour les paramètres mesurés.

3.2.2 Récolte 2012

Malgré une minéralisation importante, le rendement moyen obtenu sur la parcelle expérimentale est assez faible en 2012 et se situe dans la moyenne nationale dont la production moyenne en PDT de transformation pour cette date de plantation a été de 41 t/ha (source : Fiwap asbl, 2012). Le rendement obtenu par l'agriculteur sur le reste de la parcelle se situait également entre 40 et 45 t/ha.

Tableau 6. Résultats moyens et traitement statistique des mesures effectuées en 2012

Objet	Traitement	Fert. N (kg/ha)	Rendement - e.s. (t/ha)	stat	Flottantes (%)	stat	Poids sous eau (gr/5kg)	stat	Reliquat post-culture (kg N-NO3/ha)	stat
1	**0**	0	29 ±0,8	ab	0,7	n.s.[11]	464	a	82	ab
2	**50**	50	35 ±0,8	cde	0,3	n.s.	464	a	66	a
3	**100**	100	36 ±1,4	def	0,9	n.s.	449	bcd	87	ab
4	**133+55**	188	39 ±0,5	fg	0,5	n.s.	445	cd	174	-
5	**150**	150	38 ±1,4	efg	0,8	n.s.	448	cd	93	abc
6	**180**	180	39 ±0,5	fg	0,3	n.s.	439	ce	106	bc
7	**230**	230	40 ±1,2	g	1,0	n.s.	432	e	117	c
8	**FB**	258	27 ±1,3	a	0,0	n.s.	460	abc	85	ab
9	**FBC**	272	30 ±1,5	ab	0,4	n.s.	465	a	80	ab
10	**LB**	319	32 ±1	bc	0,3	n.s.	464	a	81	ab
11	**LP**	167	34 ±2	cd	0,5	n.s.	466	a	77	ab
12	**FV**	239	36 ±0,7	def	0,7	n.s.	461	ab	83	ab
13	**sol nu**	-	-	-	-	-	-	-	159	d

[11] n.s. = non significatif.

3.2.2.1 Rendement total

La réponse du rendement total en PDT à la fertilisation azotée minérale est bonne. L'amplitude des rendements de 11 t/ha entre le minimum (témoin 'zéro azote' : 29 t/ha) et le maximum des rendements minéraux (230uN : 40 t/ha) est cependant moins marquée qu'en 2011 (27t/ha). La Figure 12 montre qu'à partir de 150-180 uN le gain de rendement est quasi nul pour des apports supplémentaires. Les conditions de sécheresse qui ont prévalu à partir d'août ont entraîné une sénescence précoce et accélérée des plants. La minéralisation est par contre restée très élevée pendant la période estivale, libérant plus de 50 kg d'azote sur juillet-août (cf. chapitre 3.1).

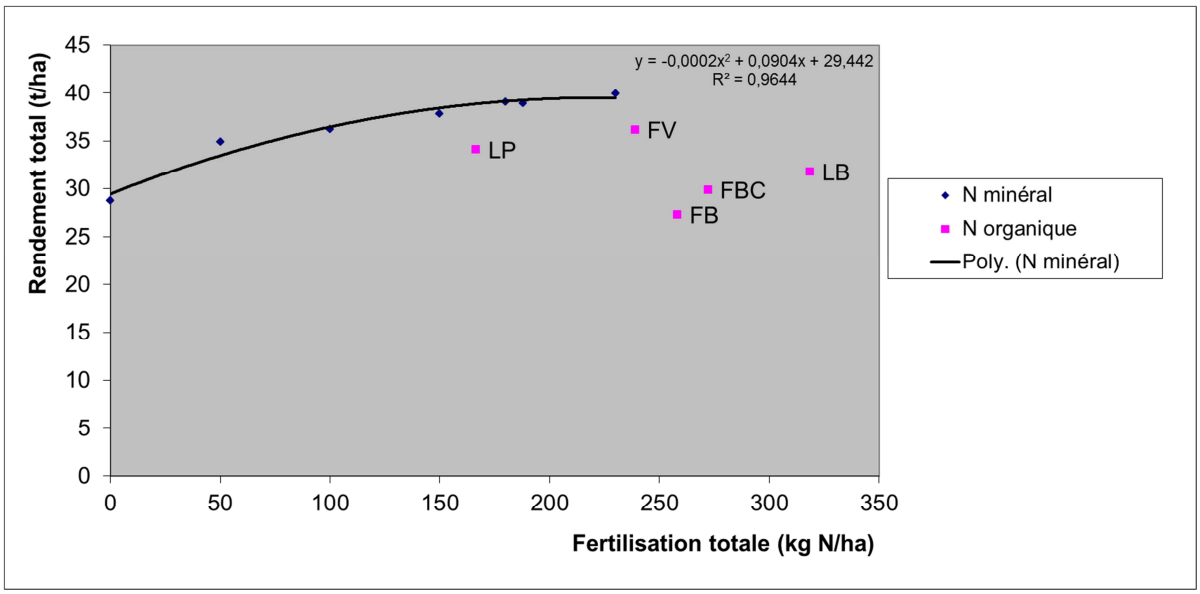

Figure 12. Réponse du rendement en PDT en fonction de la fertilisation totale, 2012.

L'analyse de variance (cf. annexe 6.1.2) montre un effet significatif de la fertilisation sur le rendement total en PDT (P-valeur = $2{,}36 \times 10^{-14}$). La comparaison des moyennes (cf. Tableau 6) permet de tirer les enseignements suivants :

- Le traitement 5 (150 kgN/ha) est la fertilisation minérale minimale donnant un rendement statistiquement équivalent au rendement maximum (P-valeur = 0,21).
- Le traitement 4 (133+55 kgN/ha) n'est pas significativement différent des traitements 5 et 6. Cela peut signifier que l'apport du complément n'était pas nécessaire. Pour information, le chlorophyllomètre avait déclenché, signifiant la nécessité d'apporter le complément. Cependant celui-ci n'a pas été valorisé, vraisemblablement dû aux conditions météorologiques décrites plus haut. Cette explication est validée par le niveau d'APL particulièrement élevée pour le traitement 4 (cf. 3.2.2.6).
- Concernant les fertilisations organiques, aucun traitement n'est équivalent au rendement maximum.
- Le fumier de bovin et le fumier composté présentent des rendements statistiquement équivalents au témoin non fertilisé (P-valeur respectivement de 0,38 et 0,50).
- le traitement lisier de bovin a obtenu un rendement statistiquement équivalent au témoin non fertilisé (P-valeur = 0,07) et le lisier de porc au traitement 2 (50uN) (P-valeur = 0,62).
- Le fumier de volaille donne des résultats comparables au traitement 3 de 100 uN (P-valeur = 0,95).

3.2.2.2 Calibres

L'analyse des rendements en tenant compte du calibre permet de compléter l'interprétation (Figure 13). Il est à noter qu'en 2012 pour les plantations tardives dans notre pays, la proportion des gros calibres a été largement inférieure par rapport à la moyenne des 5 dernières années.

- La classe 0-35 mm, assimilée à de la tare, est proportionnellement faible représentant entre 4 et 6% du total récolté. Des différences significatives (cf. annexe 6.1.2) existent entre les traitements (P-valeur = $1{,}69*10^{-5}$). Les lisiers et le fumier de volaille ont des proportions de petits calibres comparables au traitement 3 (50uN) et le fumier et le fumier composté se situent au niveau du témoin. Les fertilisations minérales supérieures à 150 uN ont des proportions faibles (~4%) sans différence significative.
- La classe 35-55 mm se situe aux alentours de 20 t/ha, avec des différences significatives entre traitements (P-valeur = 0,02). Les comparaisons données pour la classe 0-35 sont valables pour cette classe-ci également. Signalons que le pourcentage de 35-55mm le plus faible (54%) est obtenu par la fertilisation la plus élevée (230 uN) et le pourcentage le plus élevé revient au témoin (75%).
- La classe 55mm et + est caractérisée par des différences hautement significatives ((P-valeur = $2*10^{-16}$). Le maximum est atteint par la fertilisation de 230 uN : 22t/ha représentant 54% du rendement total, significativement supérieur à tous les autres traitements. Les traitements 3 à 6 (de 100 à 180 uN) (43 à 47%) ainsi que le fumier de volaille (38%) sont statistiquement équivalents. Les traitements lisier de bovin et de porc (respectivement 9 et 12 t/ha) sont statistiquement proches du traitement 2 (50 uN). Le fumier de bovin et le fumier composté obtiennent des résultats équivalents au témoin (0 uN).

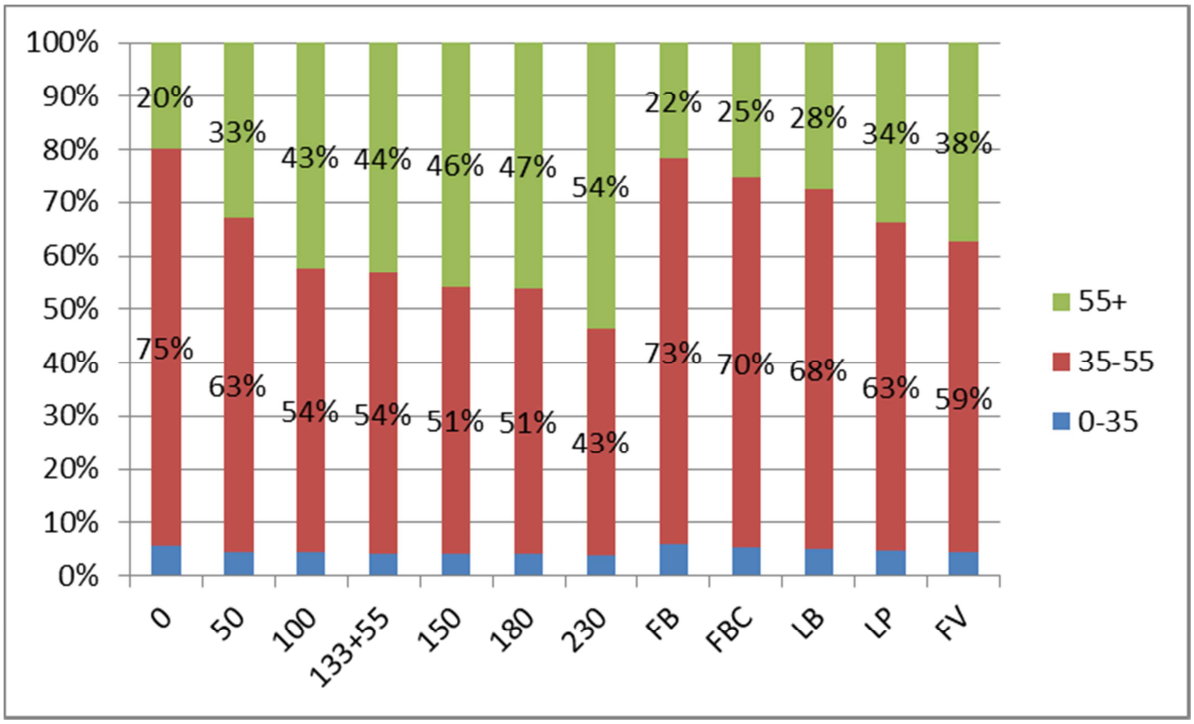

Figure 13 . Proportion moyenne de chaque calibre en fonction de la dose de fertilisant minéral et du type de fertilisation organique, 2012.

3.2.2.3 Poids sous eau

En 2012, le PSE moyen des récoltes en Belgique se situait autour de 400g/5kg (variété Bintje). La Figure 14 montre une très bonne corrélation entre l'augmentation de la fertilisation et la diminution du poids sous-eau. Celui-ci diminue avec l'augmentation de la fertilisation minérale. L'analyse de variance indique une influence significative de la fertilisation sur le PSE (P-valeur = $4.9*10^{-8}$; cf. annexe 6.1.2)

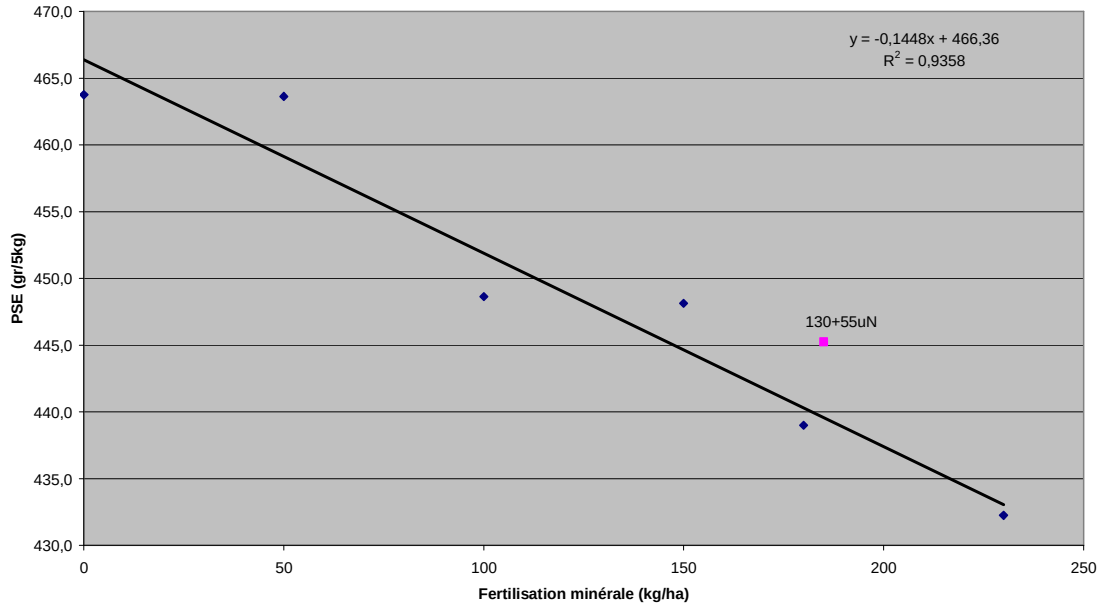

Figure 14. Évolution du PSE en fonction de la fertilisation azotée minérale en 2012.

Si on regarde uniquement les engrais de ferme (Figure 15), les valeurs sont globalement élevées et comparables à des fertilisations minérales faibles. L'analyse de variance n'indique aucune différence significative entre les engrais à action lente ou rapide (P-valeur = 0.748), contrairement à l'année 2011 où les engrais de ferme à action lente ont montré des PSE plus élevés.

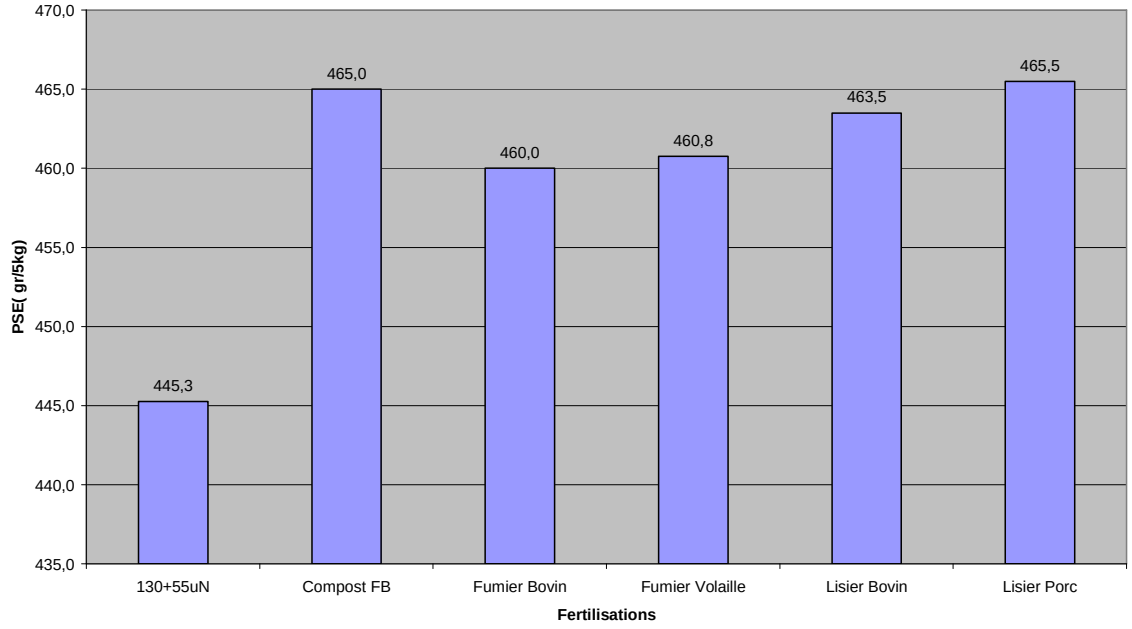

Figure 15. PSE en fonction des fertilisants organiques en 2012.

3.2.2.4 Proportion de flottantes

En 2012, aucune influence de la fertilisation n'a pu être mise en évidence sur la proportion de PDT flottantes (P-valeur = 0,844). Signalons que le pourcentage moyen est faible allant de 0 à 1 % selon les traitements (cf. Tableau 6) ce qui est largement inférieur à 2011 (9% en moyenne).

3.2.2.5 Rendement économique

La récolte 2012 est marquée par des rendements plus faibles que 2011 et des prix plus élevés (Fontane : environ 25 €/q jusque fin 2012). Le rendement économique le plus élevé dans les conditions de l'essai était obtenu par la fertilisation maximum dans la plupart des scénarios (Tableau 7) tels que décrit au point 3.2.1.5. Cependant ce résultat doit être relativisé avec les autres paramètres présentés et notamment, ci-après, le reliquat d'azote (cf. 3.2.2.6).

Tableau 7. Détermination de la fertilisation permettant d'obtenir le meilleur rendement économique (surligné) calculé en fonction du prix de l'engrais azoté et du prix de vente de la Fontane en 2012.

	Engrais N27 (€/t) :	150				200				250				300			
	Fontane (€/100kg) :	5	10	20	25	5	10	20	25	5	10	20	25	5	10	20	25
Nmin	Rendement (t/ha)																
0	28,7	28,7	28,7	28,7	28,7	28,7	28,7	28,7	28,7	28,7	28,7	28,7	28,7	28,7	28,7	28,7	28,7
50	34,9	34,3	34,6	34,7	34,8	34,1	34,5	34,7	34,7	33,9	34,4	34,6	34,7	33,8	34,3	34,6	34,6
100	36,2	35,1	35,7	36,0	36,0	34,8	35,5	35,9	35,9	34,4	35,3	35,8	35,9	34,0	35,1	35,7	35,8
150	37,9	36,2	37,1	37,5	37,6	35,7	36,8	37,3	37,5	35,1	36,5	37,2	37,3	34,6	36,2	37,1	37,2
180	39,1	37,1	38,1	38,6	38,7	36,4	37,8	38,4	38,6	35,8	37,4	38,3	38,4	35,1	37,1	38,1	38,3
230	40,0	37,4	38,7	39,4	39,5	36,6	38,3	39,1	39,3	35,7	37,9	38,9	39,1	34,9	37,4	38,7	39,0

Si on ne prend en compte que les calibres commercialisables (35mm et +) ou uniquement les calibres de plus de 55 mm, la conclusion reste que le maximum est obtenu par le traitement 7 (230 uN).

3.2.2.6 Reliquat d'azote

Les mesures de reliquat d'azote après récolte ont été effectuées le 31 octobre sur 90 cm de profondeur. Contrairement à 2011, ils sont globalement élevés dans cet essai, vraisemblablement liés aux mauvais rendements et la faible proportion de gros calibres, témoignant d'une faible efficacité dans l'utilisation de l'azote. Comme rappelé plus haut, le cycle de culture et donc la durée de prélèvement a été raccourcie par une date de plantation tardive et une relative sécheresse en fin d'été. La courbe de régression représentant l'évolution du reliquat en fonction de la fertilisation minérale est cependant celle attendue, elle confirme le risque d'APL élevé pour les fertilisations non raisonnées (Figure 16).

L'analyse de variance confirme une influence significative de la fertilisation sur le reliquat azoté (P-valeur = $6{,}65*10^{-7}$).

- Pour les fertilisations minérales, les résultats montrent que pour une fertilisation allant jusque 180 uN, le reliquat augmente de 24 kg par rapport au 0 azote et l'APL reste conforme. Il est cependant qualifié de limite à la dose conseil.
- Lorsque l'on dépasse cette dose conseil (180uN), l'APL devient non-conforme, le seuil de non-conformité étant situé à 100kg N-NO3/ha le 15/10.
- Pour les fertilisations organiques, l'ensemble des reliquats mesurés sont conformes et se situent au niveau des reliquats les plus faibles (entre 77 et 85 kgN-NO3/ha) en fertilisation minérale (fertilisation de 0 à 100uN) (P-valeurs > 0,5). Ces valeurs d'APL correspondent à la référence 2012, soit environ 80kg N-NO3/ha le 15/10, qui est par

définition la médiane des valeurs mesurées en octobre dans les parcelles de référence du Survey Surface Agricole (De Toffoli *et al.*, 2012).

- Le traitement chlorophyllomètre (133+55 uN) présente un APL particulièrement élevé à 174 kg N-NO3/ha. Cela tend à confirmer la faible utilisation de l'azote durant la 2ème moitié de l'été. Le gain moyen d'une tonne de PDT par rapport au traitement 5 (150uN) n'a pas permis d'épuiser le complément (55uN) apporté à la fertilisation de base.

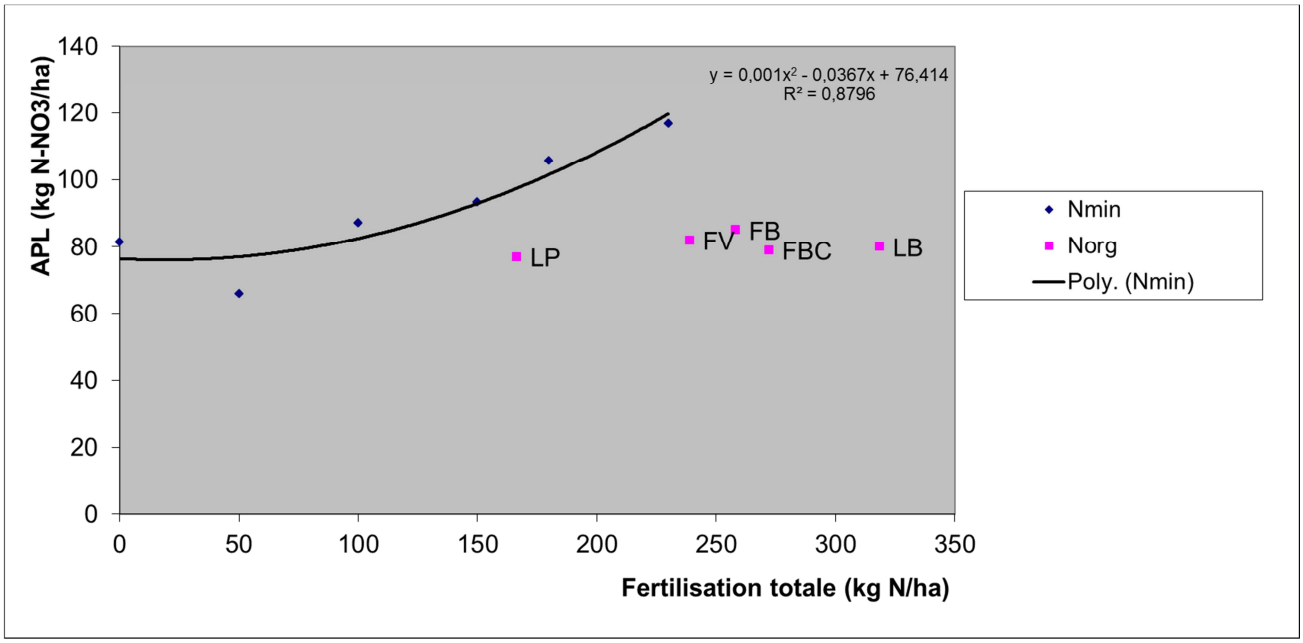

Figure 16. Reliquat d'azote post-récolte en fonction de la fertilisation minérale et organique en 2012.

3.2.2.7 Coefficients d'équivalence minérale

La régression linéaire de la réponse du rendement à la fertilisation azotée minérale a été réalisée à l'aide des moyennes obtenues par les traitements 1 à 6 (Figure 17). Le calcul des coefficients d'équivalence n'a été possible que pour le lisier de porc et le fumier de volaille. Les rendements obtenus par le fumier de bovin, le fumier de bovin composté et le lisier de bovin sont trop proches du témoin pour permettre d'établir un coefficient valable. La date de semi tardive, la sécheresse en fin d'été n'ont pas permis, en 2012, aux matières organiques d'exprimer pleinement leur potentiel de fertilisation pour la PDT. Le lisier de porc et le fumier de volaille ont tiré leur épingle du jeu grâce à leur rapidité d'action, mais les coefficients calculés ne sont pas à la hauteur de ceux déduits de l'essai réalisé en 2011 (cf. Tableau 8).

Tableau 8. Détermination des coefficients d'équivalence engrais minéral en 2012.

Objet	Traitement	Fert. N (kg/ha)	Rendement (t/ha)	fertilisation minérale équivalente - Néq (kg/ha)	fertilisation totale appliquée- Napp (kg/ha)	Coefficient d'équivalence (Néq/Napp)
11	LP	167	34	82	167	49%
12	FV	239	36	124	239	52%

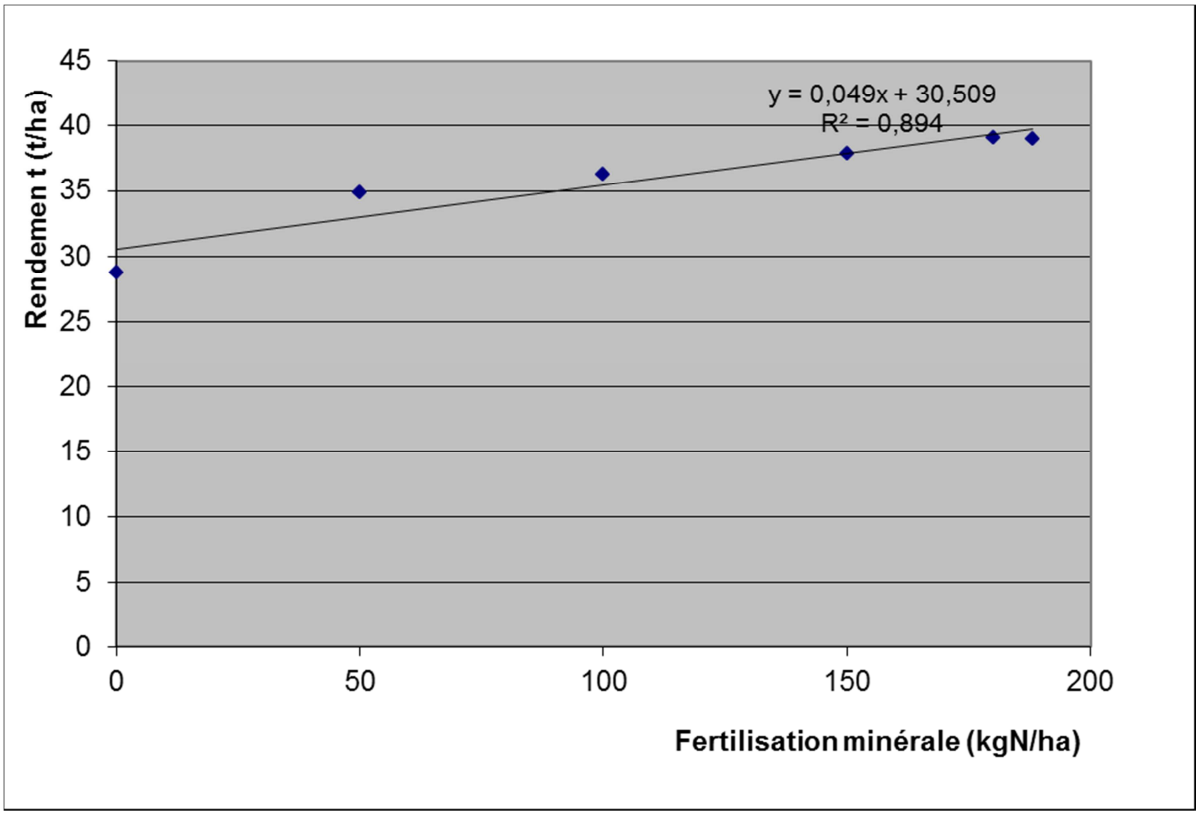

Figure 17. Régression linéaire des rendements obtenus pour des fertilisations minérales croissantes en 2012.

3.2.2.8 Bilan 2012

L'année 2012 a été caractérisée par des rendements assez faibles notamment dus à la combinaison d'une date de plantation tardive et aux conditions météorologiques. Les conséquences et conclusions qui peuvent être tirées de l'essai sont les suivantes :

- Il n'y a pas de différence significative entre le rendement total obtenu avec 150 uN et le maximum obtenu avec la dose la plus élevée de l'essai (230 uN) ;
- Seul le traitement fumier de volaille, permet d'obtenir un rendement intéressant équivalent au conseil
- Le lisier de porc donne des résultats moyens et les autres engrais de ferme n'arrivent pas à influencer significativement le rendement (coefficients d'équivalence faibles) ;
- L'analyse des proportions en calibres confirme les observations du rendement total ;
- Les paramètres de qualité (PSE et proportion de flottantes) sont bons, ils ne permettent pas de distinguer significativement les traitements organiques ;
- Les reliquats d'azote sont assez élevés et augmentent avec la fertilisation pour atteindre une valeur non conforme à la dose maximum.

Le conseil du laboratoire (180 uN) est la fertilisation maximum permettant d'obtenir un rendement proche du maximum sur la plupart des paramètres mesurés (rendement total, calibre, rendement économique) sans dépasser la limite de conformité APL. Cependant 150 uN est la fertilisation minérale la plus faible pour laquelle il n'y a pas de différence significative avec le maximum, tout en gardant de bons résultats sur l'ensemble des paramètres étudiés. En outre pour cette fertilisation comme pour le conseil, le reliquat n'est pas différent du témoin non fertilisé.

3.2.3 Récolte 2013

La parcelle expérimentale a donné des rendements élevés en 2013. La moyenne de l'essai se situant à 59 t/ha. La moyenne du rendement brut en Bintje de la production belge était également situé à 59 t/ha (source : Fiwap asbl).

Le traitement 4 'chlorophyllomètre' n'a pas déclenché dans la moitié des répétitions (apport du complément de 30% de fertilisation non nécessaire) et la décision a été prise de ne pas apporter le complément afin de disposer d'une fertilisation intermédiaire supplémentaire.

Tableau 9. Résultats moyens et traitements statistiques des mesures effectuées en 2013.

Objet	Traitement	Fert. N (kg/ha)	Rendement - e.s. (t/ha)	stat	Flottantes (%)	stat	Poids sous eau (gr/5kg)	stat	Reliquat post-culture (kg N-NO3/ha)	stat
1	**0**	0	56 ±2,4	ab	0,13	n.s.	428	n.s.	29	ab
2	**50**	50	58 ±2,5	abc	0,33	n.s.	402	n.s.	33	ab
3	**100**	100	59 ±1,5	abcd	0,09	n.s.	395	n.s.	37	ab
4	**135**	135	61 ±1,3	cd	0,19	n.s.	406	n.s.	44	bc
5	**150**	150	60 ±1,4	bcd	0,43	n.s.	394	n.s.	39	abc
6	**195**	195	63 ±0,8	cd	0,06	n.s.	381	n.s.	57	c
7	**230**	230	58 ±1,6	abc	1,34	n.s.	390	n.s.	76	d
8	**FB**	267	55 ±1,9	ab	0,83	n.s.	405	n.s.	23	a
9	**FBC**	253	55 ±2,1	a	0,14	n.s.	407	n.s.	28	ab
10	**LB**	173	58 ±1,6	abc	0,72	n.s.	400	n.s.	26	ab
11	**LP**	103	61 ±1,6	cd	0,36	n.s.	399	n.s.	31	ab
12	**FV**	178	64 ±2,2	d	0,55	n.s.	403	n.s.	32	ab

3.2.3.1 Rendement total

La réponse du rendement total en PDT à la fertilisation azotée minérale est faible en 2013, dû à un témoin élevé. L'amplitude des rendements de 6,7 t/ha entre le minimum (témoin 'zéro azote' : 56 t/ha) et le maximum des rendements minéraux (195uN : 63 t/ha) est le plus faible enregistré sur les 3 années d'expérimentation (maximum en 2011 avec 27t/ha). La Figure 18 montre qu'à partir de la dose conseil de 195 uN aucun gain de rendement n'est possible et tend même à diminuer pour des apports d'engrais supplémentaires.

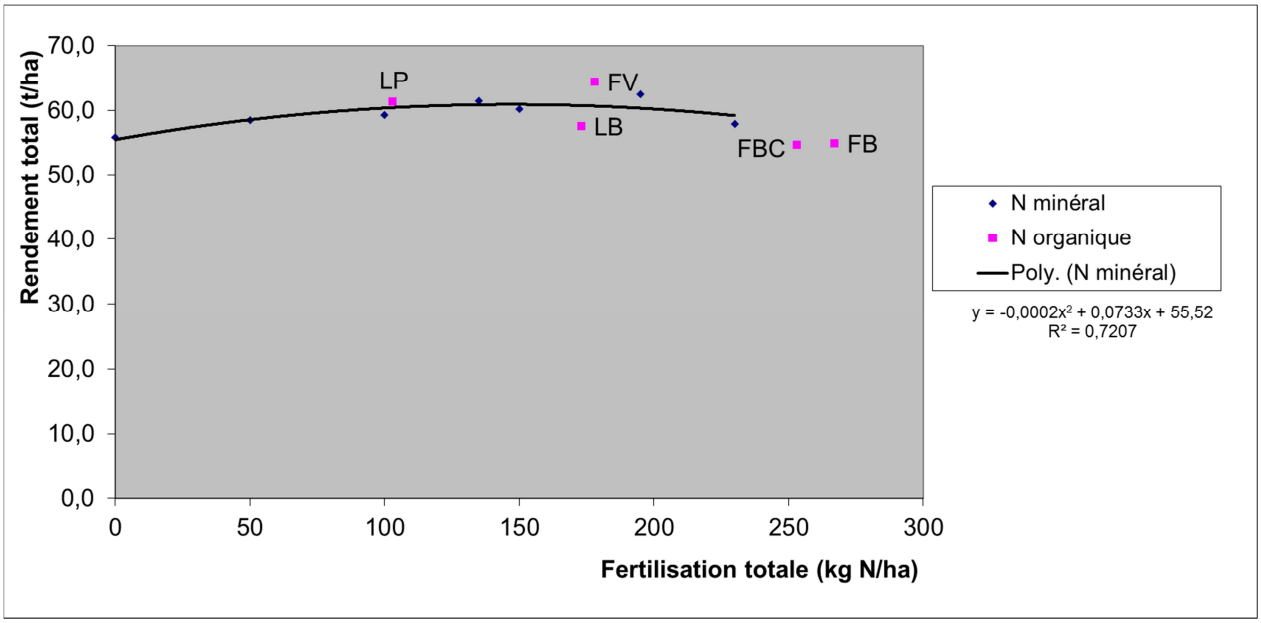

Figure 18. Réponse du rendement en PDT en fonction de la fertilisation totale, 2013.

L'analyse de variance (cf. annexe 0) montre un effet significatif de la fertilisation sur le rendement total en PDT (P-valeur = 0.00931). La comparaison des moyennes (cf. Tableau 9) permet de tirer les enseignements suivants :

- En fertilisation minérale, dès l'apport de 50uN (traitement 2, 58t/ha) le rendement obtenu n'est pas significativement différent du rendement maximum (traitement 6, 195 uN, 63 t/ha) (P-valeur = 0,1415).
- La fertilisation maximale de 230 uN (traitement 7) donne un rendement non significativement différent du témoin sans azote.
- Concernant les fertilisations organiques, les rendements du lisier de porc et du fumier de volaille sont équivalents au rendement maximum.
- Le fumier de bovin et le fumier composté présentent des rendements statistiquement équivalents au témoin non fertilisé (P-valeur respectivement de 0,74 et 0,68) et le lisier de bovin au traitement 2 (50 uN ; P-valeur = 0,73). Notons que le rendement le plus faible en 2013 est obtenu par le fumier composté, qui provient d'un compost vieux (plus de 6 mois), contrairement aux années antérieures (compost de moins de 3 mois).
- Etonnamment, le traitement fumier de volaille a obtenu un rendement supérieur (mais non significativement) au rendement maximum obtenu avec une fertilisation minérale.

3.2.3.2 Calibres

L'analyse des rendements en tenant compte du calibre permet d'affiner l'interprétation réalisée sur les rendements totaux (Tableau 10 et Figure 19).

Tableau 10. Rendement des traitements en fonction du calibre en t/ha en 2013.

Traitement	0-35mm	stat	35-55mm	stat	55+mm	stat
0uN	0,9	n.s.	22,6	d	32,3	ab
50uN	1,0	n.s.	22,3	d	35,2	abc
100uN	1,2	n.s.	22,0	d	36,1	bcd
135uN	1,1	n.s.	19,0	bc	41,3	de
150uN	1,0	n.s.	18,4	b	40,8	de
195uN	0,9	n.s.	16,4	ab	45,2	e
230uN	1,1	n.s.	15,2	a	41,6	de
FB	0,9	n.s.	23,6	d	30,4	a
FBC	0,9	n.s.	22,3	d	31,5	ab
LB	1,1	n.s.	23,1	d	33,4	abc
LP	1,1	n.s.	21,4	cd	38,9	cd
FV	1,1	n.s.	18,8	bc	44,5	e

- La classe 0-35 mm, assimilée à de la tare, se situe entre 1,5 et 2 t/ha proche de la moyenne nationale (2t/ha). Tous traitements confondus, cela représente une proportion faible du rendement à environ 1% du total récolté. Aucune différence significative ne peut être mise en évidence entre les traitements (P-valeur = 0,088 ; cf. annexe 0).
- La classe 35-55 mm se situe entre 15 et 23 t/ha, avec des différences significatives entre traitements (P-valeur = $4{,}81 \times 10^{-9}$). Les comparaisons de moyennes montrent que les fertilisations minérales faibles (traitement 1 à 3 ; 0 à 100 uN) et les fertilisations organiques fumier, fumier composté et lisier bovin ont des proportions significativement plus élevées que les fertilisations minérales élevées (traitements 6 et 7) et organiques (lisier de porc et fumier de volaille).
- La classe 55mm et + est caractérisée par des différences hautement significatives (P-valeur = $5{,}83 * 10^{-8}$). Le maximum est atteint par la fertilisation de 195 uN : 45t/ha représentant 72% du rendement total. Ceci correspond avec la moyenne belge pour la Bintje en 2013 (74% de 50+). Dès l'apport de 135 uN le rendement en 55+mm est équivalent au maximum. Les traitements organiques sont séparés en deux catégories. D'une part le fumier, le fumier composté et le lisier de bovin (traitements 8 à 10) donnent des rendements en gros calibres équivalents au témoin non fertilisé. D'autre part le lisier de porc donne une proportion de 55+ mm statistiquement proche du traitement 5 (150 uN) (P-valeur = 0,496) et le fumier de volaille est statistiquement équivalent au maximum obtenu (P-valeur = 0,796).

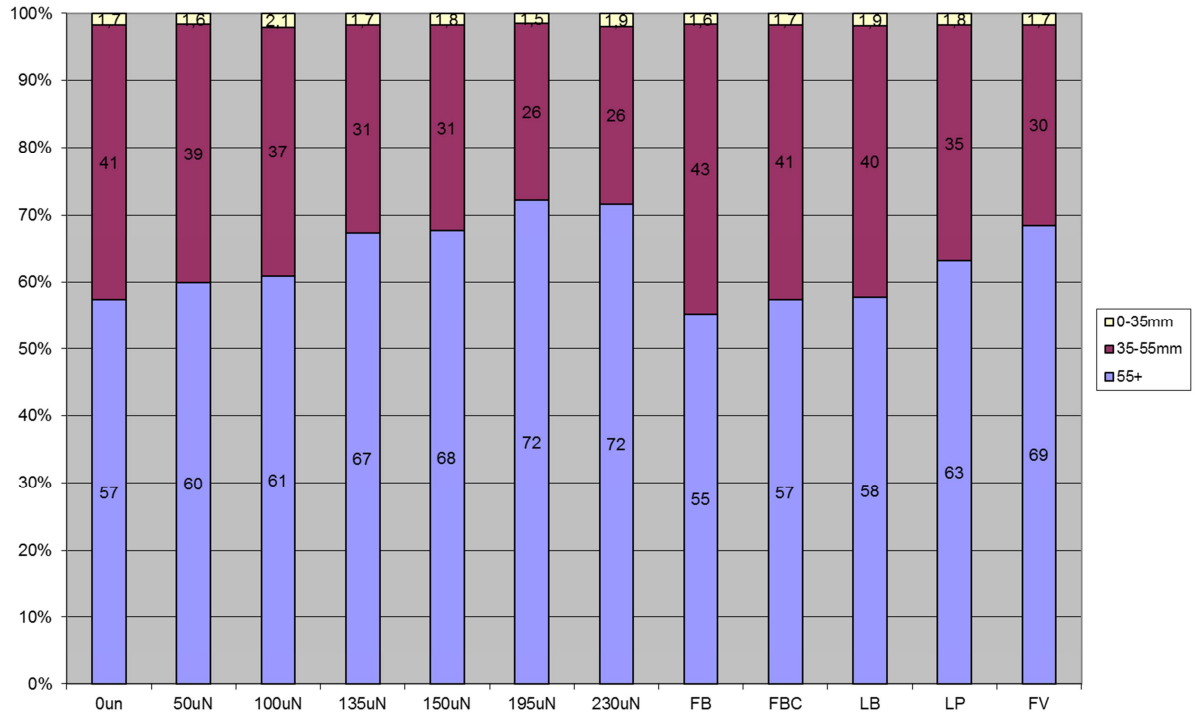

Figure 19. Proportion moyenne de chaque calibre en fonction de la dose de fertilisant minéral et du type de fertilisation organique en 2013.

3.2.3.3 Poids sous eau

En 2013, le PSE moyen des récoltes en Belgique se situait à 389 g/5kg (variété Bintje). Sur la parcelle d'essai en 2013, le PSE moyen se situait à 401 g/5kg. Le graphique ci-dessous montre une corrélation entre l'augmentation de la fertilisation et la diminution du poids sous-eau (Figure 20). Cela est confirmé par l'analyse de variance si celle-ci est réalisée uniquement sur les résultats de PSE obtenus par les fertilisations minérales (P-valeur = 0,0319 ; cf. annexe 0). Un résultat différent est obtenu si l'on tient compte également des fertilisations organiques (P-valeur = 0,305 ; cf. annexe 0). Signalons que même pour les fertilisations élevées, le PSE reste supérieur à la valeur de 360 g/5kg nécessaire pour la commercialisation auprès des transformateurs.

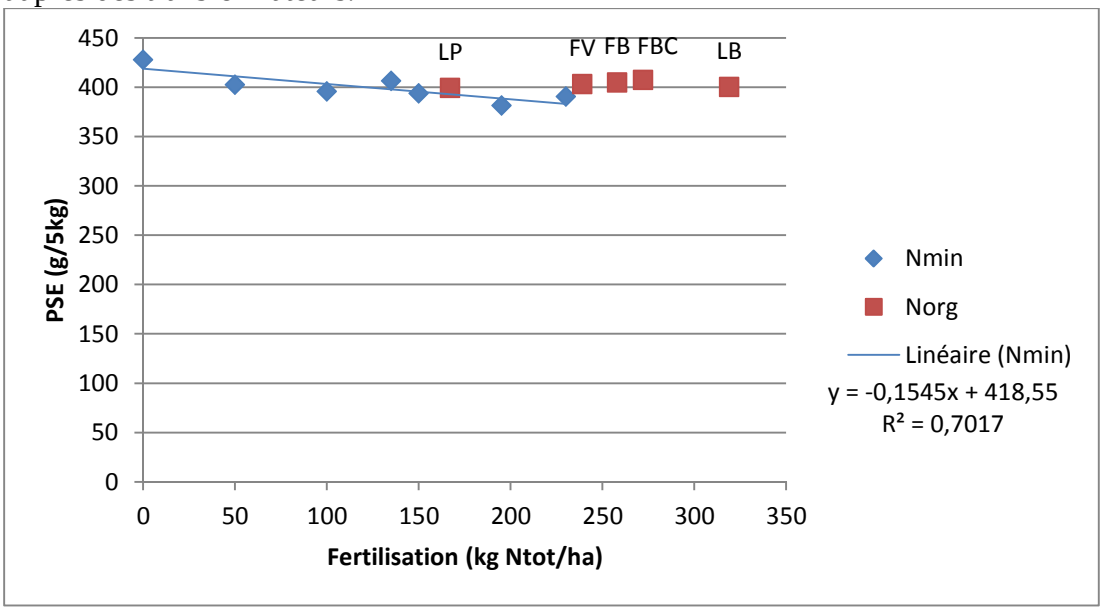

Figure 20. Évolution du PSE en fonction de la fertilisation azotée minérale et organique en 2013.

3.2.3.4 Proportion de flottantes

En 2013, aucune influence de la fertilisation n'a pu être mise en évidence sur la proportion de PDT flottantes (P-valeur = 0,248). Comme en 2012, le pourcentage moyen est faible, allant de 0,1 à 1,3 % selon les traitements (cf. Figure 21). Signalons que le résultat le plus élevé est obtenu par la fertilisation la plus élevée (traitement 7, 230uN).

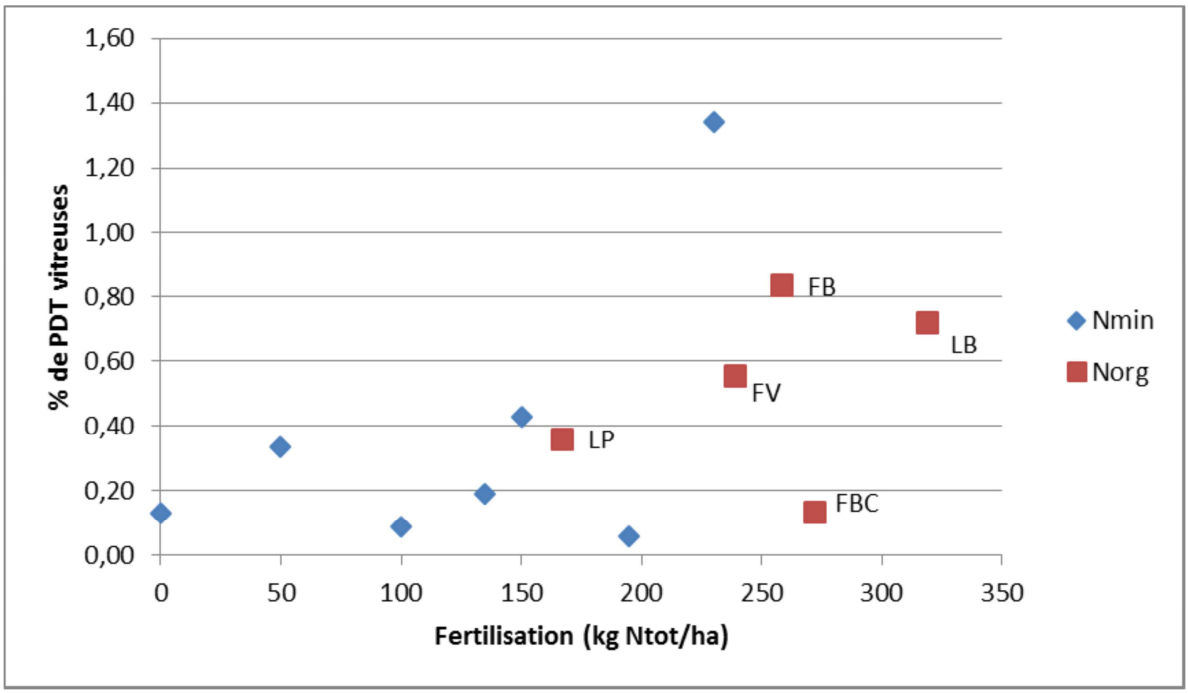

Figure 21. Proportions de PDT flottantes obtenues par les fertilisations minérales et organiques en 2013.

3.2.3.5 Rendement économique

La récolte 2012 est marquée par des rendements élevés et des prix moyens (Bintje : environ 13 €/100kg jusque fin 2013). Le rendement économique le plus élevé dans les conditions de l'essai était obtenu par la fertilisation conseillée (195 uN) dans la plupart des scénarios (Tableau 11) tels que décrit au point 3.2.1.5. Cependant ce résultat doit être relativisé avec les autres paramètres présentés et notamment le reliquat d'azote.

Tableau 11. Détermination de la fertilisation permettant d'obtenir le meilleur rendement économique (surligné) calculé en fonction du prix de l'engrais azoté et du prix de vente de la Bintje en 2013.

	Engrais N27 (€/t) :	150				200				250				300			
	Bintje (€/100kg) :	5	10	20	25	5	10	20	25	5	10	20	25	5	10	20	25
Nmin	Rendement (t/ha)																
0	55,9	55,9	55,9	55,9	55,9	55,9	55,9	55,9	55,9	55,9	55,9	55,9	55,9	55,9	55,9	55,9	55,9
50	58,5	57,9	58,2	58,3	58,4	57,7	58,1	58,3	58,3	57,6	58,0	58,3	58,3	57,4	57,9	58,2	58,3
100	59,3	58,2	58,7	59,0	59,1	57,8	58,5	58,9	59,0	57,4	58,3	58,8	58,9	57,1	58,2	58,7	58,8
135	61,0	59,5	60,3	60,6	60,7	59,0	60,0	60,5	60,6	58,5	59,8	60,4	60,5	58,0	59,5	60,3	60,4
150	60,3	58,6	59,4	59,8	59,9	58,0	59,2	59,7	59,8	57,5	58,9	59,6	59,7	56,9	58,6	59,4	59,6
195	62,6	60,6	61,6	62,1	62,2	59,9	61,2	61,9	62,0	59,2	60,9	61,7	61,9	58,6	60,6	61,6	61,8
230	57,9	55,3	56,6	57,3	57,4	54,5	56,2	57,0	57,2	53,6	55,8	56,8	57,0	52,8	55,3	56,6	56,9

Si on ne prend en compte que les calibres commercialisable (35mm et +) ou uniquement les calibres de plus de 55 mm, la conclusion reste que le maximum est obtenu par le traitement 6 (195 uN).

3.2.3.6 Reliquat d'azote

Les mesures de reliquat d'azote après récolte ont été effectuées le 2 octobre sur 90 cm de profondeur. Contrairement à 2012, les résultats sont très faibles dans cet essai pour les fertilisations allant jusque 150 uN et moyens pour les fertilisations élevées, vraisemblablement liés aux hauts rendements et à la forte proportion de gros calibres, témoignant d'une bonne efficacité dans l'utilisation de l'azote. La courbe de régression représentant l'évolution du reliquat en fonction de la fertilisation minérale est celle attendue, marquant une augmentation sensible pour les doses de fertilisation les plus élevées (Figure 16). L'analyse de variance confirme une influence significative de la fertilisation sur le reliquat azoté (P-valeur = $5{,}9*10^{-5}$).

- Les fertilisations minérales allant jusque 150 uN donnent un reliquat non significativement différent du témoin non fertilisé, il n'augmente au plus que de 14 kg par rapport à celui-ci.
- Le reliquat à la dose conseil (195 uN) se situe à un niveau intermédiaire, significativement différent du témoin et de la fertilisation maximale (230u N). Cependant avec 57 kg il est cependant qualifié bon car largement en-dessous de la médiane des valeurs de références du Survey Surface Agricole en 2013 (Dossier Grenera-UCL 13-02 du présent rapport).
- Le reliquat du traitement 7 (230 uN), est significativement supérieur aux autres traitements, mais reste conforme (sous le seuil de non-conformité).
- Pour les fertilisations organiques, l'ensemble des reliquats mesurés sont très faibles (entre 23 et 32 kgN-NO3/ha), au niveau du témoin non fertilisé (P-valeurs > 0,5).

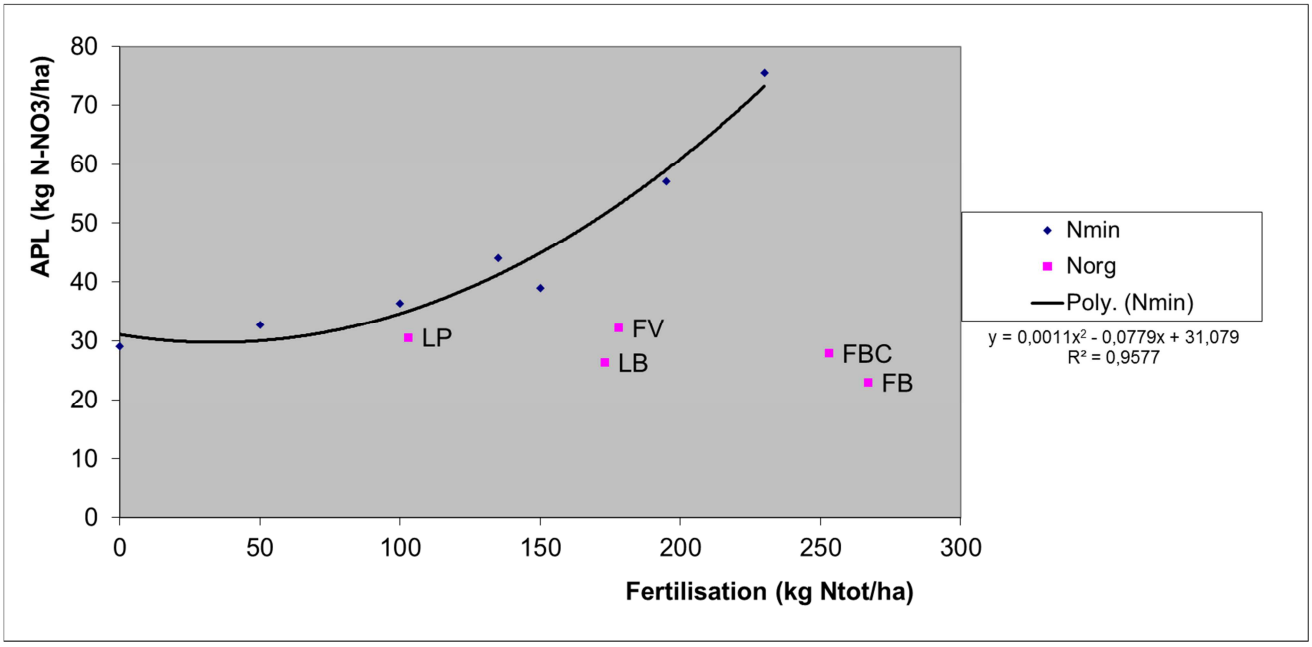

Figure 22. Reliquat d'azote post-récolte en fonction de la fertilisation minérale et organique en 2013.

3.2.3.7 Coefficients d'équivalence minérale

La régression linéaire de la réponse du rendement à la fertilisation azotée minérale a été réalisée à l'aide des moyennes obtenues par les traitements 1 à 6 (Figure 23). Le calcul des coefficients d'équivalence n'a pas été possible pour le fumier de bovin et le fumier composté car les rendements obtenus sont inférieurs au témoin.

La détermination des coefficients en 2013 (Tableau 12) montre des résultats contrastés :

- Le lisier de bovin donne un coefficient faible, de près de la moitié de celui attendu. Cela pourrait s'expliquer par le faible potentiel de libération d'azote supplémentaire par rapport à l'azote libéré par la minéralisation qui a particulièrement bien coïncidé avec les besoins de la culture (rendement témoin élevé).
- Le lisier de porc et le fumier de volaille ont une fois de plus tiré leur épingle du jeu grâce à leur rapidité d'action et peut-être également une efficacité liée à la faible dose[12] (près de la moitié de la dose pleine pour le lisier de porc), mais les coefficients calculés sont supérieurs à 100% ce qui pourrait témoigner d'un effet autre que l'effet purement fertilisation azotée (D. Ziegler, 1987).

Tableau 12. Détermination des coefficients d'équivalence engrais minéral en 2013.

Objet	Traitement	Rendement (t/ha)	fertilisation minérale équivalente - Néq (kg/ha)	fertilisation totale appliquée-Napp (kg/ha)	Coefficient d'équivalence (Néq/Napp)
10	LB	58	54	173	23%
11	LP	61	158	103	>100%
12	FV	64	253	178	>100%

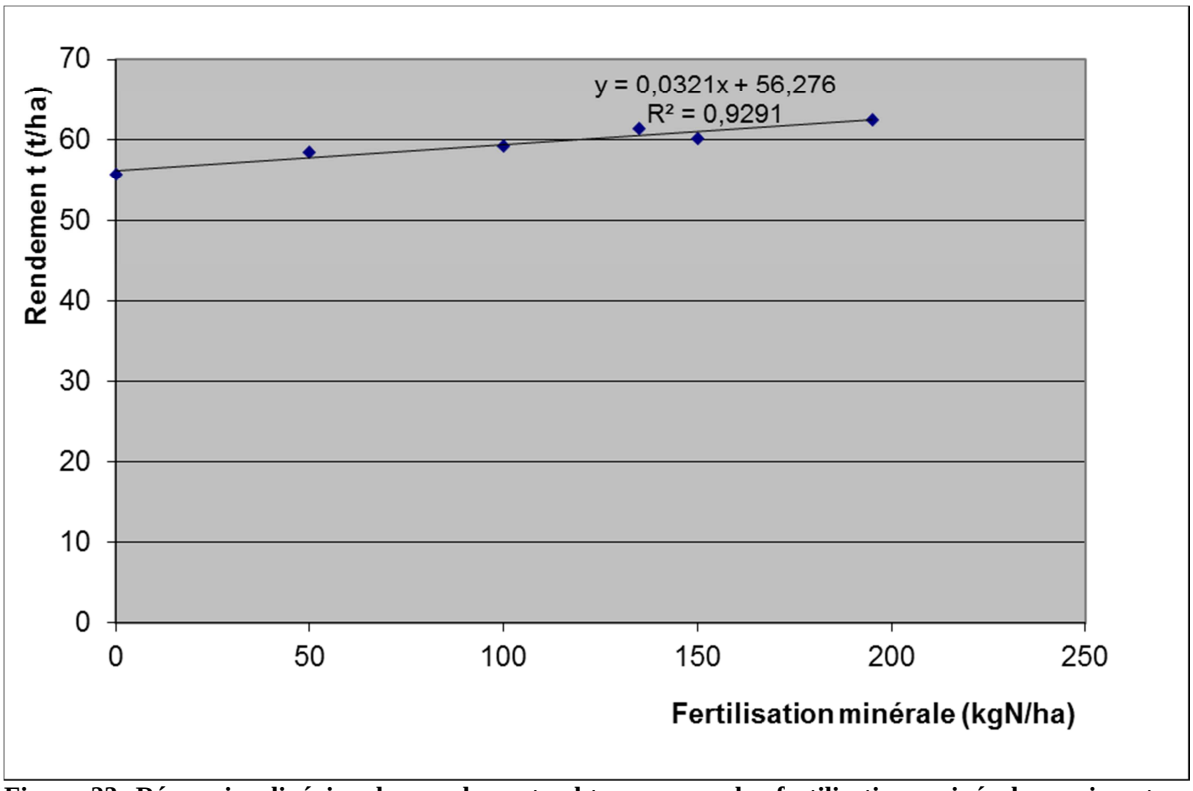

Figure 23. Régression linéaire des rendements obtenus pour des fertilisations minérales croissantes en 2013.

[12] Cela a déjà été mis en évidence dans des expérimentations antérieures (cf. De Toffoli et al., 2012 ; dossier UCL 12-44).

3.2.3.8 Bilan 2013

L'année 2013 a été caractérisée par des rendements élevés. Les conséquences et conclusions qui peuvent être tirées de l'essai sont les suivantes :

- Le témoin sans fertilisation donne un rendement élevé et la réponse à la fertilisation minérale est dès lors limitée ;
- Il n'y a pas de différence significative entre le rendement total obtenu avec 50 uN et le maximum obtenu avec le conseil (195 uN) ;
- Même constat pour les engrais de ferme lisier de porc et fumier de volaille, ceux-ci présentent en effet des coefficients d'équivalence très élevés ;
- Les autres engrais de ferme n'arrivent pas à influencer significativement le rendement (coefficients d'équivalence faibles) ;
- La proportion de gros calibres est élevée, 135 uN en minéral ou 178 kgN en fumier de volaille permettent d'atteindre un résultat statistiquement équivalent au maximum obtenu avec le conseil (195 uN) ;
- Les paramètres de qualité (PSE et proportion de flottantes) sont bons et ne permettent pas de distinguer significativement certains traitements ;
- Les reliquats d'azote sont en moyenne très faibles pour toutes les fertilisations organiques et pour les fertilisations minérales jusque 150 uN. Une augmentation significative est détectée dès l'apport de 195 uN.

La fertilisation minérale conseillée par le laboratoire (195 uN) correspond au maximum de la réponse de plusieurs paramètres mesurés (rendement total, calibre, rendement économique). Cependant 135 uN est la fertilisation minérale la plus faible pour laquelle il n'y a pas de différence significative avec ce maximum et pour ces mêmes paramètres. En outre, le reliquat de ce traitement n'est pas différent du témoin non fertilisé.

3.2.4 Synthèse de la relation rendements – reliquats

En comparant sur une même représentation graphique la relation à la fertilisation minérale des moyennes globales des 3 années d'expérimentation, on constate que le rendement en PDT et le reliquat d'azote après récolte suivent des courbes de signe contraire (Figure 24). Cela signifie qu'à partir d'un certain niveau de fertilisation, le rendement et donc l'utilisation de l'azote n'augmente plus et l'azote excédentaire se retrouve dans le reliquat. Les résultats expérimentaux montrent ici qu'à partir de 150 – 180 uN, le rendement tend à se stabiliser et le reliquat à augmenter fortement. Celui-ci risque alors de dépasser le seuil de conformité tel que cela a été observé en 2012 pour la dose de fertilisation minérale la plus élevée.

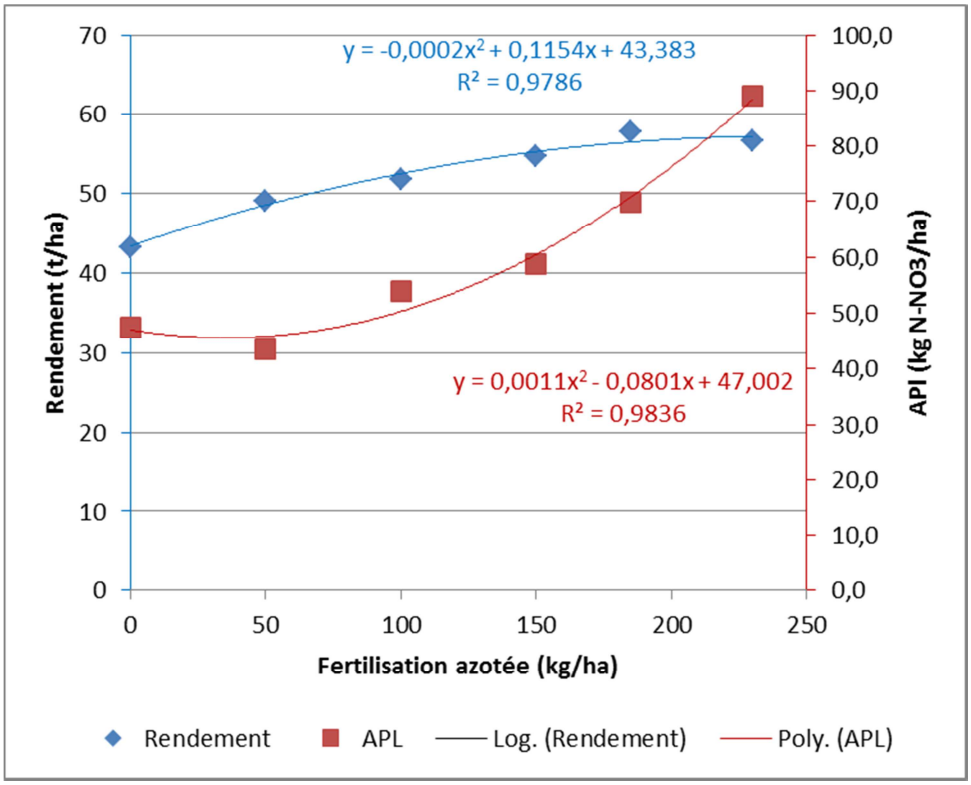

Figure 24. Comparaison de l'évolution du rendement et du reliquat d'azote nitrique en fonction de la fertilisation minérale, moyennes 2011-2013.

Concernant les fertilisations organiques, les reliquats sont faibles chaque année. A une exception près[13], ils ne présentent aucune différence significative avec le témoin non fertilisé.

[13] Suite à un surdosage (264 kg N/ha), le lisier de porc a donné en 2011 un reliquat azoté (62 kg/ha) situé proche de celui obtenu avec la fertilisation maximale (75 kg/ha).

3.2.5 Synthèse des coefficients d'équivalence minérale

Les coefficients d'équivalence sont établis en calculant la moyenne des 3 années d'expérimentation. Les résultats extrêmes découlant de certaines mesures, sont limités à 100% lorsque le coefficient dépasse cette valeur et à 0 % lorsque le rendement est inférieur au témoin.

Tableau 13. Détermination des coefficients d'équivalence engrais minéral des engrais de ferme, moyenne 2011-2013.

Objet	Traitement	Rendement moyen (t/ha)	Coefficient d'équivalence minérale (Néq/Napp)	erreur.st.
1	0 uN	43,3	-	-
8	FB	46,5	**12 %**	± 5%
9	FBC	45,7	**9 %**	± 4%
10	LB	50,9	**26 %**	± 6%
11	LP	56,8	**76 %**	± 9%
12	FV	53,4	**71 %**	± 10%

Ces résultats montrent une efficacité faible de l'ordre de 10% pour les engrais de ferme à action lente (FB et FBC) et de plus de 70 % pour les engrais de ferme à action rapide (LP et FV). Le lisier de porc se situe à une valeur très élevée, proche de 80%. Le lisier de bovin, engrais de ferme qualifié d'action rapide, se situe à un niveau plus faible qu'attendu.

Si on compare ces résultats avec les références actuellement utilisées en Wallonie (Tableau 14), on constate que les résultats expérimentaux présentés ci-dessus sont d'un côté nettement plus bas pour le fumier de bovin, le fumier composté et le lisier de bovin (inférieurs de près de 10 points), et d'un autre côté nettement plus élevés pour le lisier de porc et le fumier de volaille (supérieurs de 20 points).

Tableau 14. Coefficients d'efficacité utilisés pour la fertilisation des cultures de PDT et colza par des engrais de ferme, (Source : Nitrawal, 2010).

Par apport de > 20T	Coefficient équivalence minérale (%)
Fumier	20
Fumier composté	20
Lisier de bovins	35
Lisier de porcs	55
Fumier de volailles	55

Rappelons que les valeurs de ce tableau ont fait l'objet d'une harmonisation entre la plupart des organismes prodiguant des conseils de fumures en Wallonie[14].

[14] Les organismes ayant harmonisés leurs coefficients sont les suivants : les membres de la structure d'encadrement Nitrawal, l'ASBL Agra-Ost, le Centre de Michamps, l'ASBL CIPF, l'ASBL Fourrages-Mieux et l'ASBL IRBAB.

Tableau 15. Coefficients d'équivalence minérale (source: Requasud, 2011).

	Effet immédiat (CEMI)	Effet prolongé (CEMP)
Fumier	0,10	0,20
Fumier composté	0,10	0,20
Lisiers bovins	0,25	0,25
Lisiers porcins	0,30	0,30
Fumier de volailles	0.35	0,30

Le Tableau 15 présente les coefficients préconisés par la méthode harmonisée de conseil de fumure azotée de Requasud. Au regard de ce tableau on constate que pour le fumier, le fumier composté et le lisier de bovin, les coefficients calculés par les résultats expérimentaux (Tableau 13) sont semblables à la partie « effet immédiat » (CEMI) des coefficients du Tableau 15 et qui est assimilé à l'effet de l'azote ammoniacal et de la fraction rapidement minéralisable de l'azote organique. Par contre, pour le lisier de porc et le fumier de volaille les coefficients issus des résultats expérimentaux sont supérieurs à la combinaison des effets immédiat et prolongé pour ces matières. Pour être complet, la méthode harmonisée module l'effet de la partie 'effet prolongé' à l'aide du coefficient d'occupation du sol (COS), qui dépend du temps d'occupation du sol et donc de la période de prélèvement d'azote par la culture (COS = 0,9 pour la culture de PDT).

Les essais présentés sont consacrés à l'effet direct de l'apport d'engrais de ferme, l'année de l'application. Selon une étude récente (Maltas et al., 2012), l'arrière effet est de 8% de l'azote total valorisé la première année suivant celle de l'apport et 5% en deuxième année pour le fumier de bovin, et de 18% puis 10% pour le lisier de bovin.

4 Conclusion et perspectives

Les résultats obtenus en trois années d'expérimentation en région limoneuse, de 2011 à 2013, ont permis d'améliorer les connaissances de la fertilisation azotée de la pomme de terre, culture laissant très régulièrement des quantités élevées d'azote potentiellement lessivable. Ces résultats obtenus par l'UCL-Earth & Life Institute et Nitrawal ASBL, avec le concours de la FIWAP ASBL, montrent qu'une bonne gestion de la fertilisation permet d'obtenir une production alliant quantité (rendement brut et calibre élevés) et qualité tout en laissant des reliquats corrects (bon niveau d'APL).

Fertilisation minérale :

Le conseil de fertilisation azotée délivré par le laboratoire sur base du conseil harmonisé permet d'obtenir le rendement le plus élevé, au maximum du potentiel de production, tout en laissant un reliquat d'azote après la récolte conforme lorsqu'on le compare aux références établies annuellement dans le Survey Surface Agricole. Cependant l'analyse statistique nous montre qu'un rendement équivalent peut être obtenu à l'aide d'une fertilisation de l'ordre de 150 uN. Le reliquat azoté obtenu avec la dose de fertilisation conseillée est dans certains cas proche de la limite de conformité. Ces éléments nous conduisent à penser que le conseil harmonisé peut être considéré comme un maximum à ne pas dépasser et que l'optimum est régulièrement atteint pour une fertilisation de 30 à 50 unités inférieures au conseil. Rappelons que ceci est établi pour des fertilisations uniquement minérales.

Fertilisation organique et coefficients d'équivalence minérale :

Lorsqu'il y a apport de matière organique, il faut tenir compte, lors du conseil de fumure, de coefficients d'équivalence propre à chaque matière. Les essais successifs ont montré la difficulté d'établir ces coefficients de manière définitive. Parmi les matières testées, le lisier de porc et le fumier de volaille montrent une meilleure aptitude à fertiliser la culture de PDT. Cela se traduit par des coefficients d'équivalence logiquement plus élevés, qui dépassent cependant les valeurs attendues avec des coefficients d'efficacité de respectivement 76 et 71 % de l'azote total apporté. La rapidité à libérer l'azote contenu est un atout majeur pour une culture à durée de prélèvement relativement courte. Cet élément a vraisemblablement été à l'origine de la difficulté d'obtenir chaque année des résultats positif d'apport provenant de fertilisants à action plus lente tels que le fumier de bovin et le fumier de bovin composté. Ceux-ci ont donné des coefficients limités de respectivement 12 et 9 %. Le lisier de bovin a donné des résultats intermédiaires avec 26 % d'efficacité, assez décevants au regard de ce qui a été obtenu par ailleurs en culture de maïs.

Les fumures organiques sont intégrées au dispositif sans complément minéral. L'objectif est de pouvoir mettre en évidence le pouvoir fertilisant sans interférence d'un apport d'engrais qui peut rapidement « masquer » l'action d'un engrais de ferme. Cependant, des résultats récents acquis en maïs montrent que l'efficacité d'un fumier ou d'un lisier de bovin sans engrais minéral est de l'ordre de la moitié de celui-ci appliqué en combinaison avec un engrais minéral, ce qui corrobore les résultats présentés dans cette étude.

Dans l'état actuel des connaissances, il est recommandé de ne pas modifier les coefficients d'équivalence utilisés actuellement pour les engrais de ferme à action lente et le lisier de bovin, pour lesquels un écart d'environ 10% a été mesuré à la baisse.
Pour le lisier de porc et le fumier de volaille, une adaptation à la hausse des coefficients de respectivement 15 et 10 points afin d'atteindre 70 et 65 % est recommandée dans le but d'éviter une sur-fertilisation lors de l'apport du complément minéral suite à un épandage de ces matières au printemps. Ces valeurs sont indicatives dans la mesures où en cas d'année

particulière comme un printemps froid et/ou sec, ou en cas de plantation tardive, ces coefficients devront être revus à la baisse afin d'éviter de surestimer l'apport via la minéralisation de l'azote organique.

A l'instar de ce qui est réalisé en culture de maïs, nous pourrions envisager de poursuivre l'expérimentation en testant des doses croissantes d'engrais minéral en complément d'une dose fixe d'engrais de ferme. Cela permettrait de déterminer plus précisément l'apport réel de celui-ci à la fertilisation azotée de la pomme de terre. La combinaison de fumures organiques et minérales permettrait également d'aller plus loin dans la valorisation optimale des engrais de ferme et de mieux s'accorder à la réalité des pratiques agricoles en Wallonie.

5 Bibliographie et sources internet

Bodet J.M., Hacala S., Aubert C., Texier C., 2001. *Fertiliser avec les engrais de ferme*, ITCF, Institut de l'élevage, ITAVI, ITP. 104p.

De Toffoli M. Lambert R., 2008. *Note de synthèse sur l'efficacité des effluents*, dossier UCL-BAPA 08-02, 5p., *in* Marcoen J.M., Lambert R., Vandenberghe C., De Toffoli M., Benoit J., Deneufbourg M., 2009. *Programme de gestion durable de l'azote en agriculture wallonne – Rapport d'activités annuel intermédiaire 2008 des membres scientifiques de la Structure d'encadrement Nitrawal*. Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux et Université catholique de Louvain, 62 p + annexes

De Toffoli M., Vandenberghe C., Imbrecht O., Bachelart F., Deneufbourg M., Lambert R., Marcoen J.M., 2012. *Programme de gestion durable de l'azote en agriculture wallonne – Rapport d'activités annuel intermédiaire 2012 des membres scientifiques de la Structure d'encadrement Nitrawal*. Université catholique de Louvain et Université de Liège - Gembloux Agro-Bio Tech, 63 p. + annexes

FIWAP ASBL, 2012. Suivi du rendement et de la qualité en cours de culture de Bintje, Communiqué n°6 : 05 octobre 2012, 3p.

FIWAP ASBL, 2012. Suivi du rendement et de la qualité en cours de culture de Bintje, Communiqué n°6 : 07 octobre 2013, 2p

De Blauwer V. Florins D., et Lebrun P., 2012. Evolution des stocks belges 2011-2012, Centre pilote pomme de terre – résultats 2012, 7p.,
http://www.fiwap.be/uploads/File/brochureCPP/CPP2012/CPP2012Art2.3Stocks.pdf

Maltas A., Oberholzer H., Charles R., Bovet V. et Sinaj S., 2012. Effet à long terme des engrais organiques sur le rendement et la fertilisation azotée des cultures - in Recherche Agronomique Suisse, p.156–163.

Nitrawal, 2010 - réglette « Combien épandez-vous ».
http://www.nitrawal.be/upload_files/4.7/reglette%20epandage%202010.pdf

REQUASUD ASBL, 2011. Etablissement du conseil de fumure azotée en cultures, préconisé par l'ASBL REQUASUD, 21p.

Vandenberghe C., De Toffoli M., Deneufbourg M., Imbrecht O., Marcoen J.M., Lambert R., 2011. *Programme de gestion durable de l'azote en agriculture wallonne – Rapport d'activités annuel intermédiaire 2011 des membres scientifiques de la Structure d'encadrement Nitrawal*. Université de Liège Gembloux Agro-Bio Tech et Université catholique de Louvain, 54p + annexes

Von Schéele C., Svensson G, Rasmunsson J., 1937. Die Bestimmung des Stärkegehalts und der Trockensubstanz der Kartofell mit Hilfe des spezifischen Gewichts. Landwirtsch Vers Sta 127, 67-96.

Ziegler D., 1987. *Azote et déjections animales*, Perspectives agricoles n°115, p.159-164.

6 Annexes :

6.1 Analyses de variance

6.1.1 Récolte 2011

Rendement total

	Df	Sum sq	Mean sq	F value	Pr(>F)	
traitement	11	3446	313.29	5.57	3.92e-05	***
Residuals	36	2025	56.25			

Rendement 0-35mm

	Df	Sum sq	Mean sq	F value	Pr(>F)	
Traitement	11	0.1392	0.01265	1.199	0.323	n.s.
Residuals	36	0.3800	0.01056			

Rendement 35-55mm

	Df	Sum sq	Mean sq	F value	Pr(>F)	
traitement	11	32.59	2.963	0.786	0.652	n.s.
Residuals	36	135.72	3.770			

Rendement 55mm+

	Df	Sum sq	Mean sq	F value	Pr(>F)	
traitement	11	3352	304.69	7.687	1.28e-06	***
Residuals	36	1427	39.64			

PSE

	Df	Sum sq	Mean sq	F	value	Pr(>F)
traitement	11	15725	1429.5	15.29	1.92e-10	***
Residuals	36	3367	93.5			

Flottantes

	Df	Sum sq	Mean sq	F	value	Pr(>F)
traitement	11	0.03297	0.0029977	3.487	0.0022	**
Residuals	36	0.03095	0.0008597			

Reliquat

	Df	Sum sq	Mean sq	F	value	Pr(>F)
data.pdt$objet	1	16312	16312	16.2	0.000193	***
Residuals	50	50328	1007			

6.1.2 Récolte 2012

Rendement total

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
traitement	11	1623.2	147.57	13.4	2.36e-14	***
Residuals	84	925.2	11.01			

Rendement 0-35mm

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
traitement	11	4.795	0.4359	4.217	5.69e-05	***
Residuals	84	8.683	0.1034			

Rendement 35-55mm

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
traitement	11	158.7	14.424	2.122	0.0271	*
Residuals	84	571.0	6.797			

Rendement 55mm+

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
traitement	11	2443.7	222.15	21.1	<2e-16	***
Residuals	84	884.5	10.53			

PSE

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
traitement	11	11570	1.052	6.786	4.9e-08	***
Residuals	84	13021	155			

Flottantes

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
traitement	11	7.19	0.6537	0.575	0.844	n.s.
Residuals	84	95.48	11.367			

Reliquat

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
traitement	12	50915	4243	7.485	6.65e-07	***
Residuals	39	22107	567			

6.1.3 Récolte 2013

Rendement total

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
data.pdt$objet	11	821	74.64	2.491	0.00931	**
Residuals	84	2517	29.97			

Rendement 0-35mm

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
objet	11	0,987	0,08973	1,697	0,088	
Residuals	84	4,442	0,05289			

Rendement 35-55mm

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
objet	11	675,3	61,39	7,707	4,81E-09	***
Residuals	84	669,2	7,97			

Rendement 55mm+

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
objet	11	2307	209,72	6,719	5,83E-08	***
Residuals	84	2622	31,21			

PSE

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
objet	11	11163	1014,8	1,193	0,305	n.s.
Residuals	84	71462	850,7			

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ferti.min	6	10321	1720,2	2,543	0,0319	*
Residuals	49	33146	676,5			

Flottantes

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
objet	11	13,31	1,2095	1,284	0,248	n.s.
Residuals	84	79,11	0,9418			

Reliquat

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
objet	11	9962	905,6	5,34	5,90E-05	***
Residuals	36	6105	169,6			