

## Impacts agronomique et financier d'une réduction de la fertilisation azotée sur les principales cultures de Wallonie



Ce document doit être cité de la manière suivante :

Vandenberghe C., Comeliau S., Colinet G., 2021. 56 p.

---

## **Table des matières**

<b>1. INTRODUCTION ET OBJECTIFS .....</b>	<b>3</b>
<b>2. METHODOLOGIE .....</b>	<b>5</b>
<b>3. SYNTHÈSE DES RESULTATS ET INTERPRETATIONS.....</b>	<b>7</b>
3.1. BETTERAVE .....	7
3.2. COLZA .....	8
3.3. MAÏS.....	9
3.4. POMME DE TERRE.....	10
3.5. FROMENT .....	13
<b>4. DISCUSSION ET CONCLUSION.....</b>	<b>16</b>
<b>5. ANNEXES (RESULTATS).....</b>	<b>17</b>
5.1. BETTERAVE.....	17
5.2. COLZA .....	28
5.3. MAÏS.....	36
5.4. POMME DE TERRE.....	48
5.5. FROMENT .....	52

## 1. Introduction et objectifs

En région wallonne, le Programme de Gestion Durable de l'Azote (PGDA), transcription de la Directive Nitrates, indique (Art. R.204) que *l'épandage de fertilisants n'est autorisé que pour couvrir les besoins physiologiques des plantes en veillant à limiter les pertes d'éléments nutritifs*. L'intention est donc d'établir, de façon prévisionnelle, un équilibre entre la fourniture d'azote et les besoins de la culture.

Pour assurer le développement de la culture, les sources d'azote sont multiples (figure 1). Certaines, tels que le reliquat azoté voire l'azote déjà absorbé, sont relativement bien quantifiables. Par contre, d'autres comme la minéralisation de l'humus, des résidus (CIPAN et précédent cultural) et les effets directs des engrais de ferme sont plus complexes à bien estimer car, contrairement aux premières, elles dépendent, entre autres, des conditions climatiques de la saison à venir et, le cas échéant, d'une bonne connaissance (qualitative et quantitative) des apports d'engrais de ferme, des CIPAN enfouis, ...

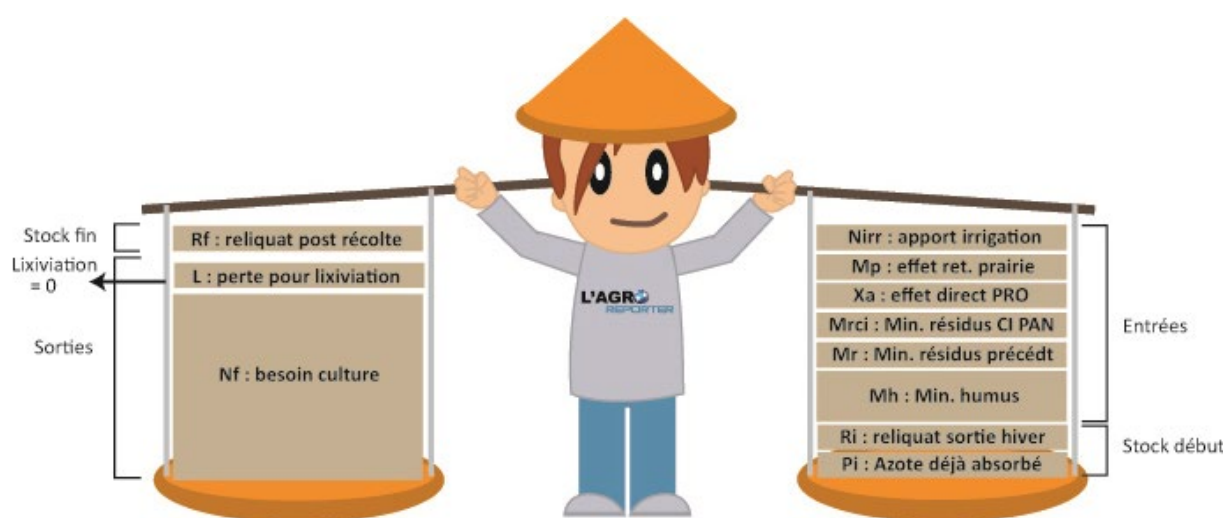


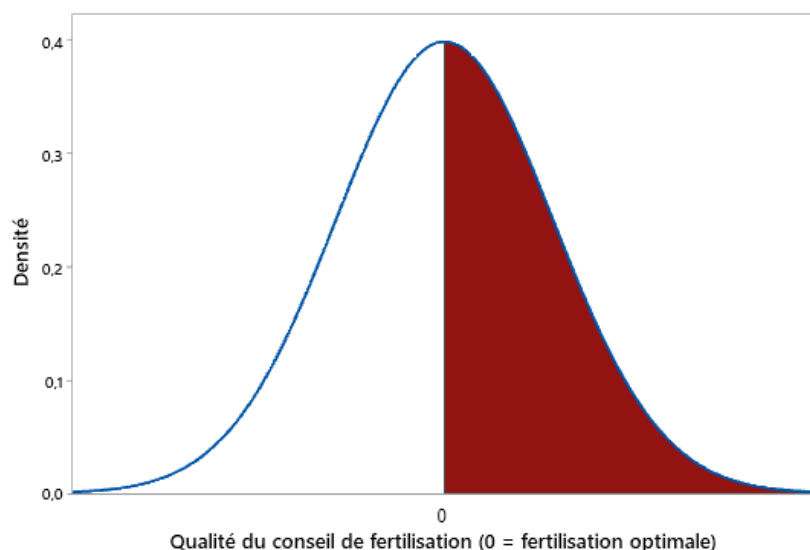
Figure 1. Equilibre des besoins et fournitures d'azote (illustration : wiki.aurea.eu)

Par ailleurs, les besoins de la culture ne sont également a priori pas exactement connus. Ceux-ci dépendent en effet du rendement final, lui-même dépendant des conditions climatiques de la saison à venir et de l'impact des éventuels pathogènes et/ou ravageurs.

*In fine*, le prescripteur réalise un bilan d'une somme de termes estimés à partir de moyennes forcément encadrées d'une certaine variabilité.

On peut donc synthétiquement représenter la distribution de l' « exactitude » des conseils de fertilisation par une courbe de Gauss (en abscisse, la qualité du conseil de fertilisation et en ordonnée, la fréquence) (figure 2) :

- l'aire en rouge représente la quantité de conseils fertilisation pour lesquels, dans la réalité (non connue), la fourniture d'azote par le sol a été sous-estimée et/ou les besoins de la culture ont été surestimés ; ce qui a conduit à une sur-fertilisation ;
- l'aire en blanc représente logiquement les conseils de fertilisation pour lesquels, toujours dans la réalité (non connue), la fourniture d'azote par le sol a été surestimée et/ou les besoins de la culture ont été sous-estimés ; ce qui a conduit à une sous-fertilisation.



**Figure 2. Distribution qualitative des conseils de fertilisation.**

Dans le premier cas de figure (aire rouge), une partie de la fertilisation n'a pas été consommée par la plante et cet azote sera, dans la plupart des situations, en grande partie perdu (lixiviation).

Dans le second cas de figure (aire blanche), tout l'azote apporté a été consommé par la culture ; ce qui laisse un reliquat à la récolte le plus faible possible. Cependant, cette même culture a manqué d'azote pour pouvoir exprimer tout son potentiel de rendement. On pourrait donc supposer que le conseil de fertilisation a été trop faible.

Cependant, il convient de rappeler que l'azote de synthèse n'est pas gratuit. Une éventuelle perte de rendement est donc 'adoucie', voire annulée si le coût de l'engrais est intégré dans le raisonnement.

L'objectif de cette étude est de se placer dans un contexte de sous-fertilisation et de basculer d'un raisonnement 'optimum agronomique' (Art. R.204 du PGDA) à un raisonnement 'optimum financier' en y intégrant le coût de l'engrais.

Où placer le curseur de la sous-fertilisation ?

Le Green Deal<sup>1</sup> (adopté par l'Europe en vue d'adapter les pratiques agricoles et préserver les ressources naturelles) propose une réduction de 20%.

<sup>1</sup> [https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/food-farming-fisheries/key\\_policies/documents/factsheet-agri-practices-under-ecoscheme\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/food-farming-fisheries/key_policies/documents/factsheet-agri-practices-under-ecoscheme_en.pdf)

## 2. Méthodologie

Pour pouvoir évaluer l'impact agronomique et financier d'une réduction de la fertilisation azotée, il est, dans un premier temps, nécessaire de disposer d'une relation entre la fertilisation et le rendement à l'échelle de la parcelle. Typiquement, ce type de relation est établie lors de chaque expérimentation relative à la fertilisation azotée.

L'objectif étant de basculer la réflexion d'un raisonnement agronomique (kg/ha) à un raisonnement financier (€/ha) afin d'y intégrer le coût de l'azote, le rendement agronomique de chaque expérimentation est converti en rendement financier. Le cas échéant (par exemple, les céréales), deux hypothèses de prix (une haute et une basse) sont modélisées.

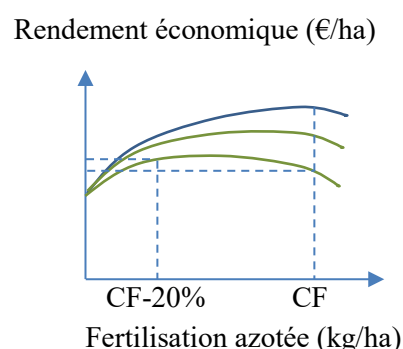
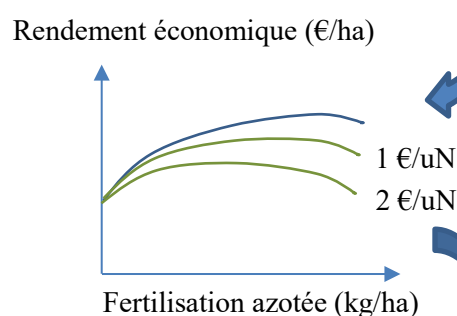
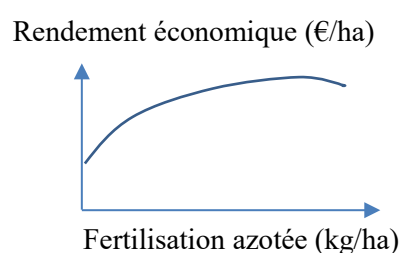
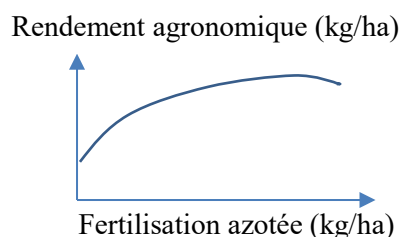
Pour intégrer le coût de l'engrais azoté dans le rendement financier, deux hypothèses sont étudiées :

- une 'basse' à 1 € par unité d'azote<sup>2</sup>
- une 'haute' à 2 € par unité d'azote

Ces coûts sont déduits du rendement économique 'brut' pour établir deux courbes de rendement économique 'net' (la première à 1 €/uN et la seconde à 2 €/uN).

Enfin, le conseil de fertilisation (CF) et le conseil de fertilisation réduit de 20 % (CF-20%) sont positionnés sur le graphique afin de déduire les rendements financiers de ces deux options dans les deux cas de figures de prix de l'azote définis ci-dessus.

Pour chaque combinaison 'prix de vente de la récolte – prix d'achat de l'engrais, un gain ou perte de rendement est calculé et exprimé en valeur relative (% de la récolte) et valeur absolue (€/ha).



<sup>2</sup> Une unité d'azote (uN) correspond à 1 kg d'azote par hectare

Pour asseoir les enseignements d'une telle étude, il est nécessaire d'une part, d'aborder la réflexion sur les principales cultures en région wallonne et d'autre part, de s'appuyer, pour chaque culture, sur les résultats de plusieurs expérimentations afin d'intégrer une diversité de contextes pédoclimatiques.

Le tableau 1 décrit brièvement les expérimentations valorisées dans cette étude.

**Tableau 1. Liste des expérimentations valorisées.**

Culture	Année de l'expérimentation	Nombre d'expérimentations	Expérimentateur(s)
Betterave	2011	2	IRBAB
	2012	2	IRBAB
	2013	2	IRBAB
	2015	2	UCLouvain
	2016	1	UCLouvain
	2017	1	UCLouvain
	2018	1	UCLouvain
Froment	2010 à 2021	15	GxABT (Phytotechnie)
Colza	2006	1	GxABT (GRENeRA & APPO)
	2007	1	GxABT (GRENeRA & APPO)
	2008	1	GxABT (GRENeRA & APPO)
	2009	1	GxABT (GRENeRA & APPO)
	2014	1	GxABT (GRENeRA & APPO)
	2015	1	GxABT (GRENeRA & APPO)
	2016	1	GxABT (GRENeRA & APPO)
	2020	1	GxABT (GRENeRA & APPO)
Maïs	2009	1	UCLouvain & CIPF
	2010	2	UCLouvain & CIPF
	2011	2	UCLouvain & CIPF
	2012	2	UCLouvain & CIPF
	2014	2	GxABT (GRENeRA & CIPF)
	2015	2	GxABT (GRENeRA) & CIPF
	2019	1	UCLouvain & CIPF
Pomme de terre	2011	1	UCLouvain
	2012	1	UCLouvain
	2013	2	UCLouvain et GxABT (GRENeRA)
	1997 à 2014	12	CRAW

Le paragraphe 3 présente une synthèse des résultats et interprétation par culture.

Le paragraphe 4 discute d'une conclusion sur l'impact d'une réduction de la fertilisation des cultures.

Le paragraphe 5 (Annexes) présente les résultats de chaque année d'expérimentation pour chaque culture.

### 3. Synthèse des résultats et interprétations

#### 3.1. Betterave

Le tableau 2 illustre, pour 11 expérimentations menées entre 2011 et 2018, les gains ou pertes financières liées à une réduction 20 % de la fertilisation avec un cout de l'azote de 1 €/uN. Globalement, une telle réduction est financièrement profitable et, dans les trois situations 'négatives', les pertes sont peu importantes.

**Tableau 2. Gains ou pertes financières pour la betterave suite à une réduction de la fertilisation (1 €/uN).**

Année	Différentiel (%)	Différentiel (€/ha)
2018	0%	15 €
2017	-1%	48 €
2016	1%	18 €
2015	2%	88 €
2015	1%	20 €
2013	0%	6 €
2013	2%	59 €
2012	4%	84 €
2012	0%	10 €
2011	1%	39 €
2011	1%	18 €
<b>Moyenne</b>	<b>1%</b>	<b>24 €</b>

Logiquement, lorsque le prix de l'azote est doublé, l'occurrence et l'importance des pertes financières diminuent et, globalement, la réduction de la fertilisation n'est que plus profitable aux agriculteurs (tableau 3).

**Tableau 3. Gains ou pertes financières pour la betterave suite à une réduction de la fertilisation (2 €/uN).**

Année	Différentiel (%)	Différentiel (€/ha)
2018	2%	65 €
2017	-1%	27 €
2016	2%	46 €
2015	1%	47 €
2015	3%	116 €
2013	0%	12 €
2013	2%	72 €
2012	5%	104 €
2012	1%	22 €
2011	2%	56 €
2011	2%	42 €
<b>Moyenne</b>	<b>2%</b>	<b>50 €</b>



### 3.2. Colza

Le tableau 4 illustre, pour 8 expérimentations menées entre 2006 et 2020, les gains ou pertes financières liées à une réduction 20 % de la fertilisation avec un coût de l'azote de 1 €/uN. Globalement, une telle réduction engendre une perte de revenu d'environ 17 €/ha (la valeur du colza est fixée à 350 €/tonne) ; ce qui ne représente néanmoins qu'une perte de 1%.

**Tableau 4. Gains ou pertes financières pour le colza suite à une réduction de la fertilisation (1 €/uN).**

Année	Différentiel (%)	Différentiel (€/ha)
2020	-2%	24 €
2016	2%	29 €
2015	-4%	73 €
2014	-3%	41 €
2009	2%	31 €
2008	-1%	18 €
2007	-2%	23 €
2006	-1%	13 €
<b>Moyenne</b>	<b>-1%</b>	<b>17 €</b>

Logiquement, lorsque le prix de l'azote est doublé, l'occurrence et l'importance des pertes financières diminuent et, globalement, la réduction de la fertilisation devient profitable aux agriculteurs (tableau 5).

**Tableau 5. Gains ou pertes financières pour le colza suite à une réduction de la fertilisation (2 €/uN).**

Année	Différentiel (%)	Différentiel (€/ha)
2020	1%	14 €
2016	3%	55 €
2015	-2%	32 €
2014	0%	0 €
2009	4%	66 €
2008	2%	20 €
2007	1%	11 €
2006	2%	24 €
<b>Moyenne</b>	<b>1%</b>	<b>20 €</b>

### 3.3. Maïs

Le tableau 6 illustre, pour 8 expérimentations menées entre 2009 et 2019, les gains ou pertes financières liées à une réduction 20 % de la fertilisation avec un cout de l'azote de 1 €/uN. Globalement, une telle réduction engendre une perte de revenu d'environ 14 €/ha (la valeur du maïs est fixée à 110 €/tonne MS) ; ce qui ne représente néanmoins qu'une perte de 1%.

Les années libellées en italique dans les deux tableaux suivants illustrent des résultats d'expérimentations menées sur sol crayeux.

**Tableau 6. Gains ou pertes financières pour le maïs suite à une réduction de la fertilisation (1 €/uN).**

Année	Différentiel (%)		Différentiel (€/ha)	
2019		0%		2
<i>2015</i>		-2%		-35
2015		-1%		-33
<i>2014</i>		-4%		64 €
2014		-1%		12 €
2012		-1%		19 €
2012		0%		7 €
2011		1%		24 €
2011		0%		8 €
2010		0%		6 €
2010		-1%		16 €
2009		-1%		10 €
<b>Moyenne</b>		<b>-1%</b>		<b>14 €</b>

Logiquement, lorsque le prix de l'azote est doublé, l'occurrence et l'importance des pertes financières diminuent et, globalement, la réduction de la fertilisation devient profitable aux agriculteurs (tableau 7).

**Tableau 7. Gains ou pertes financières pour le maïs suite à une réduction de la fertilisation (2 €/uN).**

Année	Différentiel (%)		Différentiel (€/ha)	
2019		1%		28 €
<i>2015</i>		-1%		15 €
2015		0%		5 €
<i>2014</i>		-2%		41 €
2014		0%		6 €
2012		0%		7 €
2012		2%		34 €
2011		3%		50 €
2011		1%		13 €
2010		1%		19 €
2010		1%		12 €
2009		1%		16 €
<b>Moyenne</b>		<b>1%</b>		<b>10 €</b>

### 3.4. Pomme de terre

Le tableau 8 illustre, pour 4 expérimentations menées entre 2011 et 2013, les gains ou pertes financières liées à une réduction 20 % de la fertilisation avec un coût de l'azote de 1 €/uN. Globalement, une telle réduction engendre une perte moyenne de revenu de 106 €/ha (la valeur de la tonne de pomme de terre est fixée à 100 €/tonne) ; ce qui ne représente néanmoins qu'une perte de 2 à 3%.

**Tableau 8. Pertes financières pour la pomme de terre suite à une réduction de la fertilisation (100 €/t et 1 €/uN).**

Année	Différentiel (%)	Différentiel (€/ha)
2013	-1%	87 €
2013	-3%	163 €
2012	-1%	47 €
2011	-5%	308 €
<b>Moyenne</b>	<b>-3%</b>	<b>151 €</b>

Logiquement, lorsque le prix de l'azote est doublé, l'importance des pertes financières diminuent et, globalement, la réduction de la fertilisation devient profitable aux agriculteurs (tableau 9).

**Tableau 9. Pertes financières pour la pomme de terre suite à une réduction de la fertilisation (100 €/t et 2 €/uN).**

Année	Différentiel (%)	Différentiel (€/ha)
2013	-1%	48 €
2013	-3%	134 €
2012	0%	9 €
2011	-4%	271 €
<b>Moyenne</b>	<b>-2%</b>	<b>116 €</b>

Lorsque la valorisation de la pomme de terre est doublée (200 €/t au lieu de 100 €/t), les pertes relatives (%) restent du même ordre de grandeur que précédemment par contre, en valeur absolue (€), elles sont logiquement plus importantes (tableau 10 et tableau 11).

**Tableau 10. Pertes financières pour la pomme de terre suite à une réduction de la fertilisation (200 €/t et 1 €/uN).**

Année	Différentiel (%)	Différentiel (€/ha)
2013	-2%	213 €
2013	-3%	354 €
2012	-2%	131 €
2011	-5%	615 €
<b>Moyenne</b>	<b>-3%</b>	<b>328 €</b>

**Tableau 11. Pertes financières pour la pomme de terre suite à une réduction de la fertilisation (200 €/t et 2 €/uN).**

Année	Différentiel (%)	Différentiel (€/ha)
2013	-1%	174 €
2013	-3%	325 €
2012	-1%	94 €
2011	-4%	578 €
<b>Moyenne</b>	<b>-2%</b>	<b>293 €</b>

En termes de rendement agronomique, les pertes n'excèdent jamais 5%.

Les travaux menés sur la variété Bintje lors d'une thèse de doctorat<sup>3</sup> ont été exploités dans le cadre de cette réflexion. Un suivi de la biomasse (tubercule) a été réalisé à environ 60 jours après l'émergence dans les 5 à 6 objets 'fertilisation'. Il apparaît que les différences de biomasse entre objets sont généralement non significatives et lorsqu'elles le sont, elles se situent entre l'objet non fertilisé et le 'premier' objet fertilisé (tableau 12).

**Tableau 12. Biomasse sèche(t/ha) à environ 60 jours après émergence en fonction de la fertilisation (uN)**

Année	Site	Date	Fertilisation	0	75	113	150	188	Test F	ppds
1997	Gembloux	30-juil	Fertilisation	0	75	113	150	188	*	2,03
			Biomasse	9,37	12,36	10,85	12,34	12,71		
1997	Masnuy	24-juil	Fertilisation	0	58	87	115	144	ns	
			Biomasse	10,42	11,76	11,24	9,43	10,58		
2004	Gembloux	27-juil	Fertilisation	0	100	140	180	240	*	2,04
			Biomasse	8,16	10,81	10,24	11,06	10,98		
2010	Gembloux	26-juil	Fertilisation	0	115	165	215	248	ns	
			Biomasse	7,19	7,72	8,15	7,07	7,8		
2011	Gembloux	25-juil	Fertilisation	0	98	140	182	210	ns	
			Biomasse	8,77	10,22	8,86	9,42	9,3		
2012	Gembloux	25-juil	Fertilisation	0	50	100	150	200	250	ns
			Biomasse	5,82	7,31	6,06	7,54	5,4		
2013	Gembloux	23-juil	Fertilisation	0	50	100	150	200	250	*
			Biomasse	5,19	6,67	7,14	7,21	7,13		
2014	Gembloux	30-juil	Fertilisation	0	50	100	150	200	250	ns
			Biomasse	10,23		11,7		11,1		

<sup>3</sup> F. Ben Abdallah, 2020. La fluorescence chlorophyllienne associée aux composés phénoliques des feuilles pour évaluer le statut azoté de la biomasse de la pomme de terre. Gembloux Agro-Bio Tech, 209 p.

Une seconde synthèse est également valorisée dans le cadre de cette réflexion. Elle a été menée par le CRAW<sup>4</sup> et visait, entre autres, à observer l'impact d'une réduction de la fertilisation par rapport au conseil de fertilisation sur le rendement de tubercules en variété Bintje (figure 3).

Les observations menées pendant quatre années sur un total de 12 sites ont mis en évidence des pertes de rendement agronomique généralement de l'ordre de 2 à 5 %.

Il convient de noter que la réduction de la fertilisation menée dans ces 12 expérimentation est de 25 à 30% et non de 20% tel que modélisé aux tableaux 6 à 9.

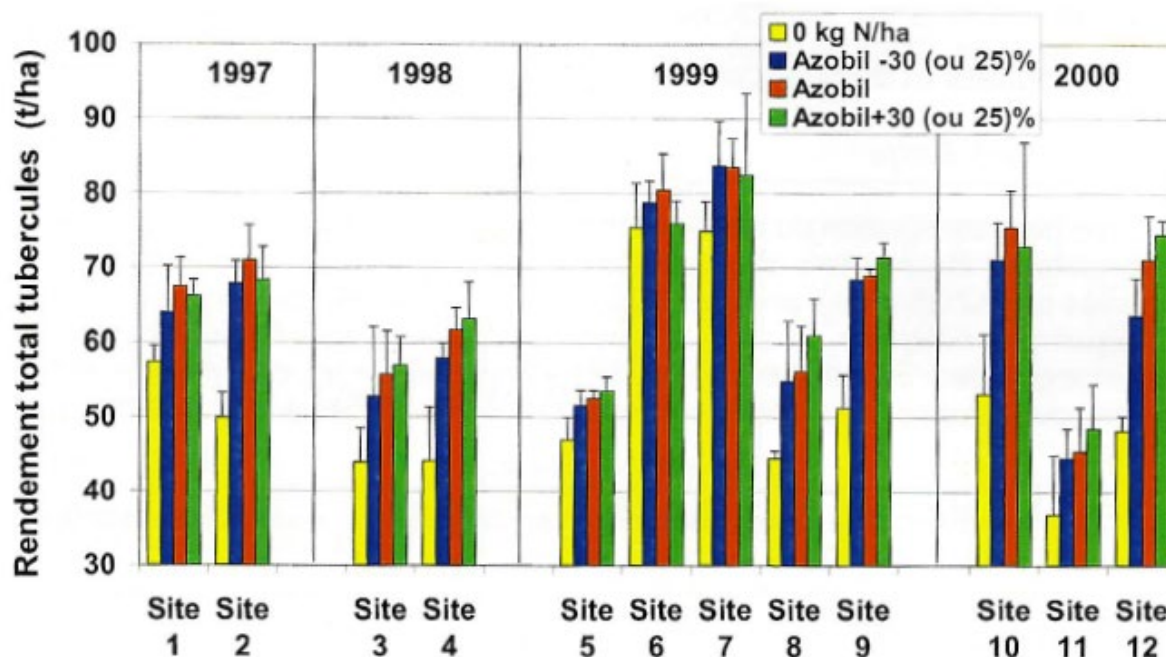


Figure 3. Rendement en tubercules de calibre commercialisable (> 35 mm) observés pour le témoin sans azote et les trois niveaux de fumure azotée testés.

Ces deux synthèses d'expérimentations corroborent donc les enseignements qui peuvent être tirés des quatre expérimentations présentées en début de paragraphe.

<sup>4</sup> Goffart J-P., Olivier M., Destain J-P. et Frankinet M., 2002. Stratégie de gestion de la fertilisation azotée de la pomme de terre de consommation. CRAW, 118 p.

### 3.5. Froment

Cette partie s'appuie entre autres sur un travail réalisé en 2021 par des étudiants de Gembloux Agro-Bio Tech, sous la supervision du Prof. B. Dumont. Leur étude est reprise en annexe du présent document.

Contrairement aux cultures précédentes, la fertilisation azotée du froment est généralement fractionnée en trois (voire deux) apports. De plus, certaines années, deux expérimentations ont été menées sur des variétés à finalité différente (fourragère versus panifiable). Il a parfois été constaté que la réponse du rendement à la fertilisation dépendait du choix variétal.

Autre contraste par rapport aux cultures précédentes : la relative stabilité du conseil de fertilisation : 180 kg N/ha. Une réduction de 20% de la fertilisation par rapport au conseil conduit donc à un apport total de 144 kg N/ha.

Enfin, tout comme la pomme de terre, le froment peut connaître des variations (inter)annuelles de prix significative. Trois niveaux de prix ont été modélisés :

- 1 kg N = 4 kg de froment
- 1 kg N = 6 kg de froment
- 1 kg N = 8 kg de froment

Un modèle a été construit pour distribuer cet apport dans les trois fractions. Préalablement, afin de « gommer » les effets variétaux et années, les rendements de chaque objet (et de chaque expérimentation) ont été normalisés.

Le modèle ainsi construit a permis de distribuer l'apport azoté dans les trois fractions :

- 123 kg N/ha au total des deux premières fractions (à répartir à part 'égale') ;
- 21 kg N/ha dans la dernière fraction.

Selon les auteurs, cette réduction « optimisée » de l'apport azoté conduit globalement à une diminution relative du rendement agronomique de 7%.

Trois expérimentations ont été sectionnées par les auteurs pour aborder la diminution financière. Pour ces trois expérimentations, un modèle a été créé afin d'estimer le rendement phytotechnique pour le fractionnement mentionné ci-avant.

Pour les autres expérimentations, le travail a été réalisé en comparant le rendement phytotechnique de la fumure conseil au rendement le plus proche du fractionnement 123/21. Généralement, il s'agissait d'un apport de 150 kg N/ha (soit une réduction de 17%) fractionné en trois parts plus ou moins égales. Ce faisant, l'objectif « -20% » n'est plus tout-à-fait rencontré. Dans les tableaux suivants, ces expérimentations sont libellées en italique.

En repartant sur le même principe que la pomme de terre (variation du prix de l'engrais azoté et du prix du froment), les tableaux suivants sont produits.

A un prix relativement bas de l'engrais (1€/uN) et du froment (160 €/t) (ce qui correspond grosso modo à 1 kg d'N pour 6 kg de froment), les pertes sont en moyenne minimales à l'exception de 2015 et 2017 (tableau 13).

**Tableau 13. Pertes financières pour le froment suite à une réduction de la fertilisation (160 €/t et 1 €/uN).**

Année	Différentiel (%)	Différentiel (€/ha)
2010	-3%	33 €
2010	2%	33 €
2012	1%	11 €
2012	7%	85 €
2013	2%	34 €
2014	-1%	17 €
2015	-12%	162 €
2016	-2%	25 €
2017	-8%	127 €
2018	-1%	20 €
2019	2%	41 €
2019	-3%	51 €
2020	0%	6 €
2020	2%	40 €
2021	-1%	10 €
<b>Moyenne</b>	<b>-1%</b>	<b>13 €</b>

Logiquement, lorsque le prix de l'azote est doublé, les faibles pertes deviennent des (faibles) gains (tableau 14).

**Tableau 14. Pertes financières pour le froment suite à une réduction de la fertilisation (160 €/t et 2 €/uN).**

Année	Différentiel (%)	Différentiel (€/ha)
2010	2%	22 €
2010	6%	68 €
2012	7%	47 €
2012	12%	120 €
2013	5%	69 €
2014	1%	18 €
2015	-11%	127 €
2016	1%	11 €
2017	-7%	102 €
2018	1%	16 €
2019	5%	76 €
2019	-1%	16 €
2020	2%	36 €
2020	4%	70 €
2021	1%	20 €
<b>Moyenne</b>	<b>2%</b>	<b>22 €</b>

Lorsque la valorisation du froment est augmentée (220 €/t au lieu de 160 €/t), les pertes restent en moyenne faibles (toujours à l'exception de 2015 et 2017) lorsque l'azote est « bon marché » (tableau 15). Lorsque l'azote est « cher » (tableau 16), en moyenne, un léger gain est constaté (toujours à l'exception de 2015 et 2017).

**Tableau 15. Pertes financières pour le froment suite à une réduction de la fertilisation (220 €/t et 1 €/uN).**

Année	Différentiel (%)	Différentiel (€/ha)
2010	-4%	66 €
2010	2%	33 €
2012	0%	1 €
2012	6%	104 €
2013	2%	34 €
2014	-2%	37 €
2015	-12%	236 €
2016	-3%	48 €
2017	-8%	184 €
2018	-2%	41 €
2019	2%	43 €
2019	-3%	83 €
2020	0%	3 €
2020	2%	43 €
2021	-1%	25 €
<b>Moyenne</b>	<b>-1%</b>	<b>31 €</b>

**Tableau 16. Pertes financières pour le froment suite à une réduction de la fertilisation (220 €/t et 2 €/uN).**

Année	Différentiel (%)	Différentiel (€/ha)
2010	-1%	11 €
2010	4%	68 €
2012	3%	37 €
2012	9%	139 €
2013	3%	69 €
2014	0%	2 €
2015	-11%	201 €
2016	-1%	12 €
2017	-7%	159 €
2018	0%	5 €
2019	3%	78 €
2019	-2%	48 €
2020	1%	27 €
2020	3%	73 €
2021	0%	5 €
<b>Moyenne</b>	<b>0%</b>	<b>4 €</b>



---

## 4. Discussion et conclusion

---

A l'horizon 2030, l'Europe ambitionne de diminuer entre autres de 20% l'usage engrais azotés en agriculture afin de réduire l'impact de ce secteur d'activités sur notre environnement (air et eau).

Ne connaissant pas *a priori* l'usage d'azote pour chaque culture et sachant que dans bon nombre d'exploitations, la fertilisation s'appuie sur des engrais de ferme et des engrais de synthèse, ce premier « exercice » a été construit sur les résultats d'une soixantaine d'expérimentations en dose croissante d'engrais de synthèse menées en région wallonne.

Le principe est d'observer les variations de rendement financier liés à une réduction de 20% de la fertilisation par rapport au conseil de fertilisation. Le choix du 'rendement financier' permet d'une part de sommer un revenu (rendement d'une culture) et une charge (engrais) et d'autre part de comparer les cultures entre elles.

L'étude a été réalisée sur les principales cultures présentes en région wallonne, à savoir : le froment, la betterave, le maïs, la pomme de terre et le colza. Celles-ci couvrent plus de 80% des terres cultivées.

L'exercice a été mené en considérant deux niveaux de prix d'achat pour l'engrais et, pour la pomme de terre et le froment, également deux niveaux de prix de vente.

Les enseignements révèlent que :

- pour la betterave, le résultat financier est généralement positif, quel que soit le prix de l'engrais ;
- pour le colza, le maïs et le froment, le résultat financier est légèrement négatif pour un engrais « bon marché » et légèrement positif pour un engrais « cher » ;
- pour la pomme de terre, le résultat financier est négatif, quel que soit le prix de vente de la récolte et le prix d'achat de l'engrais.

Quelles seraient les conséquences du Green Deal pour le secteur agricole ?

A ce stade, il est difficile de statuer. Comme d'habitude, les textes européens fixent plutôt des objectifs 'globaux' que des règles fines. A charge pour les états membres de les traduire dans leur législation en tenant compte des spécificités 'locales'.

On pourrait donc très bien concevoir que la réduction nationale soit traduite en une réduction par exploitation et non par culture, ce qui permettrait, selon les orientations technico-économiques de chaque exploitation, de 'distribuer' plus ou moins intensément cette réduction pour chaque culture.

Par ailleurs, l'objectif de l'Europe étant de maintenir la fertilité des sols, il est probable que cette réduction de 20% ne porte que sur les engrais de synthèse. Dans le cas d'une fertilisation mixte (organique et minérale), la part d'azote venant des engrais de synthèse étant déjà plus faible, une réduction de 20% n'aura en moyenne certainement aucun impact négatif sur la rentabilité des exploitations « mixtes ».

## 5. Annexes (résultats expérimentaux)

### 5.1. Betterave

#### 5.1.1. Expérimentations 2011

Deux expérimentations<sup>5</sup> menées par l'IRBAB ont été valorisées dans le cadre de cette étude.

La première plateforme était située à Melles, sur un sol limoneux. Le précédent cultural était une céréale paille enlevée suivie d'un apport de fumier de bovin (sans CIPAN). Quatre conseils de fertilisations (Azofert, Azobil, Laboratoire CPAR et IRBAB) ont été établis. Le conseil moyen était de 88 kg N/ha.

La figure 4 illustre l'impact de la fertilisation azotée sur le rendement financier.

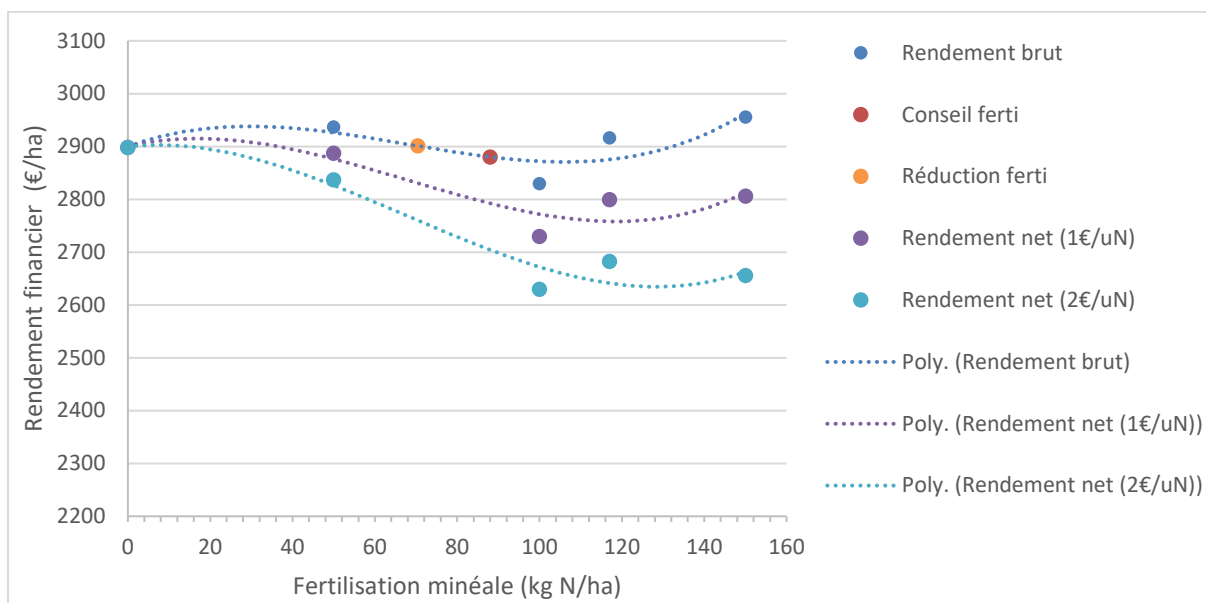


Figure 4. Courbe de réponse du rendement à la fertilisation (Melles, 2011).

Dans cette expérimentation, une réduction de 20% de la fertilisation par rapport au conseil moyen a un impact positif tant pour le rendement financier brut que pour les rendements financiers nets (tableau 17).

Tableau 17. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Melles, 2011).

Conseil ferti moyen (kg N/ha)	88	Réduction -20% ferti	70
Rendement brut	2.880 €	Rendement brut	2.901 €
Rendement net 1€/uN	2.792 €	Rendement net 1€/uN	2.830 €
Rendement net 2€/uN	2.704 €	Rendement net 2€/uN	2.760 €

<sup>5</sup> Source : Compte-rendu recherche & vulgarisation 2011. IRBAB.

<http://www.irbab-kbivb.be/wp-content/uploads/2015/07/Jaarverslag-2011.pdf>

La seconde plateforme était située à Arc-Wattripont. Le précédent cultural était une céréale paille enlevée. Quatre conseils de fertilisations (Azofert, Azobil, Laboratoire CPAR et IRBAB) ont également été établis. Le conseil moyen était de 117 kg N/ha.

La figure 5 illustre l'impact de la fertilisation azotée sur le rendement financier.

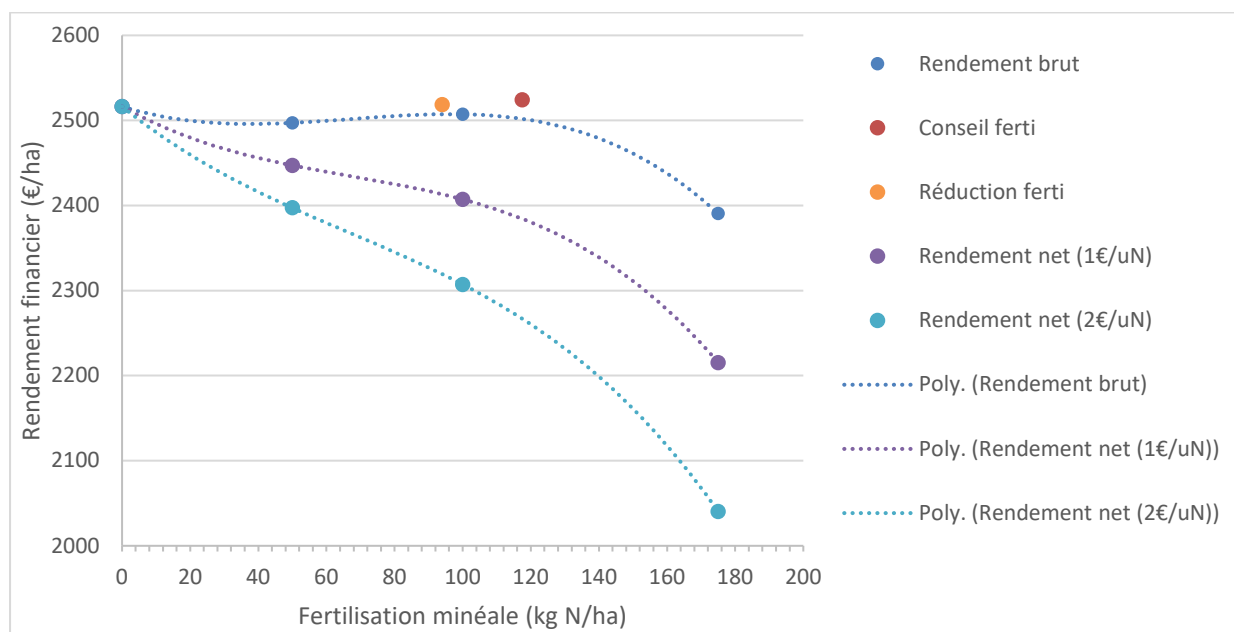


Figure 5. Courbe de réponse du rendement à la fertilisation (Arc-Wattripont, 2011).

Dans cette seconde expérimentation, une réduction de 20% de la fertilisation par rapport au conseil moyen a également un impact positif sur les rendements financiers nets (tableau 18).

Tableau 18. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Arc-Wattripont, 2011).

Conseil ferti moyen (kg N/ha)	118	Réduction -20% ferti	94
Rendement brut	2.524 €	Rendement brut	2.519 €
Rendement net 1€/uN	2.407 €	Rendement net 1€/uN	2.425 €
Rendement net 2€/uN	2.289 €	Rendement net 2€/uN	2.331 €

Il convient cependant de noter les résultats un peu particuliers de ces deux expérimentations : les rendements agronomiques observés en l'absence de fertilisation sont du même ordre que ceux enregistrés avec les différentes fertilisations testées.

### 5.1.2. Expérimentations 2012

Deux expérimentations<sup>6</sup> menées par l'IRBAB ont été valorisées dans le cadre de cette étude.

La première plateforme était située à Pottes, sur un sol limoneux. Le précédent cultural était une céréale paille enlevée suivie d'un apport de fumier de bovin (sans CIPAN). Quatre conseils de fertilisations (Azofert, Azobil, Laboratoire CPAR et IRBAB) ont été établis. Le conseil moyen était de 99 kg N/ha.

La figure 6 illustre l'impact de la fertilisation azotée sur le rendement financier.

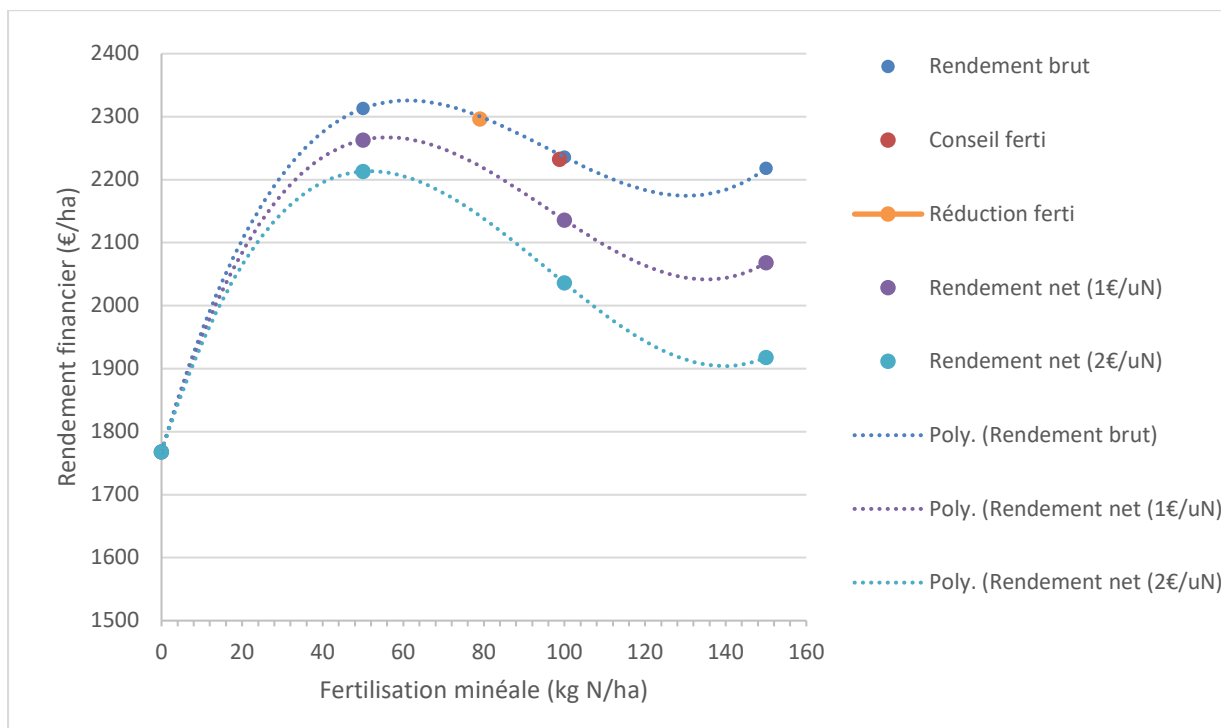


Figure 6. Courbe de réponse du rendement à la fertilisation (Pottes, 2012).

Dans cette expérimentation, une réduction de 20% de la fertilisation par rapport au conseil moyen a un impact positif tant pour le rendement financier brut que pour les rendements financiers nets (tableau 19).

Tableau 19. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Pottes, 2012).

Conseil ferti moyen (kg N/ha)	99	Réduction -20% ferti	79
Rendement brut	2.232 €	Rendement brut	2.296 €
Rendement net 1€/uN	2.134 €	Rendement net 1€/uN	2.217 €
Rendement net 2€/uN	2.035 €	Rendement net 2€/uN	2.138 €

<sup>6</sup> Source : Compte-rendu recherche & vulgarisation 2012-2013. IRBAB.

<https://www.irbab-kbivb.be/wp-content/uploads/2015/07/Jaarverslag-2012-2013.pdf>

La seconde plateforme était située à Arc-Wattripont. Le précédent cultural était une céréale paille enlevée. Quatre conseils de fertilisations (Azofert, Azobil, Laboratoire CPAR et IRBAB) ont également été établis. Le conseil moyen était de 61 kg N/ha.

La figure 7 illustre l'impact de la fertilisation azotée sur le rendement financier.

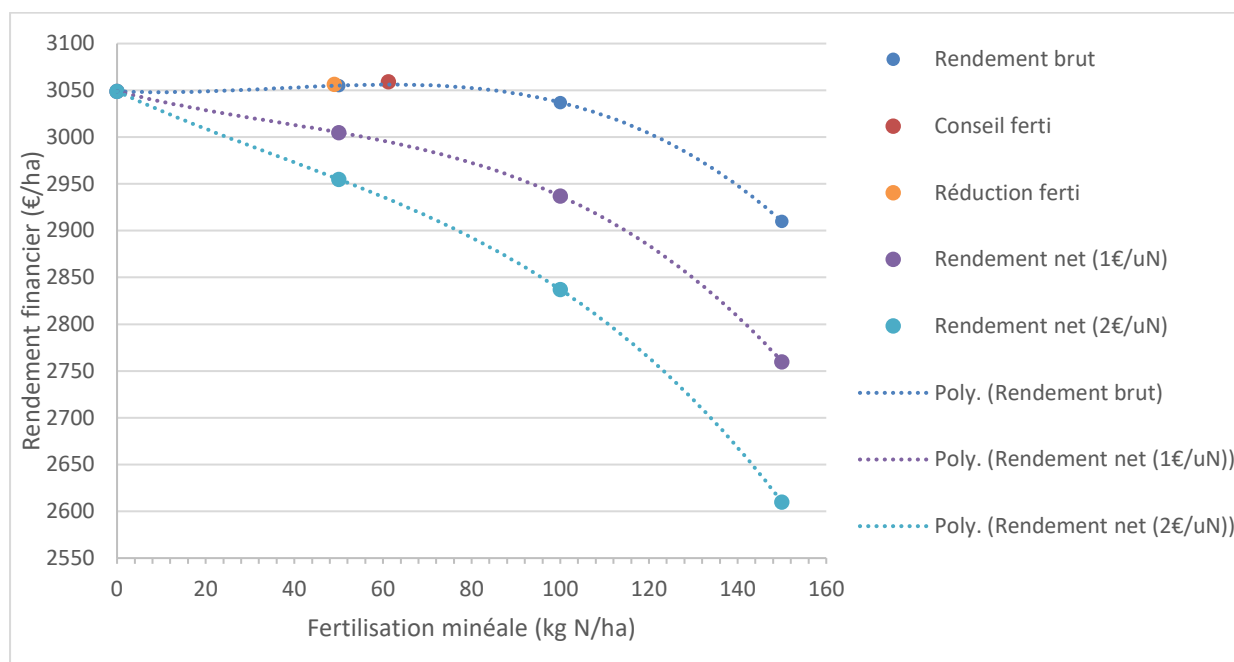


Figure 7. Courbe de réponse du rendement à la fertilisation (Arc-Wattripont, 2012).

Dans cette seconde expérimentation, une réduction de 20% de la fertilisation par rapport au conseil moyen a également un impact positif sur les rendements financiers nets (tableau 20).

Tableau 20. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Arc-Wattripont, 2012).

Conseil ferti moyen (kg N/ha)	61	Réduction -20% ferti	49
Rendement brut	3.059 €	Rendement brut	3.056 €
Rendement net 1€/uN	2.998 €	Rendement net 1€/uN	3.007 €
Rendement net 2€/uN	2.937 €	Rendement net 2€/uN	2.958 €

Il convient cependant de noter les résultats un peu particuliers de cette seconde expérimentation : les rendements agronomiques observés en l'absence de fertilisation sont du même ordre (voire inférieurs) que ceux enregistrés avec les différentes fertilisations testées.

### 5.1.3. Expérimentations 2013

Deux expérimentations<sup>7</sup> menées par l'IRBAB ont été valorisées dans le cadre de cette étude.

La première plateforme était située à Melles, sur un sol limoneux. Le précédent cultural était une céréale paille enlevée suivie d'un apport de fumier de bovin (sans CIPAN). Quatre conseils de fertilisations (Azofert, Azobil, Laboratoire CPAR et IRBAB) ont été établis. Le conseil moyen était de 93 kg N/ha.

La figure 8 illustre l'impact de la fertilisation azotée sur le rendement financier.

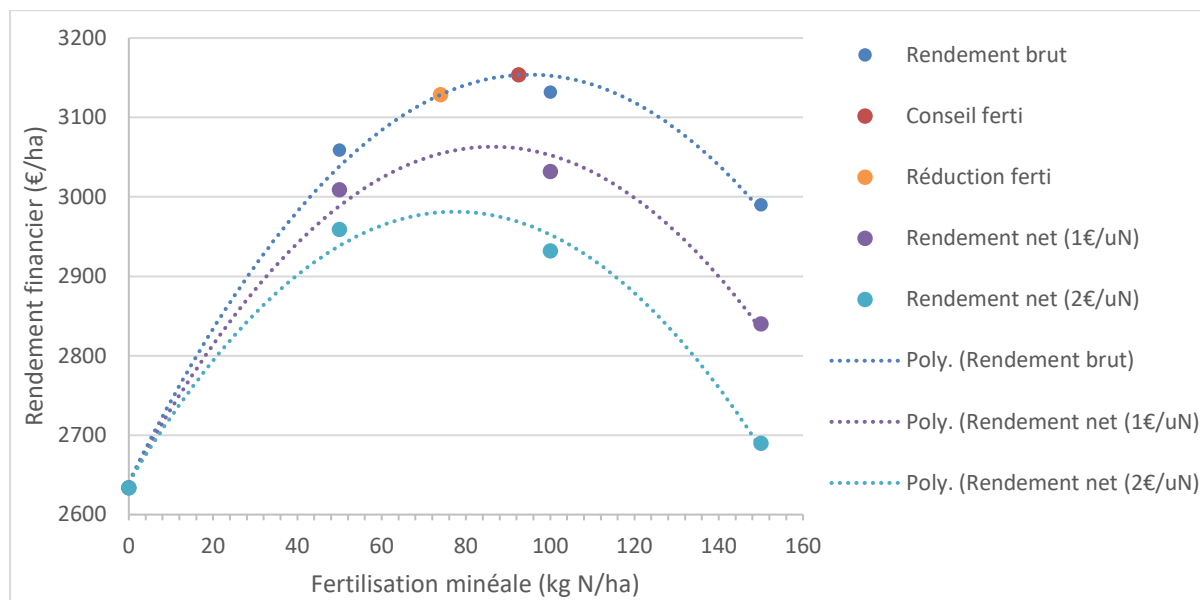


Figure 8. Courbe de réponse du rendement à la fertilisation (Melles, 2013).

Dans cette expérimentation, une réduction de 20% de la fertilisation par rapport au conseil moyen a un faible impact négatif tant pour le rendement financier brut que pour le rendement financier net avec un coût de l'azote à 1€/uN (tableau 21). Un léger gain financier est observé si le coût de l'azote est de 2 €/uN.

Tableau 21. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Melles, 2013).

Conseil ferti moyen (kg N/ha)	93	Réduction -20% ferti	74
Rendement brut	3.154 €	Rendement brut	3.129 €
Rendement net 1€/uN	3.061 €	Rendement net 1€/uN	3.055 €
Rendement net 2€/uN	2.969 €	Rendement net 2€/uN	2.981 €

<sup>7</sup> Source : Compte-rendu recherche & vulgarisation 2012-2013. IRBAB.

<https://www.irbab-kbivb.be/wp-content/uploads/2015/07/Jaarverslag-2012-2013.pdf>

La seconde plateforme était située à Arc-Wattripont. Le précédent cultural était une céréale paille enlevée. Quatre conseils de fertilisations (Azofert, Azobil, Laboratoire CPAR et IRBAB) ont également été établis. Le conseil moyen était de 66 kg N/ha.

La figure 9 illustre l'impact de la fertilisation azotée sur le rendement financier.

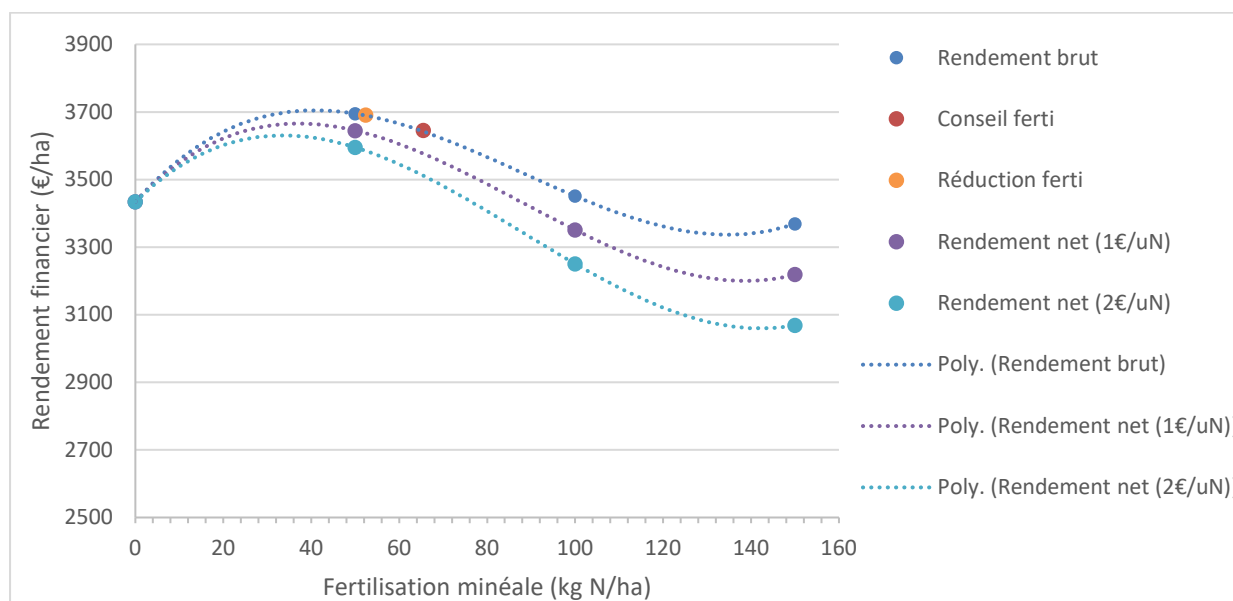


Figure 9. Courbe de réponse du rendement à la fertilisation (Arc-Wattripont, 2013).

Dans cette seconde expérimentation, une réduction de 20% de la fertilisation par rapport au conseil moyen a un impact positif tant sur le rendement brut que sur les rendements financiers nets (tableau 22).

Tableau 22. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Arc-Wattripont, 2013).

Conseil ferti moyen (kg N/ha)	66	Réduction -20% ferti	52,4
Rendement brut	3.645 €	Rendement brut	3.691 €
Rendement net 1€/uN	3.580 €	Rendement net 1€/uN	3.639 €
Rendement net 2€/uN	3.514 €	Rendement net 2€/uN	3.586 €

### 5.1.4. Expérimentations 2015

Deux expérimentations<sup>8</sup> menées par l'UCLouvain ont été valorisées dans le cadre de cette étude.

La première plateforme était située à Momalle, sur un sol limoneux. Le précédent cultural était une céréale paille enlevée (sans CIPAN pour les objets valorisés dans cette étude). Le conseil de fertilisation établi sur base de la méthode harmonisée Requasud-PROTECT'eau était de 137 kg N/ha.

La figure 10 illustre l'impact de la fertilisation azotée sur le rendement financier.

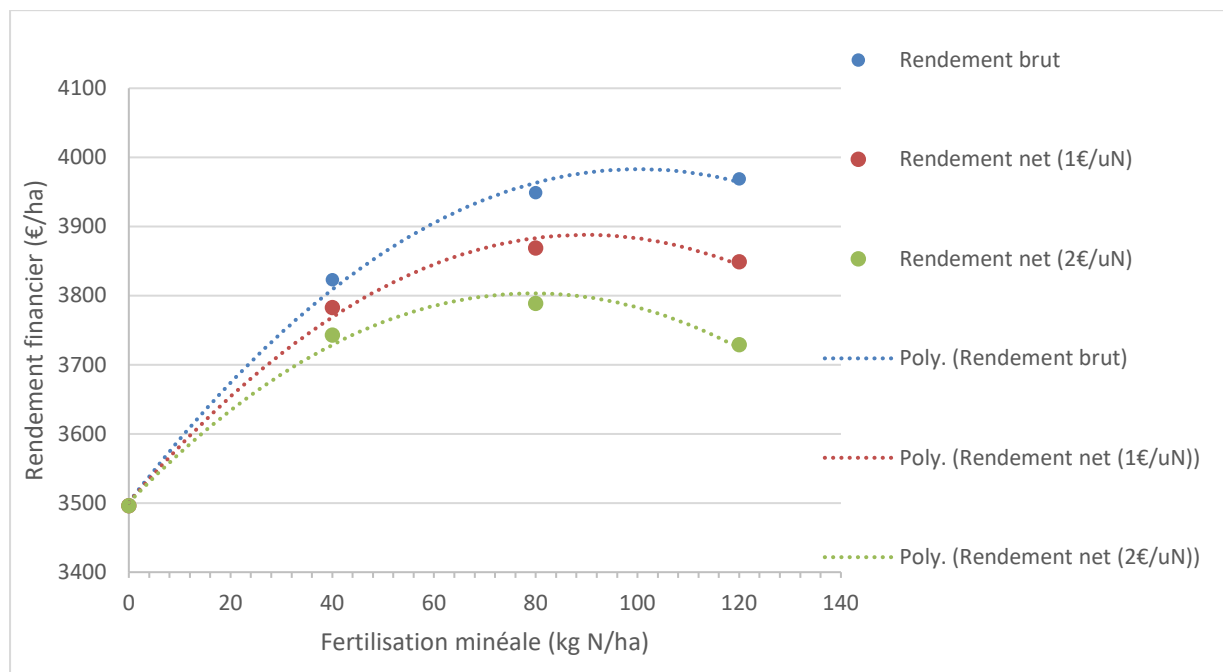


Figure 10. Courbe de réponse du rendement à la fertilisation (Momalle, 2015).

Dans cette première expérimentation, une réduction de 20% de la fertilisation par rapport au conseil moyen a un impact positif tant sur le rendement brut que sur les rendements financiers nets (tableau 23).

Tableau 23. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Momalle, 2015).

Conseil ferti moyen (kg N/ha)	137	Réduction -20% ferti	110
Rendement brut	3.918 €	Rendement brut	3.978 €
Rendement net 1€/uN	3.781 €	Rendement net 1€/uN	3.869 €
Rendement net 2€/uN	3.644 €	Rendement net 2€/uN	3.759 €

<sup>8</sup> Source : Dossier UCL 18-31a2.



La seconde plateforme était située à Avernas. Le conseil de fertilisation établi sur base de la méthode harmonisée Requasud-PROTECT'eau était de 135 kg N/ha.

La figure 11 illustre l'impact de la fertilisation azotée sur le rendement financier.

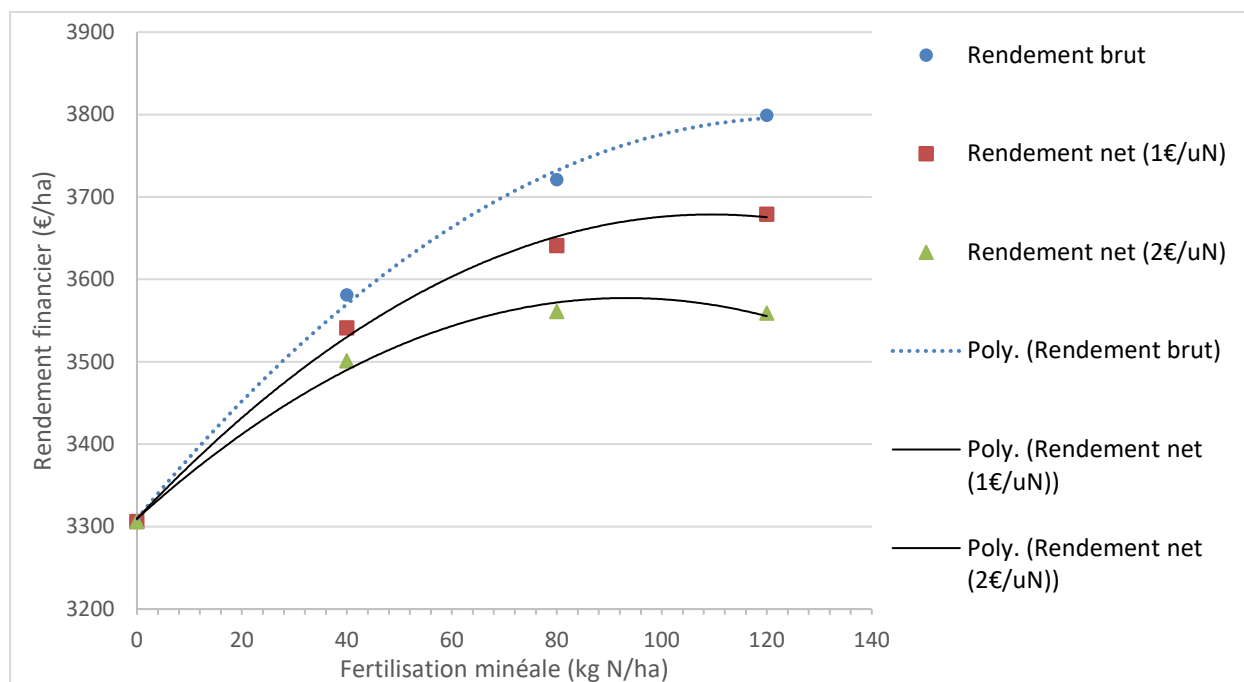


Figure 11. Courbe de réponse du rendement à la fertilisation (Avernas, 2015).

Dans cette seconde expérimentation, une réduction de 20% de la fertilisation par rapport au conseil moyen a un impact positif sur les rendements financiers nets (tableau 24).

Tableau 24. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Avernas, 2015).

Conseil ferti moyen (kg N/ha)	135	Réduction -20% ferti	108
Rendement brut	3.793 €	Rendement brut	3.786 €
Rendement net 1€/uN	3.658 €	Rendement net 1€/uN	3.678 €
Rendement net 2€/uN	3.523 €	Rendement net 2€/uN	3.570 €

### 5.1.5. Expérimentations 2016

Une expérimentation<sup>9</sup> menée par l'UCLouvain a été valorisée dans le cadre de cette étude.

La plateforme était située à Avernas, sur un sol limoneux. Le précédent cultural était une céréale paille enlevée (sans CIPAN pour les objets valorisés dans cette étude). Le conseil de fertilisation établi sur base de la méthode harmonisée Requasud-PROTECT'eau était de 140 kg N/ha.

La figure 12 illustre l'impact de la fertilisation azotée sur le rendement financier.

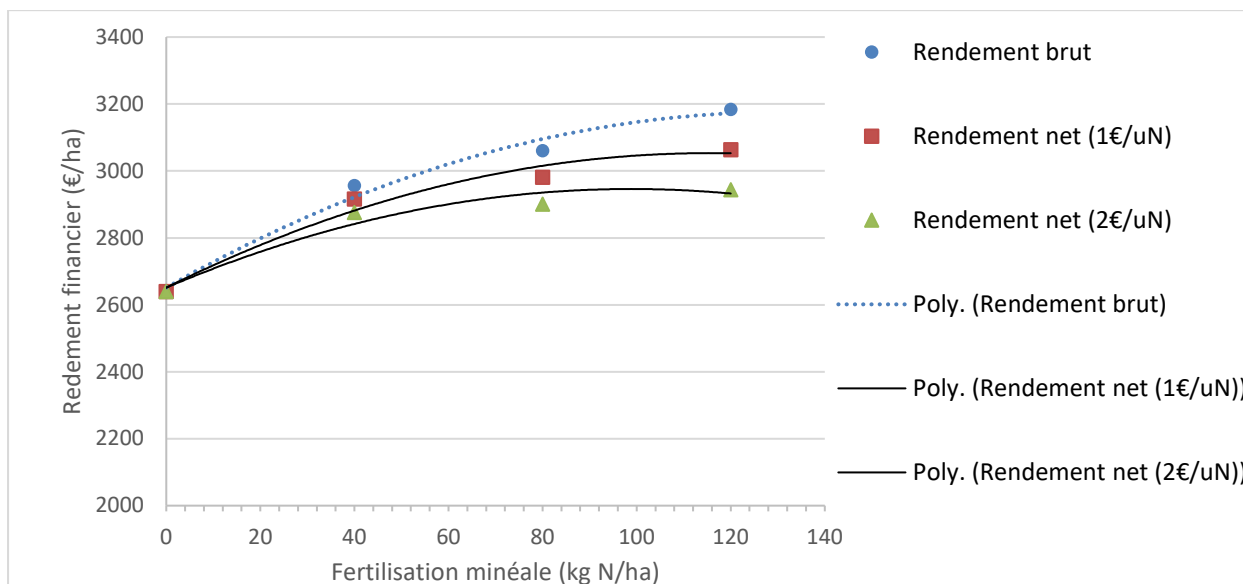


Figure 12. Courbe de réponse du rendement à la fertilisation (Avernas, 2016).

Dans cette expérimentation, une réduction de 20% de la fertilisation par rapport au conseil moyen a un impact positif sur les rendements financiers nets (tableau 25).

Tableau 25. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Avernas, 2016).

Conseil ferti moyen (kg N/ha)	140	Réduction -20% ferti	112
Rendement brut	3.174 €	Rendement brut	3.164 €
Rendement net 1€/uN	3.034 €	Rendement net 1€/uN	3.052 €
Rendement net 2€/uN	2.894 €	Rendement net 2€/uN	2.940 €

<sup>9</sup> Source : Dossier UCL 18-31a2.

### 5.1.6. Expérimentations 2017

Une expérimentation<sup>10</sup> menée par l'UCLouvain a été valorisée dans le cadre de cette étude.

La plateforme était située à Avernas, sur un sol limoneux. Le précédent cultural était une céréale paille enlevée (sans CIPAN pour les objets valorisés dans cette étude). Le conseil de fertilisation établi sur base de la méthode harmonisée Requasud-PROTECT'eau était de 102 kg N/ha.

La figure 13 illustre l'impact de la fertilisation azotée sur le rendement financier.

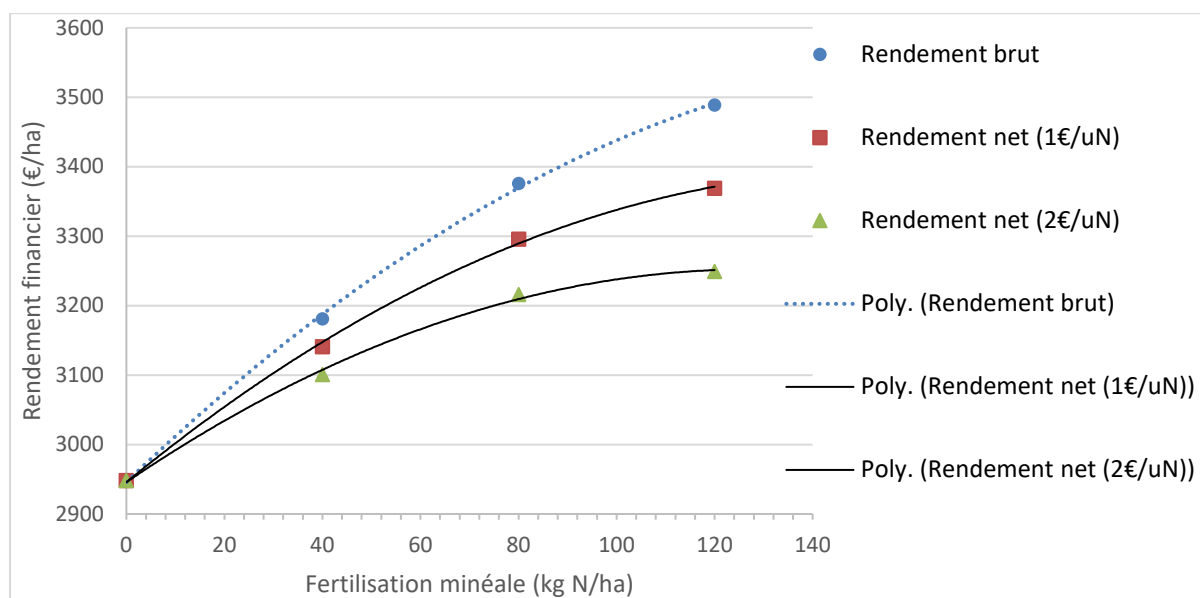


Figure 13. Courbe de réponse du rendement à la fertilisation (Avernas, 2017).

Dans cette expérimentation, une réduction de 20% de la fertilisation par rapport au conseil moyen a un impact négatif sur les rendements financiers nets (tableau 26).

Tableau 26. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Avernas, 2017).

Conseil ferti moyen (kg N/ha)	102	Réduction -20% ferti	81,6
Rendement brut	3.443 €	Rendement brut	3.375 €
Rendement net 1€/uN	3.341 €	Rendement net 1€/uN	3.293 €
Rendement net 2€/uN	3.239 €	Rendement net 2€/uN	3.212 €

<sup>10</sup> Source : Dossier UCL 18-31a2.

### 5.1.7. Expérimentations 2018

Une expérimentation<sup>11</sup> menée par l'UCLouvain a été valorisée dans le cadre de cette étude.

La plateforme était située à Avernas, sur un sol limoneux. Le précédent cultural était une céréale paille enlevée (sans CIPAN pour les objets valorisés dans cette étude). Le conseil de fertilisation établi sur base de la méthode harmonisée Requasud-PROTECT'eau était de 100 kg N/ha.

La figure 14 illustre l'impact de la fertilisation azotée sur le rendement financier.

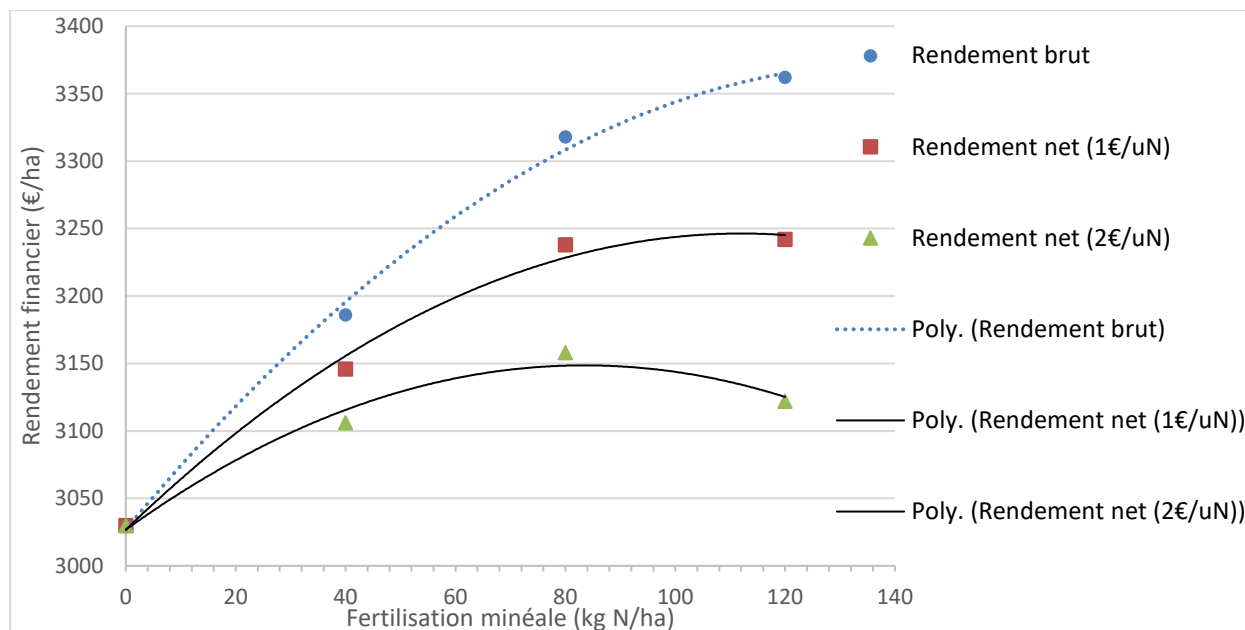


Figure 14. Courbe de réponse du rendement à la fertilisation (Avernas, 2018).

Dans cette expérimentation, une réduction de 20% de la fertilisation par rapport au conseil moyen a un impact négatif sur les rendements financiers nets (tableau 27).

Tableau 27. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Avernas, 2018).

Conseil ferti moyen (kg N/ha)	100	Réduction -20% ferti	80
Rendement brut	3.344 €	Rendement brut	3.308 €
Rendement net 1€/uN	3.244 €	Rendement net 1€/uN	3.228 €
Rendement net 2€/uN	3.144 €	Rendement net 2€/uN	3.209 €

<sup>11</sup> Source : Dossier UCL 18-31a2.

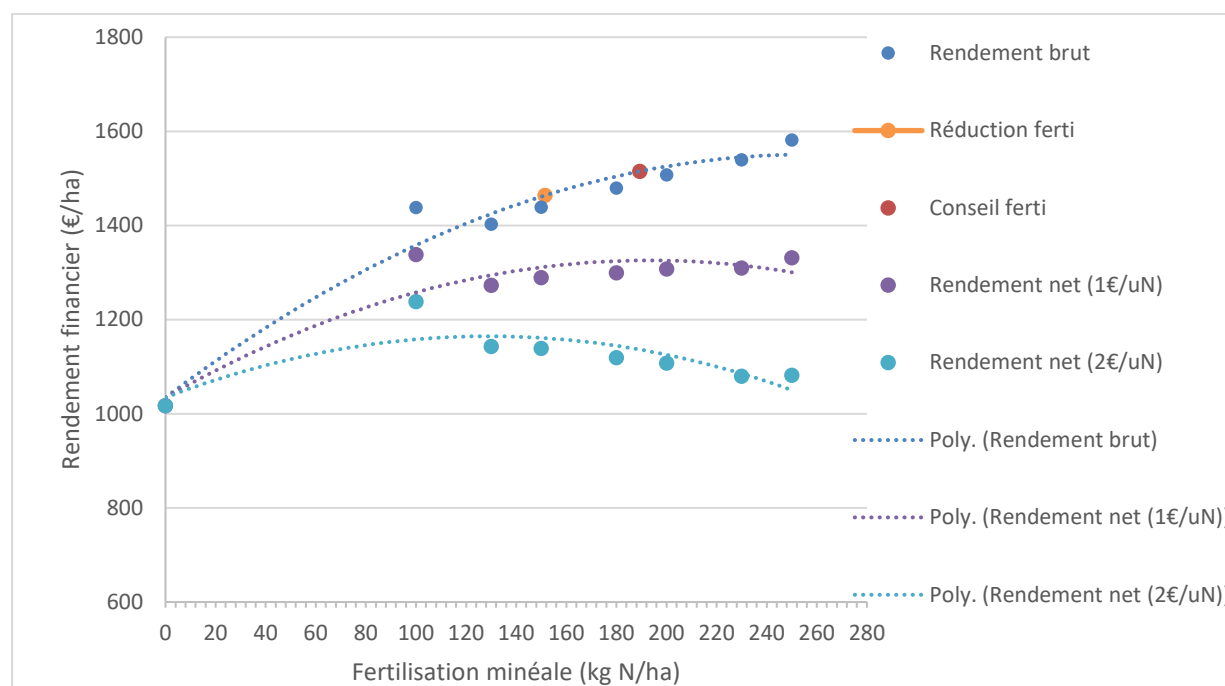
## 5.2. Colza

### 5.2.1. Expérimentation 2006

Une expérimentation<sup>12</sup> menée par GxABT<sup>13</sup>, GRENeRA et l'APPO<sup>14</sup> a été valorisée dans le cadre de cette étude.

La plateforme était située à Gembloux, sur un sol limoneux. Le précédent cultural était une céréale paille enlevée. Le conseil de fertilisation moyen calculé sur base de la méthode Requasud, de l'outil PROTECT'eau et de la « réglette Azote -Colza » de Terresinovia<sup>15</sup> était de 189 kg N/ha.

La figure 15 illustre l'impact de la fertilisation azotée sur le rendement financier.



**Figure 15. Courbe de réponse du rendement à la fertilisation (Gembloux, 2006).**

Dans cette expérimentation, une réduction de 20% de la fertilisation par rapport au conseil moyen a un impact négatif sur le rendement financier net si le prix de l'azote est de 1 €/uN. Par contre, si le prix de l'azote est doublé, la réduction de fertilisation est profitable à l'agriculteur (tableau 28).

**Tableau 28. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Gembloux, 2006).**

Conseil ferti (kg N/ha)	189	Réduction -20% ferti	151
Rendement brut	1.515 €	Rendement brut	1.464 €
Rendement net 1€/uN	1.325 €	Rendement net 1€/uN	1.312 €
Rendement net 2€/uN	1.136 €	Rendement net 2€/uN	1.161 €

<sup>12</sup> [https://www.gembloux.ulg.ac.be/gp/grenera/Bibliotheque/PROTECTeau/2006/DG\\_06-05essai fertilisation colza.pdf](https://www.gembloux.ulg.ac.be/gp/grenera/Bibliotheque/PROTECTeau/2006/DG_06-05essai fertilisation colza.pdf)

<sup>13</sup> Axe Plant Sciences - Phytotechnie

<sup>14</sup> Association pour la Promotion des Protéagineux et Oléagineux (asbl)

<sup>15</sup> <https://www.terresinovia.fr/colza>

### 5.2.2. Expérimentation 2007

Une expérimentation<sup>16</sup> menée par GxABT, GRENERA et l'APPO a été valorisée dans le cadre de cette étude.

La plateforme était située à Gembloux, sur un sol limoneux. Le précédent cultural était une céréale paille enlevée. Le conseil de fertilisation moyen calculé sur base de la méthode Requasud, de l'outil PROTECT'eau et de la « réglette Azote -Colza » de Terresinovia était de 172 kg N/ha.

La figure 16 illustre l'impact de la fertilisation azotée sur le rendement financier.

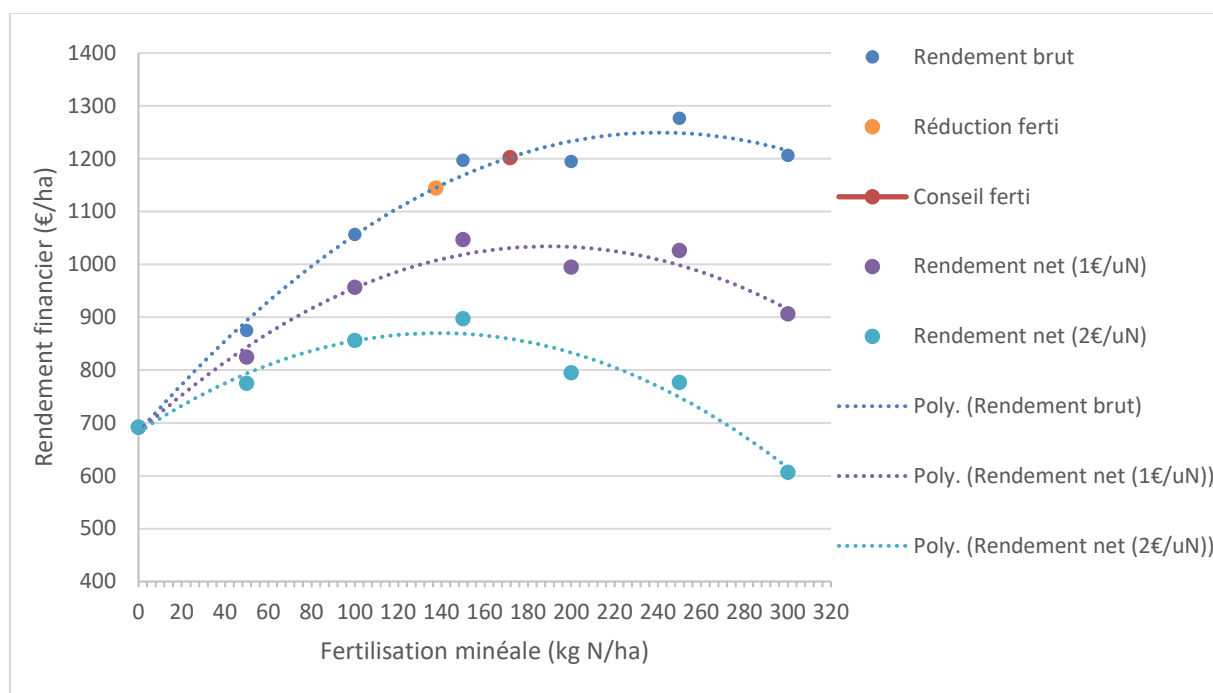


Figure 16. Courbe de réponse du rendement à la fertilisation (Gembloux, 2007).

Dans cette expérimentation, une réduction de 20% de la fertilisation par rapport au conseil moyen a un impact négatif sur le rendement financier net si le prix de l'azote est de 1 €/uN. Par contre, si le prix de l'azote est doublé, la réduction de fertilisation est profitable à l'agriculteur (tableau 29).

Tableau 29. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Gembloux, 2007).

Conseil ferti (kg N/ha)	172	Réduction -20% ferti	137
Rendement brut	1.202 €	Rendement brut	1.144 €
Rendement net 1€/uN	1.030 €	Rendement net 1€/uN	1.007 €
Rendement net 2€/uN	858 €	Rendement net 2€/uN	869 €

<sup>16</sup> [https://www.gembloux.ulg.ac.be/gp/grenera/Bibliotheque/PROTECTeau/2007/DG\\_07-05Essaifertilisationcolza.pdf](https://www.gembloux.ulg.ac.be/gp/grenera/Bibliotheque/PROTECTeau/2007/DG_07-05Essaifertilisationcolza.pdf)

### 5.2.3. Expérimentation 2008

Une expérimentation<sup>17</sup> menée par GxABT, GRENERA et l'APPO a été valorisée dans le cadre de cette étude.

La plateforme était située à Gembloux, sur un sol limoneux. Le précédent cultural était une céréale paille enlevée. Le conseil de fertilisation moyen calculé sur base de la méthode Requasud, de l'outil PROTECT'eau et de la « réglette Azote -Colza » de Terresinovia était de 191 kg N/ha.

La figure 17 illustre l'impact de la fertilisation azotée sur le rendement financier.

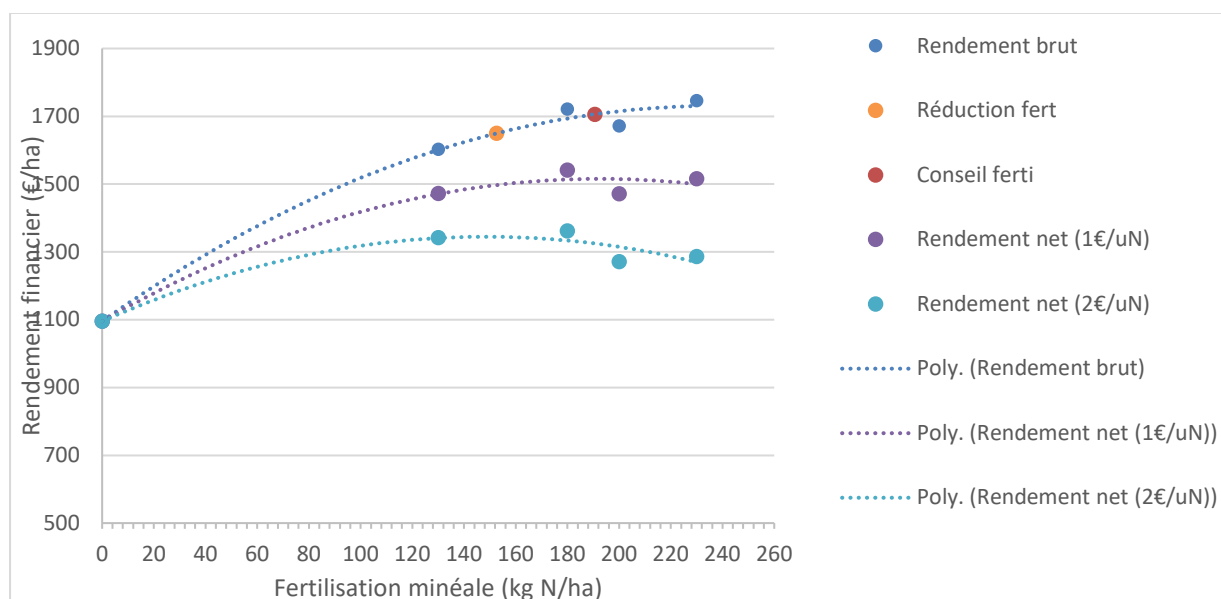


Figure 17. Courbe de réponse du rendement à la fertilisation (Gembloux, 2008).

Dans cette expérimentation, une réduction de 20% de la fertilisation par rapport au conseil moyen a un impact négatif sur le rendement financier net si le prix de l'azote est de 1 €/uN. Par contre, si le prix de l'azote est doublé, la réduction de fertilisation est profitable à l'agriculteur (tableau 30).

Tableau 30. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Gembloux, 2008).

Conseil ferti (kg N/ha)	191	Réduction -20% ferti	153
Rendement brut	1.706 €	Rendement brut	1.649 €
Rendement net 1€/uN	1.515 €	Rendement net 1€/uN	1.497 €
Rendement net 2€/uN	1.324 €	Rendement net 2€/uN	1.344 €

<sup>17</sup> <https://www.gembloux.ulg.ac.be/gp/grenera/Bibliotheque/PROTECTeau/2008/DG%2008-05%20Essai%20colza.pdf>

### 5.2.4. Expérimentation 2009

Une expérimentation<sup>18</sup> menée par GxABT, GRENeRA et l'APPO a été valorisée dans le cadre de cette étude.

La plateforme était située à Gembloux, sur un sol limoneux. Le précédent cultural était une céréale paille enlevée. Le conseil de fertilisation moyen calculé sur base de la méthode Requasud et de l'outil PROTECT'eau était de 178 kg N/ha.

La figure 18 illustre l'impact de la fertilisation azotée sur le rendement financier.

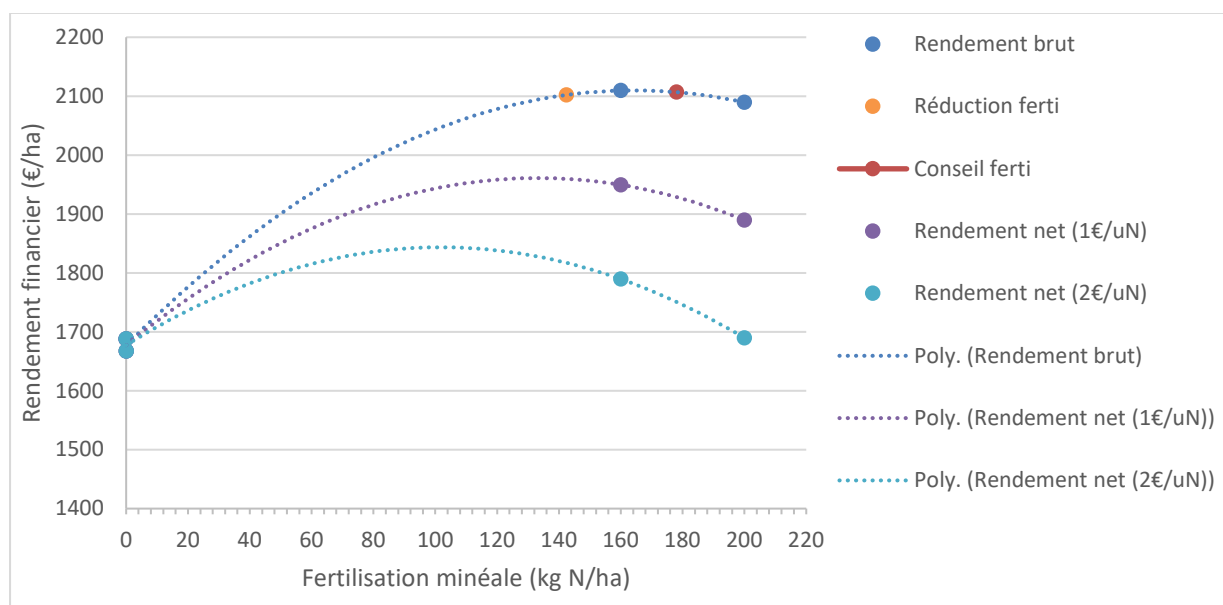


Figure 18. Courbe de réponse du rendement à la fertilisation (Gembloux, 2009).

Dans cette expérimentation, une réduction de 20% de la fertilisation par rapport au conseil moyen a un impact positif sur les rendements financiers nets (tableau 31).

Tableau 31. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Gembloux, 2009).

Conseil ferti (kg N/ha)	178	Réduction -20% ferti	142
Rendement brut	2.107 €	Rendement brut	2.102 €
Rendement net 1€/uN	1.929 €	Rendement net 1€/uN	1.960 €
Rendement net 2€/uN	1.751 €	Rendement net 2€/uN	1.817 €

<sup>18</sup> [https://www.gembloux.ulg.ac.be/gp/grenera/Bibliotheque/PROTECTeau/2009/DG09-05\\_Essai\\_colza.pdf](https://www.gembloux.ulg.ac.be/gp/grenera/Bibliotheque/PROTECTeau/2009/DG09-05_Essai_colza.pdf)



### 5.2.5. Expérimentation 2014

Une expérimentation<sup>19</sup> menée par GxABT, GRENeRA et l'APPO a été valorisée dans le cadre de cette étude.

La plateforme était située à Gembloux, sur un sol limoneux. Le précédent cultural était une céréale paille enlevée. Le conseil de fertilisation moyen calculé sur base de la méthode Requasud et de l'outil PROTECT'eau était de 205 kg N/ha.

La figure 19 illustre l'impact de la fertilisation azotée sur le rendement financier.

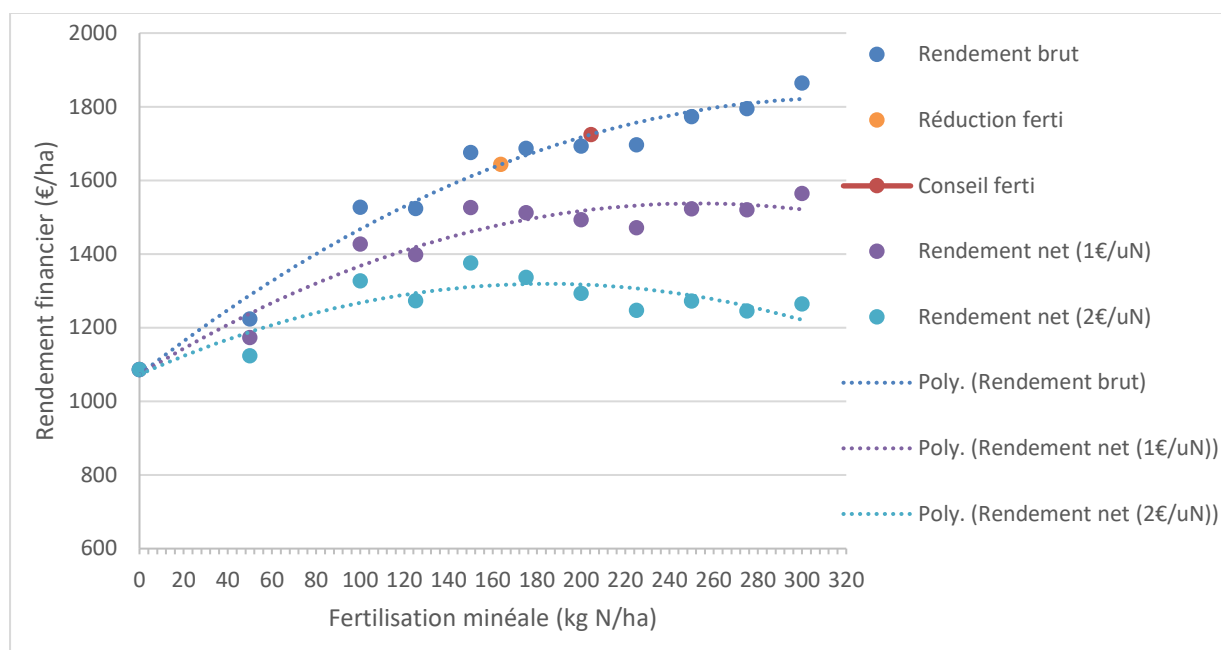


Figure 19. Courbe de réponse du rendement à la fertilisation (Gembloux, 2014).

Dans cette expérimentation, une réduction de 20% de la fertilisation par rapport au conseil moyen a un impact négatif sur le rendement financier net si le prix de l'azote est de 1 €/uN. Par contre, si le prix de l'azote est doublé, cet impact est nul (tableau 32).

Tableau 32. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Gembloux, 2014).

Conseil ferti (kg N/ha)	205	Réduction -20% ferti	164
Rendement brut	1.724 €	Rendement brut	1.643 €
Rendement net 1€/uN	1.520 €	Rendement net 1€/uN	1.479 €
Rendement net 2€/uN	1.315 €	Rendement net 2€/uN	1.316 €

<sup>19</sup> [https://www.gembloux.ulg.ac.be/gp/grenera/Bibliotheque/PROTECTeau/2014/DG14-07\\_suivi\\_mineralisation\\_fro-col.pdf](https://www.gembloux.ulg.ac.be/gp/grenera/Bibliotheque/PROTECTeau/2014/DG14-07_suivi_mineralisation_fro-col.pdf)

### 5.2.6. Expérimentation 2015

Une expérimentation<sup>20</sup> menée par GxABT, GRENeRA et l'APPO a été valorisée dans le cadre de cette étude.

La plateforme était située à Gembloux, sur un sol limoneux. Le précédent cultural était une céréale paille enlevée. Le conseil de fertilisation moyen calculé sur base de la méthode Requasud et de l'outil PROTECT'eau était de 203 kg N/ha.

La figure 20 illustre l'impact de la fertilisation azotée sur le rendement financier.

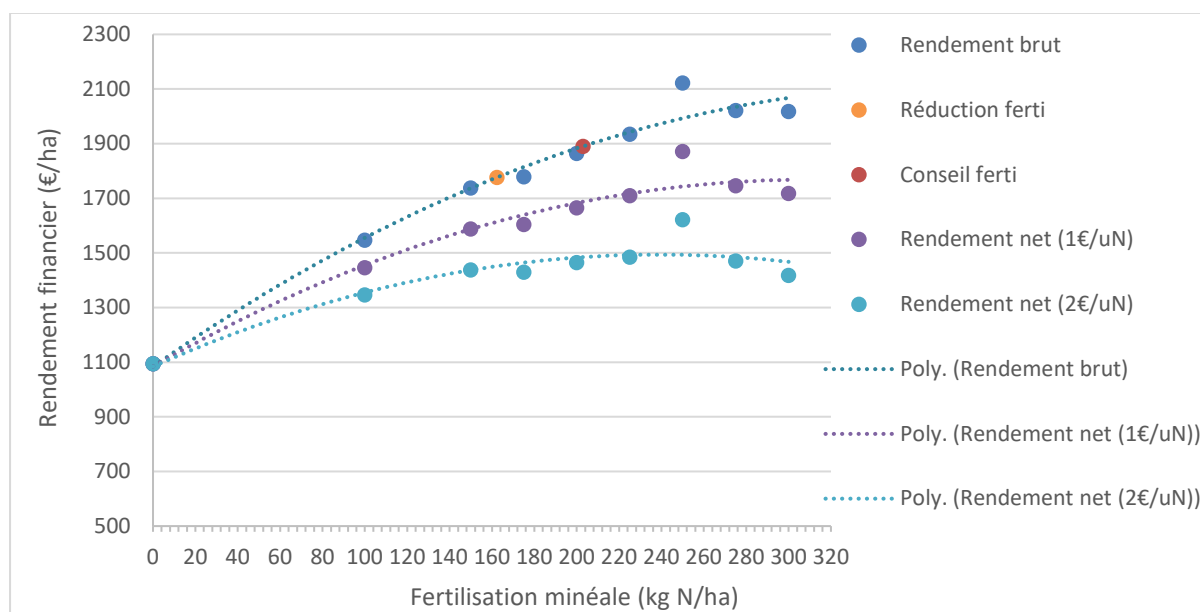


Figure 20. Courbe de réponse du rendement à la fertilisation (Gembloux, 2015).

Dans cette expérimentation, une réduction de 20% de la fertilisation par rapport au conseil moyen a un impact négatif sur les rendements financiers nets (tableau 33).

Tableau 33. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Gembloux, 2015).

Conseil ferti (kg N/ha)	203	Réduction -20% ferti	162
Rendement brut	1.889 €	Rendement brut	1.775 €
Rendement net 1€/uN	1.686 €	Rendement net 1€/uN	1.613 €
Rendement net 2€/uN	1.483 €	Rendement net 2€/uN	1.451 €

<sup>20</sup> [https://www.gembloux.ulg.ac.be/gp/grenera/Bibliotheque/PROTECTeau/2015/DG15-10\\_fertilisation\\_colza.pdf](https://www.gembloux.ulg.ac.be/gp/grenera/Bibliotheque/PROTECTeau/2015/DG15-10_fertilisation_colza.pdf)

### 5.2.7. Expérimentation 2016

Une expérimentation<sup>21</sup> menée par GxABT, GRENERA et l'APPO a été valorisée dans le cadre de cette étude.

La plateforme était située à Gembloux, sur un sol limoneux. Le précédent cultural était une céréale paille enlevée. Le conseil de fertilisation moyen calculé sur base de la méthode Requasud, de l'outil PROTECT'eau et de la « réglette Azote -Colza » de Terresinovia était de 191 kg N/ha.

La figure 21 illustre l'impact de la fertilisation azotée sur le rendement financier.

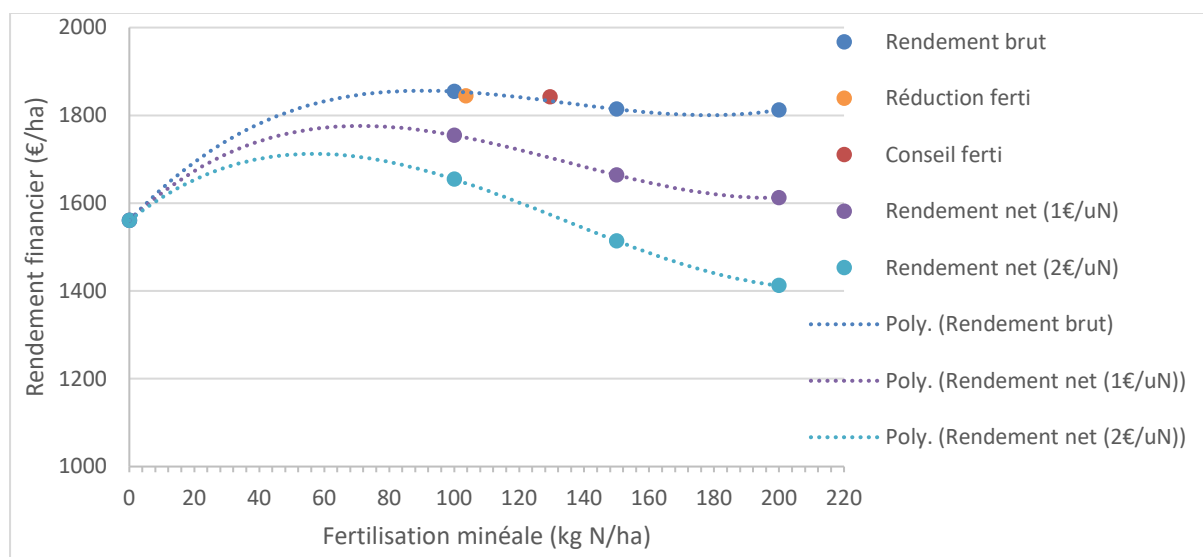


Figure 21. Courbe de réponse du rendement à la fertilisation (Gembloux, 2016).

Dans cette expérimentation, une réduction de 20% de la fertilisation par rapport au conseil moyen a un impact positif sur les rendements financiers nets (tableau 34).

Tableau 34. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Gembloux, 2016).

Conseil ferti (kg N/ha)	130	Réduction -20% ferti	104
Rendement brut	1.842 €	Rendement brut	1.844 €
Rendement net 1€/uN	1.712 €	Rendement net 1€/uN	1.741 €
Rendement net 2€/uN	1.583 €	Rendement net 2€/uN	1.637 €

<sup>21</sup> [https://www.gembloux.ulg.ac.be/gp/grenera/Bibliotheque/PROTECTeau/2016/DG16-07\\_fertilisation\\_colza.pdf](https://www.gembloux.ulg.ac.be/gp/grenera/Bibliotheque/PROTECTeau/2016/DG16-07_fertilisation_colza.pdf)

### 5.2.8. Expérimentation 2020

Une expérimentation<sup>22</sup> menée par GxABT, GRENERA et l'APPO a été valorisée dans le cadre de cette étude.

La plateforme était située à Gembloux, sur un sol limoneux. Le précédent cultural était une céréale paille enlevée. Le conseil de fertilisation établi sur base de la méthode harmonisée Requasud-PROTECT'eau était de 190 kg N/ha.

La figure 22 illustre l'impact de la fertilisation azotée sur le rendement financier.

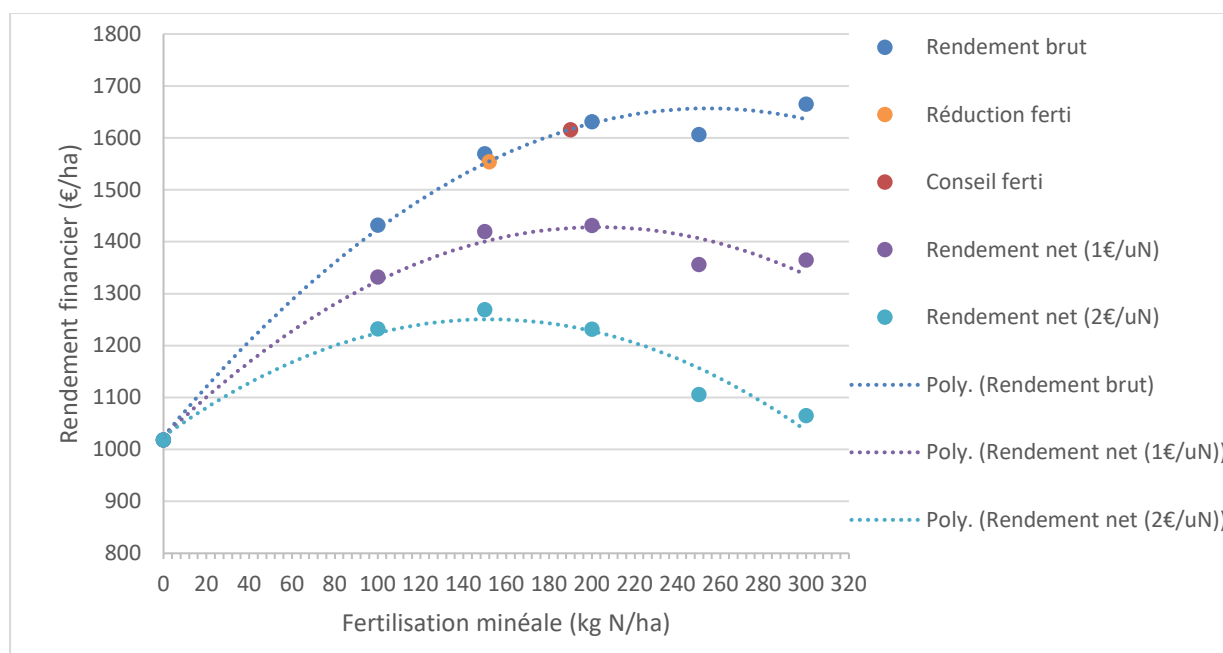


Figure 22. Courbe de réponse du rendement à la fertilisation (Gembloux, 2020).

Dans cette expérimentation, une réduction de 20% de la fertilisation par rapport au conseil moyen a un impact négatif sur les rendements financiers nets (tableau 35).

Tableau 35. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Gembloux, 2020).

Conseil ferti (kg N/ha)	190	Réduction -20% ferti	152
Rendement brut	1.615 €	Rendement brut	1.554 €
Rendement net 1€/uN	1.425 €	Rendement net 1€/uN	1.402 €
Rendement net 2€/uN	1.235 €	Rendement net 2€/uN	1.250 €

<sup>22</sup> [https://www.gembloux.ulg.ac.be/gp/grenera/Bibliotheque/PROTECTeau/2020/DG\\_20-07\\_Colza.pdf](https://www.gembloux.ulg.ac.be/gp/grenera/Bibliotheque/PROTECTeau/2020/DG_20-07_Colza.pdf)

### 5.3. Maïs

#### 5.3.1. Expérimentation 2009

Une expérimentation<sup>23</sup> menée par l’UCLouvain et le CIPF a été valorisée dans le cadre de cette étude.

La plateforme était située dans le Condroz. Le précédent cultural était une chicorée. Le conseil de fertilisation établi sur base de la méthode harmonisée Requasud-PROTECT’eau était de 126 kg N/ha.

La figure 23 illustre l’impact de la fertilisation azotée sur le rendement financier.

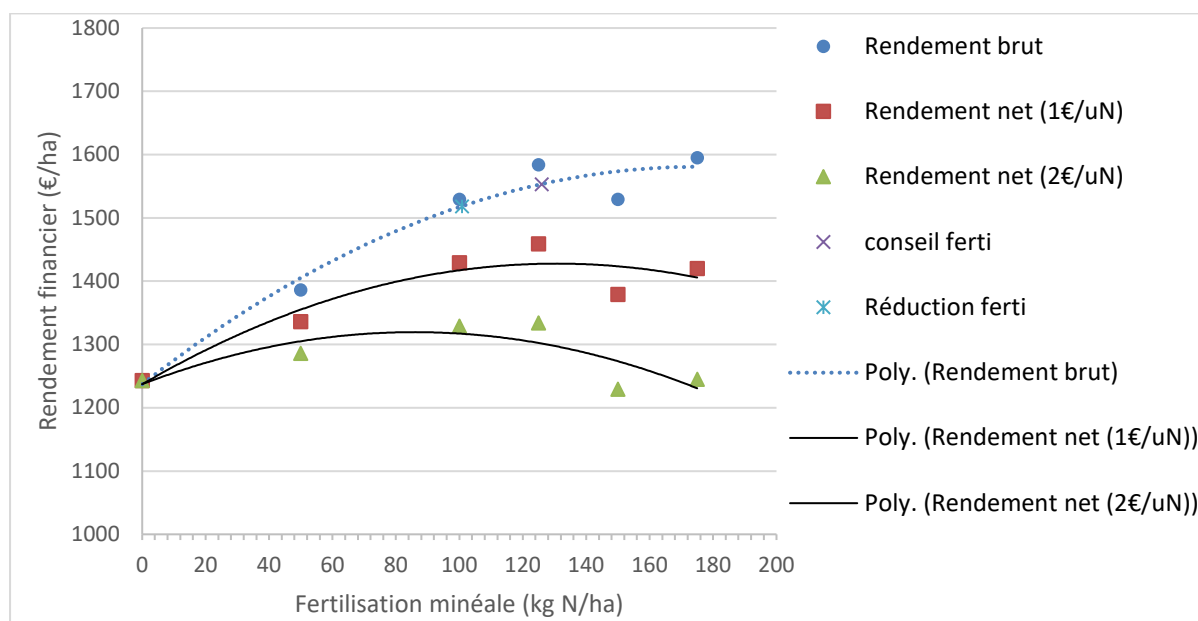


Figure 23. Courbe de réponse du rendement du maïs à la fertilisation (Condroz, 2009).

Dans cette expérimentation, une réduction de 20% de la fertilisation par rapport au conseil moyen a un impact négligeable sur les rendements financiers nets (tableau 36).

Tableau 36. Impact financier d’une réduction de la fertilisation (Condroz, 2009).

Conseil ferti (kg N/ha)	126	Réduction -20% ferti	101
Rendement brut	1.553 €	Rendement brut	1.518 €
Rendement net 1€/uN	1.427 €	Rendement net 1€/uN	1.417 €
Rendement net 2€/uN	1.301 €	Rendement net 2€/uN	1.317 €

<sup>23</sup> Dossier UCL 12-44

### 5.3.2. Expérimentations 2010

Deux expérimentations<sup>24</sup> menées par l'UCLouvain et le CIPF ont été valorisées dans le cadre de cette étude.

La première plateforme était située en région limoneuse. Le précédent cultural était une céréale paille enlevée. Le conseil de fertilisation établi sur base de la méthode harmonisée Requasud-PROTECT'eau était de 140 kg N/ha.

La figure 24 illustre l'impact de la fertilisation azotée sur le rendement financier.

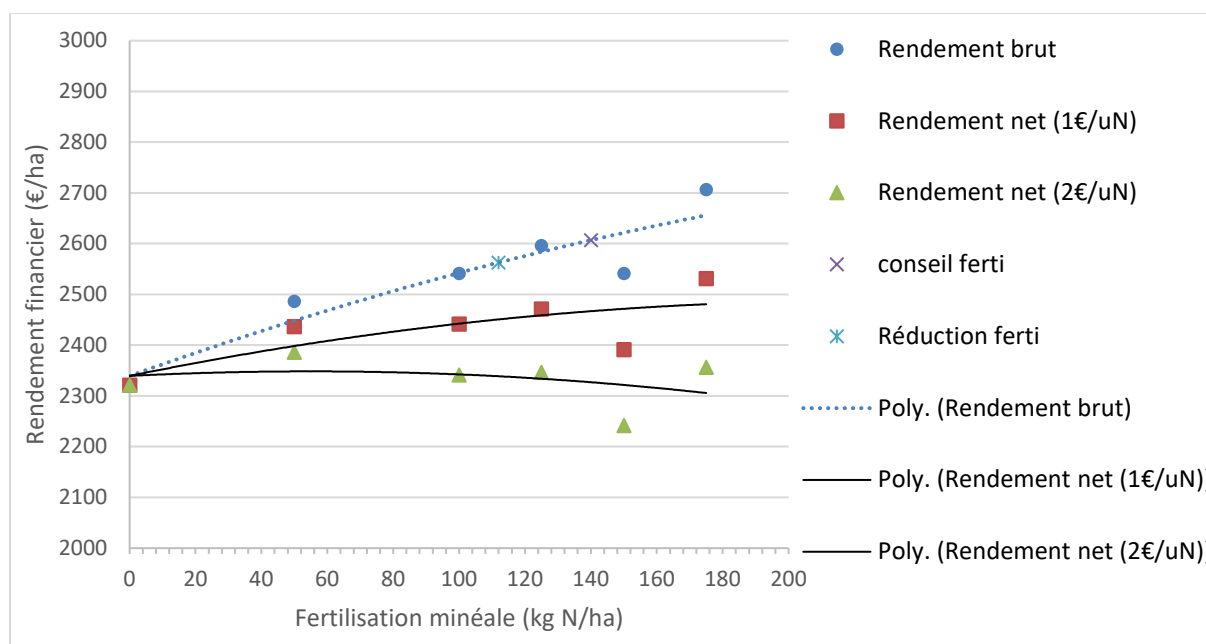


Figure 24. Courbe de réponse du rendement du maïs à la fertilisation (Région limoneuse, 2010).

Dans cette expérimentation, une réduction de 20% de la fertilisation par rapport au conseil moyen a un impact négligeable sur les rendements financiers nets (tableau 37).

Tableau 37. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Région limoneuse, 2010).

Conseil ferti (kg N/ha)	140	Réduction -20% ferti	112
Rendement brut	2.606 €	Rendement brut	2.562 €
Rendement net 1€/uN	2.466 €	Rendement net 1€/uN	2.450 €
Rendement net 2€/uN	2.326 €	Rendement net 2€/uN	2.338 €

<sup>24</sup> Dossier UCL 12-44

La seconde plateforme était située en Condroz. Le précédent cultural était maïs. Le conseil de fertilisation établi sur base de la méthode harmonisée Requasud-PROTECT'eau était de 122 kg N/ha.

La figure 25 illustre l'impact de la fertilisation azotée sur le rendement financier.

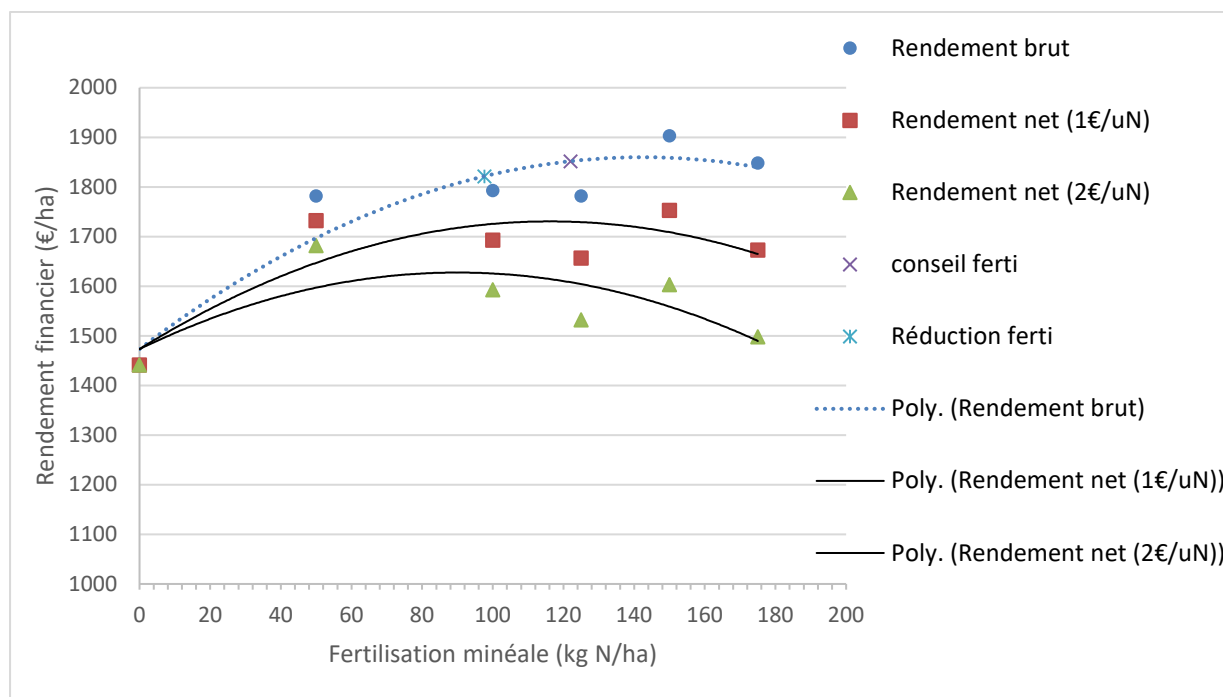


Figure 25. Courbe de réponse du rendement du maïs à la fertilisation (Condroz, 2010).

Dans cette expérimentation, une réduction de 20% de la fertilisation par rapport au conseil moyen a un impact négligeable sur les rendements financiers nets (tableau 38).

Tableau 38. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Condroz, 2010).

Conseil ferti (kg N/ha)	122	Réduction -20% ferti	98
Rendement brut	1.851 €	Rendement brut	1.821 €
Rendement net 1€/uN	1.729 €	Rendement net 1€/uN	1.724 €
Rendement net 2€/uN	1.607 €	Rendement net 2€/uN	1.626 €

### 5.3.3. Expérimentations 2011

Deux expérimentations<sup>25</sup> menées par l'UCLouvain et le CIPF ont été valorisées dans le cadre de cette étude.

La première plateforme était située en région limoneuse. Le précédent cultural était une céréale paille enlevée. Le conseil de fertilisation établi sur base de la méthode harmonisée Requasud-PROTECT'eau était de 105 kg N/ha.

La figure 26 illustre l'impact de la fertilisation azotée sur le rendement financier.

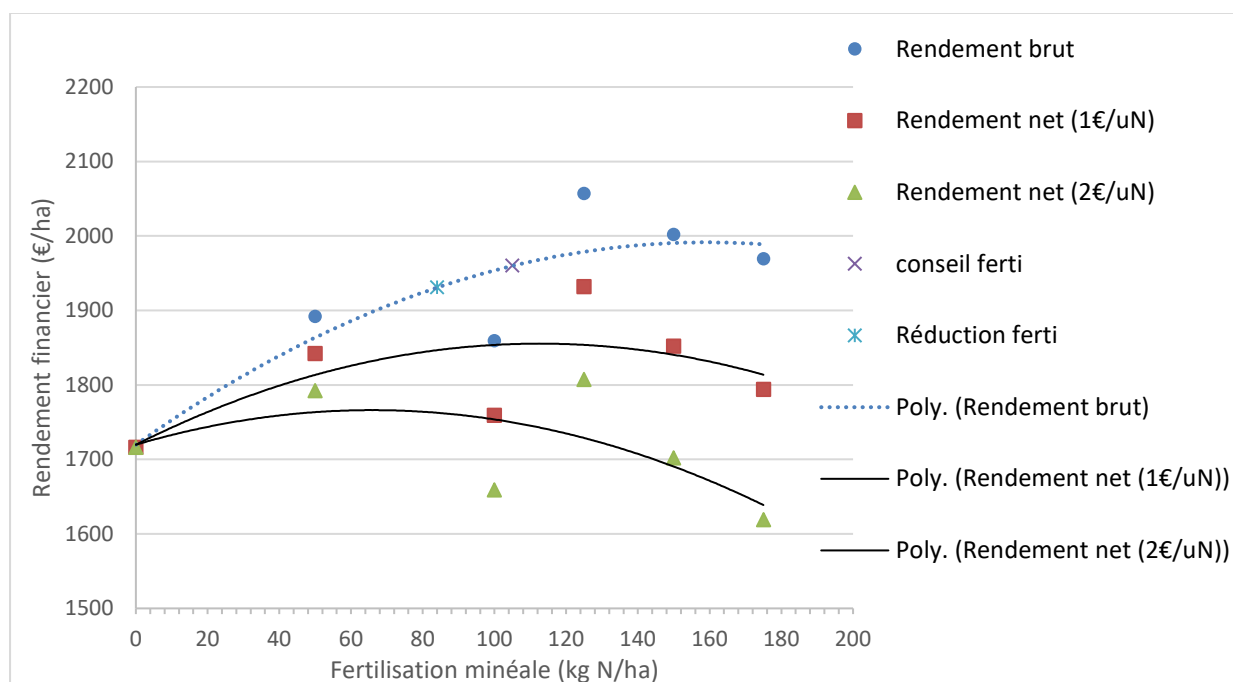


Figure 26. Courbe de réponse du rendement du maïs à la fertilisation (Région limoneuse, 2011).

Dans cette expérimentation, une réduction de 20% de la fertilisation par rapport au conseil moyen a un impact négligeable sur les rendements financiers nets (tableau 39 tableau 36).

Tableau 39. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Région limoneuse, 2011).

Conseil ferti (kg N/ha)	105	Réduction -20% ferti	84
Rendement brut	1.960 €	Rendement brut	1.931 €
Rendement net 1€/u	1.855 €	Rendement net 1€/uN	1.847 €
Rendement net 2€/u	1.750 €	Rendement net 2€/uN	1.763 €

<sup>25</sup> Dossier UCL 12-44



La seconde plateforme était située en Condroz. Le précédent cultural était maïs. Le conseil de fertilisation établi sur base de la méthode harmonisée Requasud-PROTECT'eau était de 132 kg N/ha.

La figure 27 illustre l'impact de la fertilisation azotée sur le rendement financier.

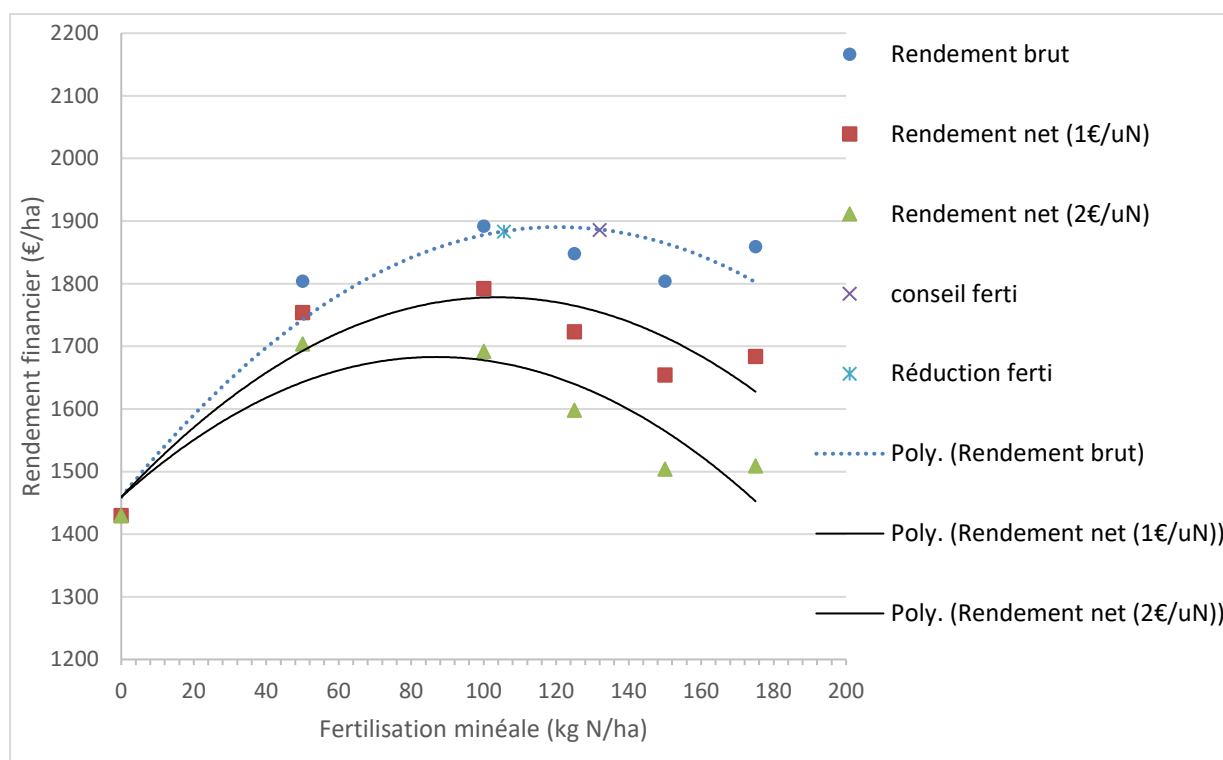


Figure 27. Courbe de réponse du rendement du maïs à la fertilisation (Condroz, 2011).

Dans cette expérimentation, une réduction de 20% de la fertilisation par rapport au conseil moyen a un petit impact positif sur les rendements financiers nets (tableau 40).

Tableau 40. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Condroz, 2011).

Conseil ferti (kg N/ha)	132	Réduction -20% ferti	106
Rendement brut	1.885 €	Rendement brut	1.883 €
Rendement net 1€/u	1.753 €	Rendement net 1€/uN	1.777 €
Rendement net 2€/u	1.621 €	Rendement net 2€/uN	1.672 €

### 5.3.4. Expérimentations 2012

Deux expérimentations<sup>26</sup> menées par l’UCLouvain et le CIPF ont été valorisées dans le cadre de cette étude.

La première plateforme était située en région limoneuse. Le précédent cultural était maïs. Le conseil de fertilisation établi sur base de la méthode harmonisée Requasud-PROTECT’eau était de 134 kg N/ha.

La figure 28 illustre l’impact de la fertilisation azotée sur le rendement financier.

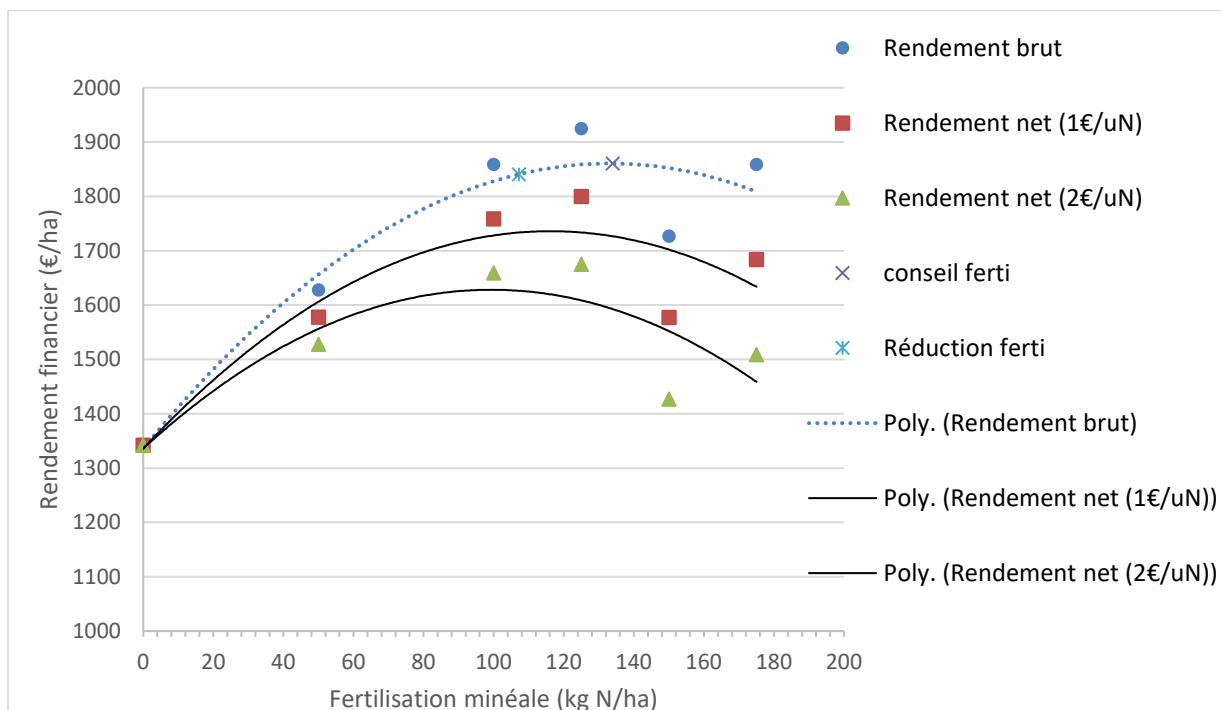


Figure 28. Courbe de réponse du rendement du maïs à la fertilisation (Région limoneuse, 2012).

Dans cette expérimentation, une réduction de 20% de la fertilisation par rapport au conseil moyen a un léger impact positif sur les rendements financiers nets (tableau 41 tableau 36).

Tableau 41. Impact financier d’une réduction de la fertilisation (Région limoneuse, 2012).

Conseil ferti (kg N/ha)	134	Réduction -20% ferti	107
Rendement brut	1.861 €	Rendement brut	1.841 €
Rendement net 1€/uN	1.727 €	Rendement net 1€/uN	1.734 €
Rendement net 2€/uN	1.593 €	Rendement net 2€/uN	1.626 €

<sup>26</sup> Dossier UCL 12-44

La seconde plateforme était située en Condroz. Le précédent cultural était maïs. Le conseil de fertilisation établi sur base de la méthode harmonisée Requasud-PROTECT'eau était de 131 kg N/ha.

La figure 29 illustre l'impact de la fertilisation azotée sur le rendement financier.

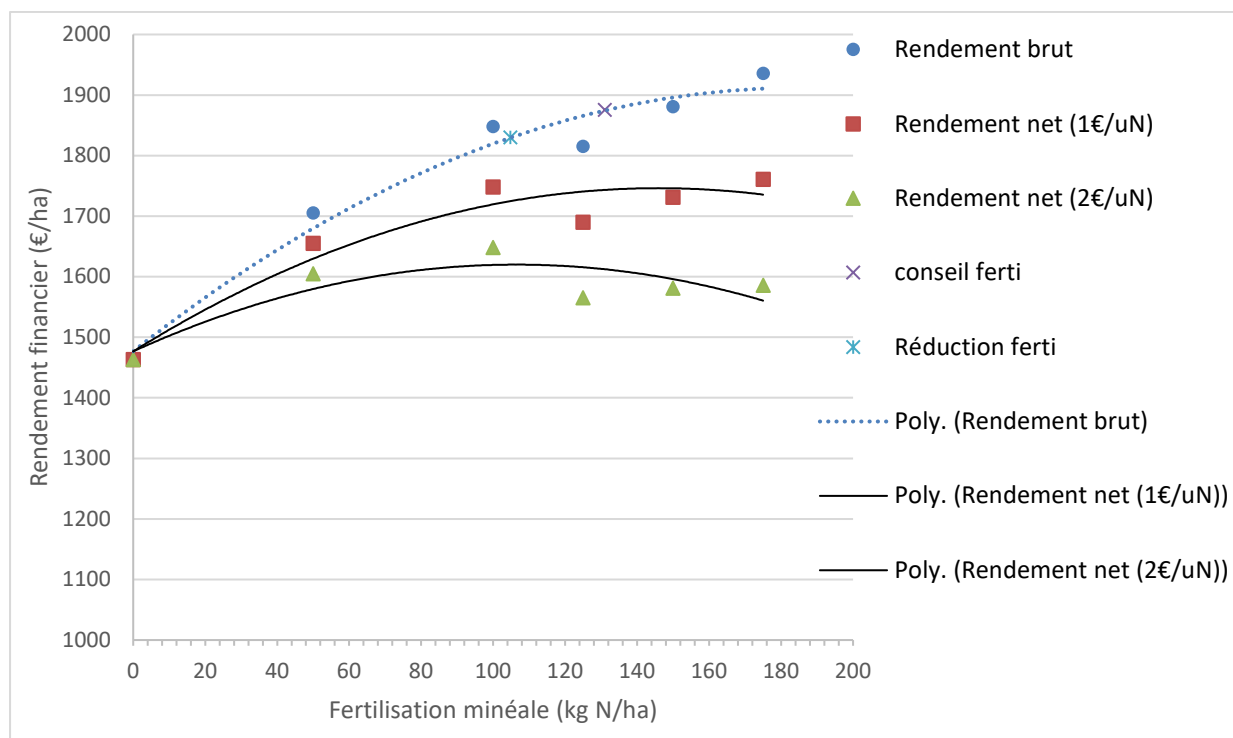


Figure 29. Courbe de réponse du rendement du maïs à la fertilisation (Condroz, 2012).

Dans cette expérimentation, une réduction de 20% de la fertilisation par rapport au conseil moyen a un impact minime sur les rendements financiers nets (tableau 42).

Tableau 42. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Condroz, 2012).

Conseil ferti (kg N/ha)	131	Réduction -20% ferti	105
Rendement brut	1.875 €	Rendement brut	1.830 €
Rendement net 1€/uN	1.744 €	Rendement net 1€/uN	1.725 €
Rendement net 2€/uN	1.613 €	Rendement net 2€/uN	1.621 €

### 5.3.5. Expérimentations 2014

Deux expérimentations<sup>27</sup> menées par Gembloux Agro-Bio Tech (GRENeRA) et le CIPF ont été valorisées dans le cadre de cette étude.

La première plateforme était située à Givry (province du Hainaut) sur sol limoneux. Le précédent cultural était une céréale paille enlevée suivie d'une CIPAN. Le conseil de fertilisation établi sur base de la méthode harmonisée Requasud-PROTECT'eau était de 88 kg N/ha.

La figure 30 illustre l'impact de la fertilisation azotée sur le rendement financier.

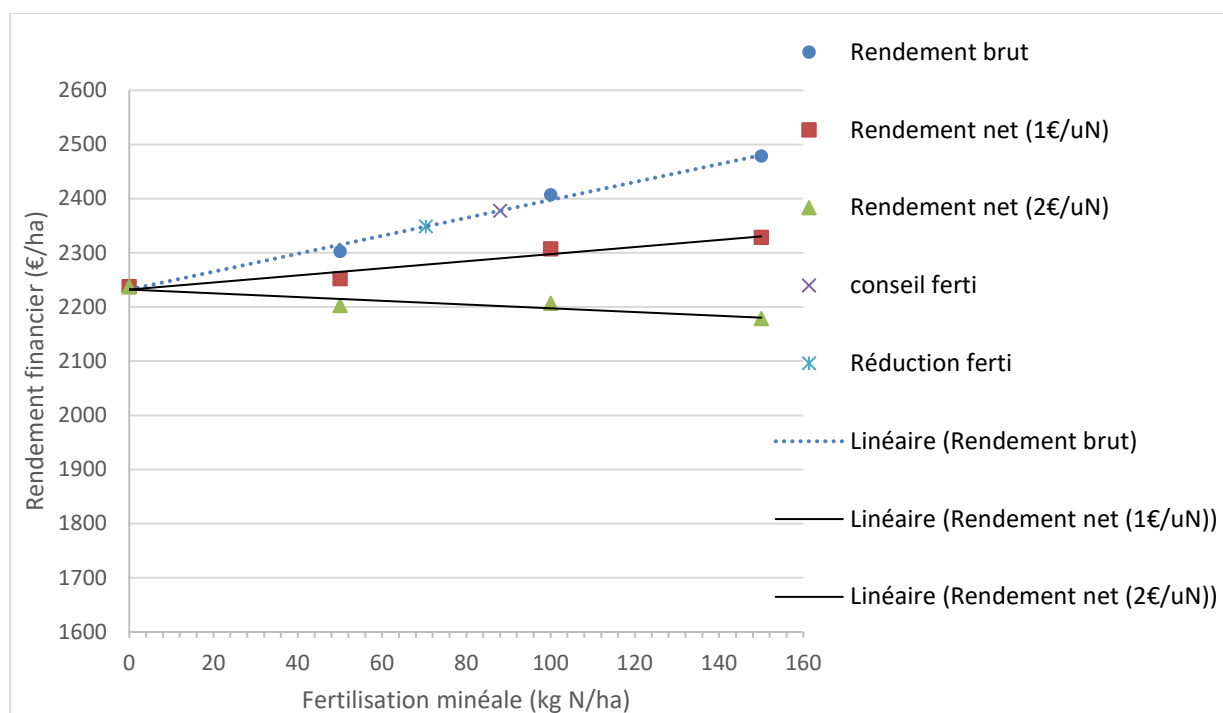


Figure 30. Courbe de réponse du rendement du maïs à la fertilisation (Givry - limon, 2014).

Dans cette expérimentation, une réduction de 20% de la fertilisation par rapport au conseil moyen a un impact minime sur les rendements financiers nets (tableau 43).

Tableau 43. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Givry - limon, 2014).

Conseil ferti (kg N/ha)	88	Réduction -20% ferti	70
Rendement brut	2.378 €	Rendement brut	2.348 €
Rendement net 1€/uN	2.290 €	Rendement net 1€/uN	2.278 €
Rendement net 2€/uN	2.202 €	Rendement net 2€/uN	2.208 €

<sup>27</sup> [https://www.gembloux.ulg.ac.be/gp/grenera/Bibliotheque/PROTECTeau/2014/DG14-06\\_essai\\_maïs.pdf](https://www.gembloux.ulg.ac.be/gp/grenera/Bibliotheque/PROTECTeau/2014/DG14-06_essai_maïs.pdf)

La seconde plateforme était située toujours à Givry mais sur sol crayeux. Le précédent cultural était maïs. Le conseil de fertilisation établi sur base de la méthode harmonisée Requasud-PROTECT'eau était de 118 kg N/ha.

La figure 31 illustre l'impact de la fertilisation azotée sur le rendement financier.

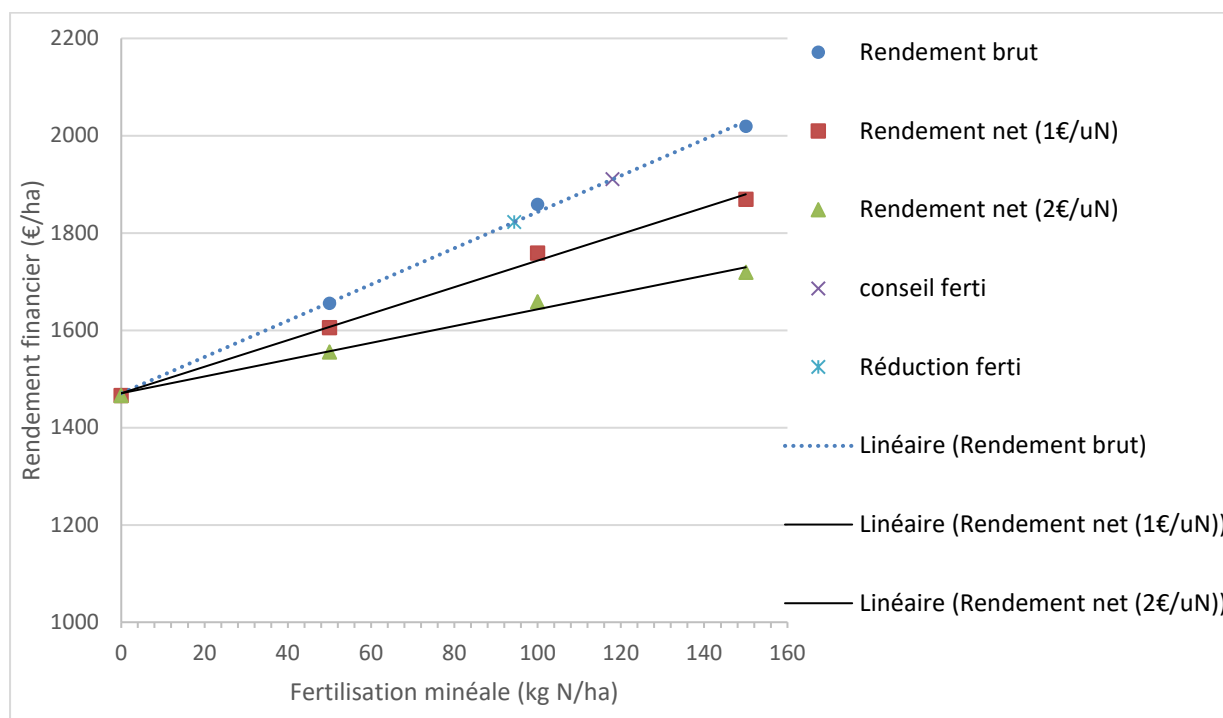


Figure 31. Courbe de réponse du rendement du maïs à la fertilisation (Givry – sol crayeux, 2014).

Dans cette expérimentation, une réduction de 20% de la fertilisation par rapport au conseil moyen a un petit impact négatif sur les rendements financiers nets (tableau 44).

Tableau 44. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Givry – sol crayeux, 2014).

Conseil ferti (kg N/ha)	118	Réduction -20% ferti	94
Rendement brut	1.911 €	Rendement brut	1.823 €
Rendement net 1€/uN	1.793 €	Rendement net 1€/uN	1.728 €
Rendement net 2€/uN	1.675 €	Rendement net 2€/uN	1.634 €

### 5.3.6. Expérimentations 2015

Deux expérimentations<sup>28</sup> menées par Gembloux Agro-Bio Tech (GRENeRA) et le CIPF ont été valorisées dans le cadre de cette étude.

La première plateforme était située à Givry (province du Hainaut) sur sol limoneux. Le précédent cultural était une chicorée. Le conseil de fertilisation établi sur base de la méthode harmonisée Requasud-PROTECT'eau était de 140 kg N/ha.

La figure 32 illustre l'impact de la fertilisation azotée sur le rendement financier.

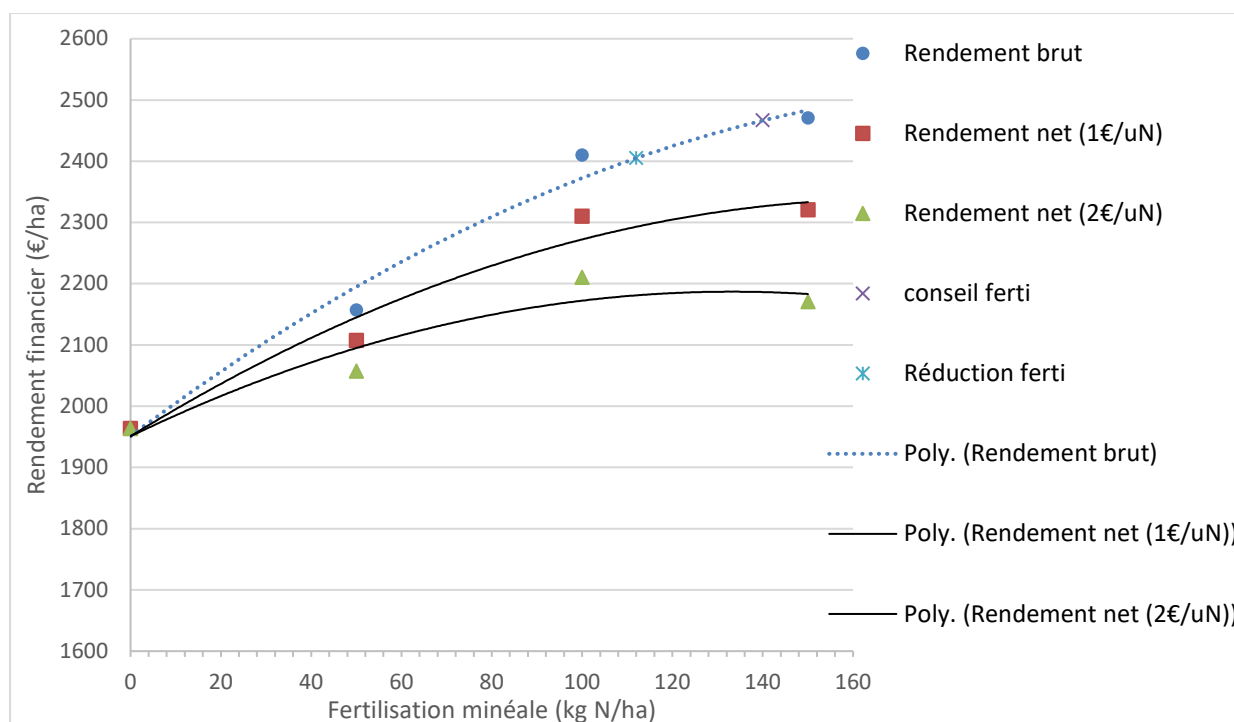


Figure 32. Courbe de réponse du rendement du maïs à la fertilisation (Givry - limon, 2015).

Dans cette expérimentation, une réduction de 20% de la fertilisation par rapport au conseil moyen a un impact minime sur les rendements financiers nets (tableau 45).

Tableau 45. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Givry - limon, 2015).

Conseil ferti (kg N/ha)	140	Réduction -20% ferti	112
Rendement brut	2.467 €	Rendement brut	2.405 €
Rendement net 1€/uN	2.327 €	Rendement net 1€/uN	2.293 €
Rendement net 2€/uN	2.187 €	Rendement net 2€/uN	2.181 €

<sup>28</sup> [https://www.gembloux.ulg.ac.be/gp/grenera/Doc1\\_fichiers/DG/2015/DG15-05\\_essai\\_maïs.pdf](https://www.gembloux.ulg.ac.be/gp/grenera/Doc1_fichiers/DG/2015/DG15-05_essai_maïs.pdf)

La seconde plateforme était située toujours à Givry mais sur sol crayeux. Le précédent cultural était également une chicorée. Le conseil de fertilisation établi sur base de la méthode harmonisée Requasud-PROTECT'eau était de 100 kg N/ha.

La figure 33 illustre l'impact de la fertilisation azotée sur le rendement financier.

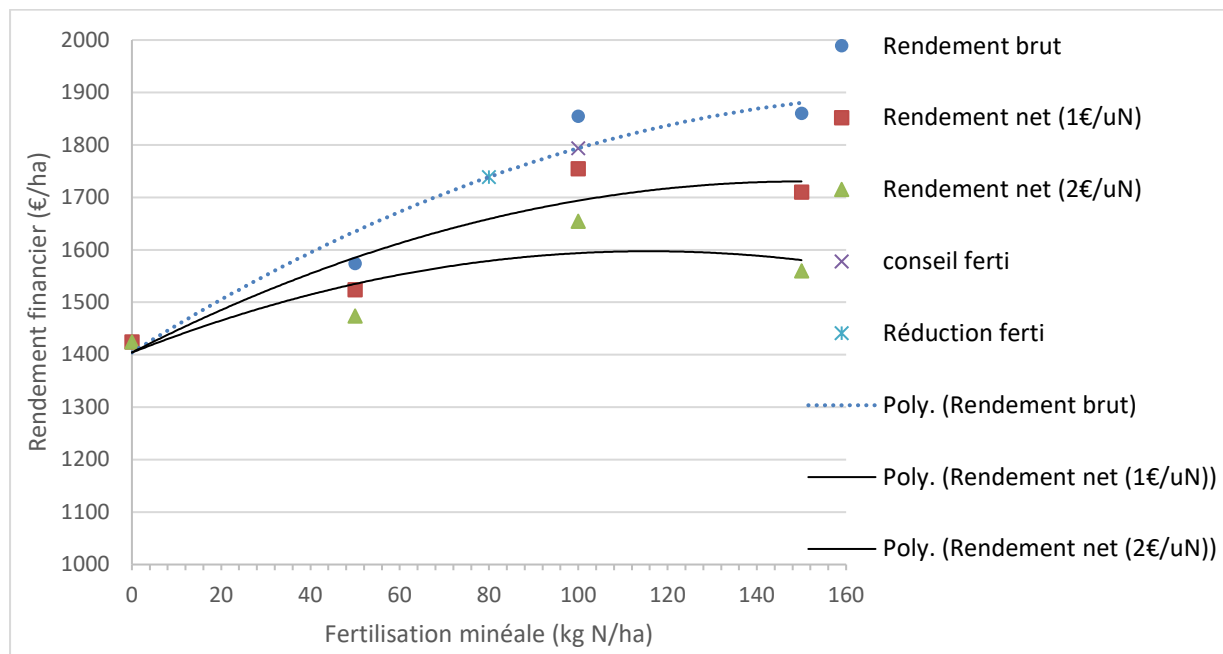


Figure 33. Courbe de réponse du rendement du maïs à la fertilisation (Givry – sol crayeux, 2015).

Dans cette expérimentation, une réduction de 20% de la fertilisation par rapport au conseil moyen a un petit impact négatif sur les rendements financiers nets (tableau 46).

Tableau 46. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Givry – sol crayeux, 2015).

Conseil ferti (kg N/ha)	100	Réduction -20% ferti	80
Rendement brut	1.794 €	Rendement brut	1.739 €
Rendement net 1€/uN	1.694 €	Rendement net 1€/uN	1.659 €
Rendement net 2€/uN	1.594 €	Rendement net 2€/uN	1.579 €

### 5.3.7. Expérimentations 2019

Une expérimentation<sup>29</sup> menée par UCLouvain et le CIPF a été valorisée dans le cadre de cette étude.

La première plateforme était située à Givry (province du Hainaut) sur sol limoneux. Le précédent cultural était une céréale paille enlevée. Le conseil de fertilisation établi sur base de la méthode harmonisée Requasud-PROTECT'eau était de 129 kg N/ha.

La figure 34 illustre l'impact de la fertilisation azotée sur le rendement financier.

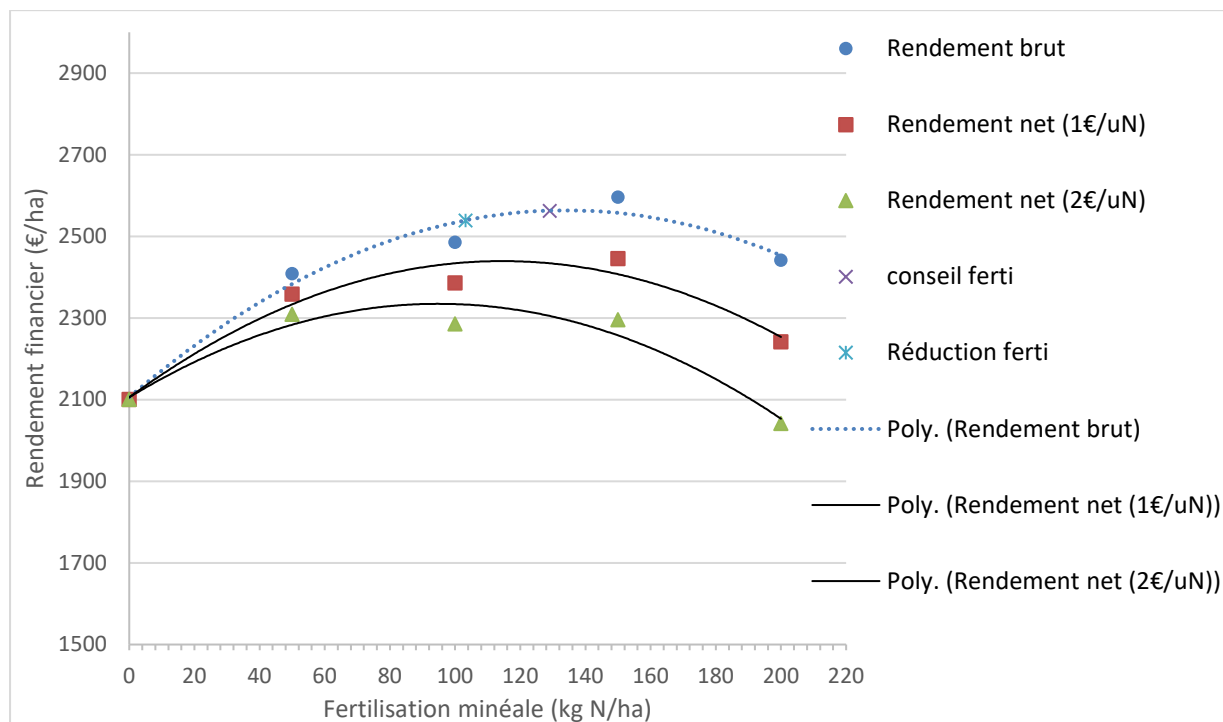


Figure 34. Courbe de réponse du rendement du maïs à la fertilisation (Givry - limon, 2019).

Dans cette expérimentation, une réduction de 20% de la fertilisation par rapport au conseil moyen a un impact minime sur les rendements financiers nets (tableau 47).

Tableau 47. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Givry - limon, 2019).

Conseil ferti (kg N/ha)	129	Réduction -20% ferti	103
Rendement brut	2.563 €	Rendement brut	2.539 €
Rendement net 1€/uN	2.434 €	Rendement net 1€/uN	2.436 €
Rendement net 2€/uN	2.305 €	Rendement net 2€/uN	2.333 €

Une seconde plateforme expérimentale était également en place à Givry, à titre de comparaison, sur sol crayeux. Les résultats de cette expérimentation n'ont pas été valorisés dans cette étude car les conditions de sécheresse de l'année ont engendré des rendements très faibles, quelles que soient les modalités de fertilisation.

<sup>29</sup> Dossier UCL 19-31a1



## 5.4. Pomme de terre

### 5.4.1. Expérimentation 2011

Une expérimentation<sup>30</sup> menée par UCLouvain a été valorisée dans le cadre de cette étude.

La plateforme était située à Houtain-le-Val, sur un sol limoneux. Le précédent cultural était une céréale paille enlevée. Le conseil de fertilisation était de 185 kg N/ha.

La figure 35 illustre l'impact de la fertilisation azotée sur le rendement financier en prenant l'hypothèse d'une valorisation de la récolte à 100 €/tonne de tubercules.

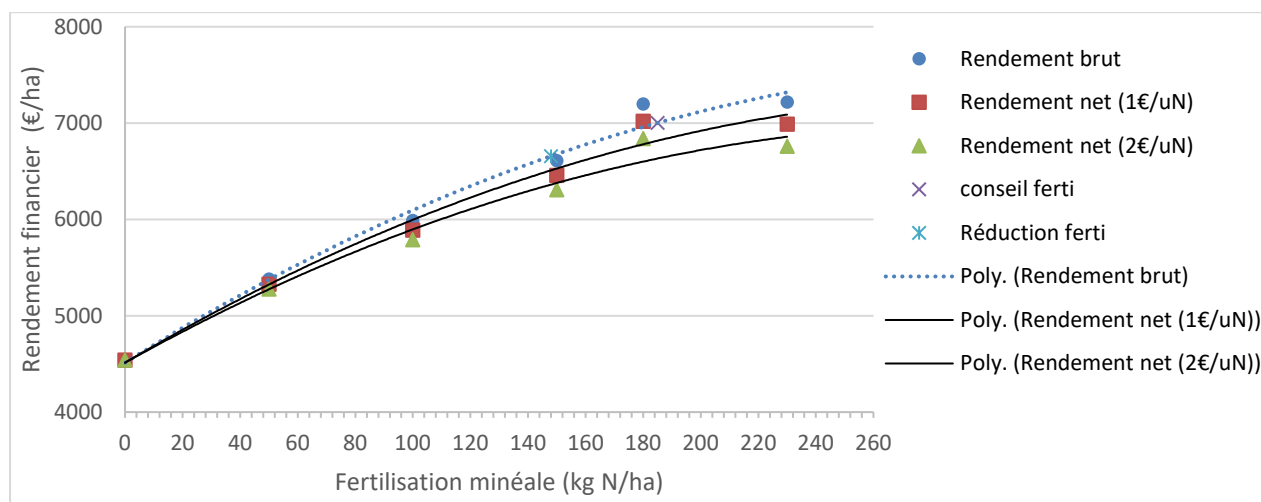


Figure 35. Courbe de réponse du rendement à la fertilisation (Houtain-le-Val, 2011).

Dans cette expérimentation, une réduction de 20% de la fertilisation par rapport au conseil moyen a un impact négatif sur les rendements financiers nets (tableau 48 et tableau 49).

Tableau 48. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Houtain-le-Val, 2011) (prix 100 €/t).

Conseil ferti (kg N/ha)	185	Réduction -20% ferti	148
Rendement brut	7.004 €	Rendement brut	6.659 €
Rendement net 1€/uN	6.819 €	Rendement net 1€/uN	6.511 €
Rendement net 2€/uN	6.634 €	Rendement net 2€/uN	6.363 €

Tableau 49. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Houtain-le-Val, 2011) (prix 200 €/t).

Conseil ferti (kg N/ha)	185	Réduction -20% ferti	148
Rendement brut	13.819 €	Rendement brut	13.167 €
Rendement net 1€/uN	13.634 €	Rendement net 1€/uN	13.019 €
Rendement net 2€/uN	13.449 €	Rendement net 2€/uN	12.871 €

<sup>30</sup> Dossier UCL 13-44.

### 5.4.2. Expérimentation 2012

Une expérimentation<sup>31</sup> menée par UCLouvain a été valorisée dans le cadre de cette étude.

La plateforme était située à Thines, sur un sol limoneux. Le précédent cultural était une céréale paille enlevée. Le conseil de fertilisation était de 188 kg N/ha.

La figure 36 illustre l'impact de la fertilisation azotée sur le rendement financier en prenant l'hypothèse d'une valorisation de la récolte à 100 €/tonne de tubercules.

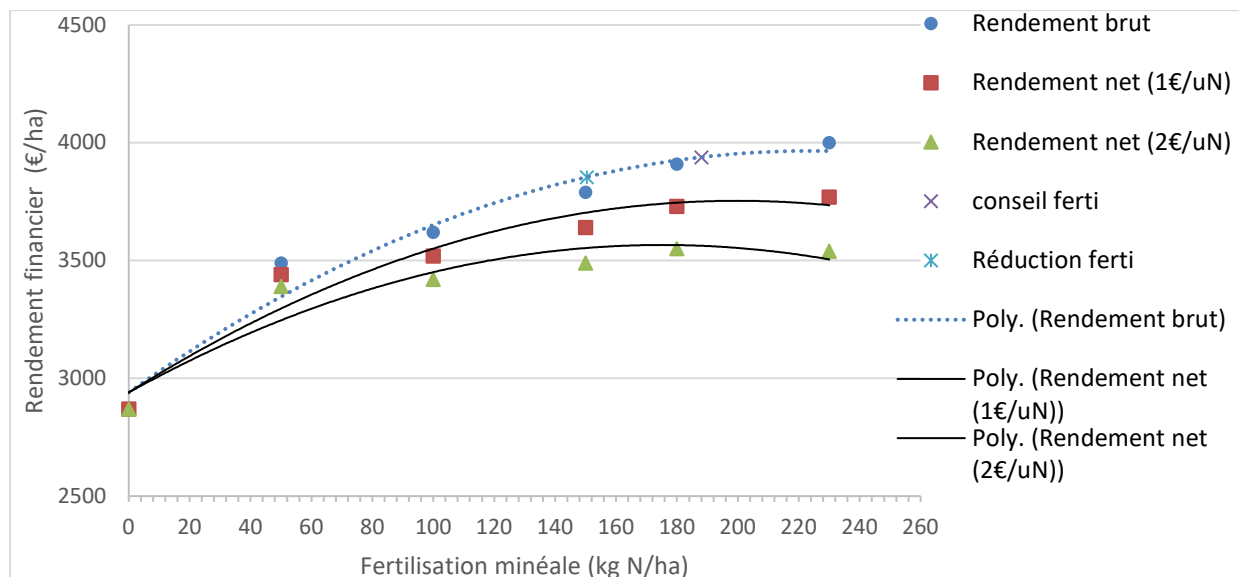


Figure 36. Courbe de réponse du rendement à la fertilisation (Thines, 2012).

Dans cette expérimentation, une réduction de 20% de la fertilisation par rapport au conseil moyen a un impact négatif sur les rendements financiers nets (tableau 50 et tableau 51).

Tableau 50. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Thines, 2012) (prix 100 €/t).

Conseil ferti (kg N/ha)	185	Réduction -20% ferti	148
Rendement brut	7.004 €	Rendement brut	6.659 €
Rendement net 1€/uN	6.819 €	Rendement net 1€/uN	6.511 €
Rendement net 2€/uN	6.634 €	Rendement net 2€/uN	6.363 €

Tableau 51. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Thines, 2012) (prix 200 €/t).

Conseil ferti (kg N/ha)	185	Réduction -20% ferti	148
Rendement brut	13.819 €	Rendement brut	13.167 €
Rendement net 1€/uN	13.634 €	Rendement net 1€/uN	13.019 €
Rendement net 2€/uN	13.449 €	Rendement net 2€/uN	12.871 €

<sup>31</sup> Dossier UCL 13-44.

### 5.4.1. Expérimentations 2013

Une expérimentation<sup>32</sup> menée par UCLouvain a été valorisée dans le cadre de cette étude.

La plateforme était située à Ophain, sur un sol limoneux. Le précédent cultural était une céréale paille enlevée. Le conseil de fertilisation était de 194 kg N/ha.

La figure 37 illustre l'impact de la fertilisation azotée sur le rendement financier en prenant l'hypothèse d'une valorisation de la récolte à 100 €/tonne de tubercules.

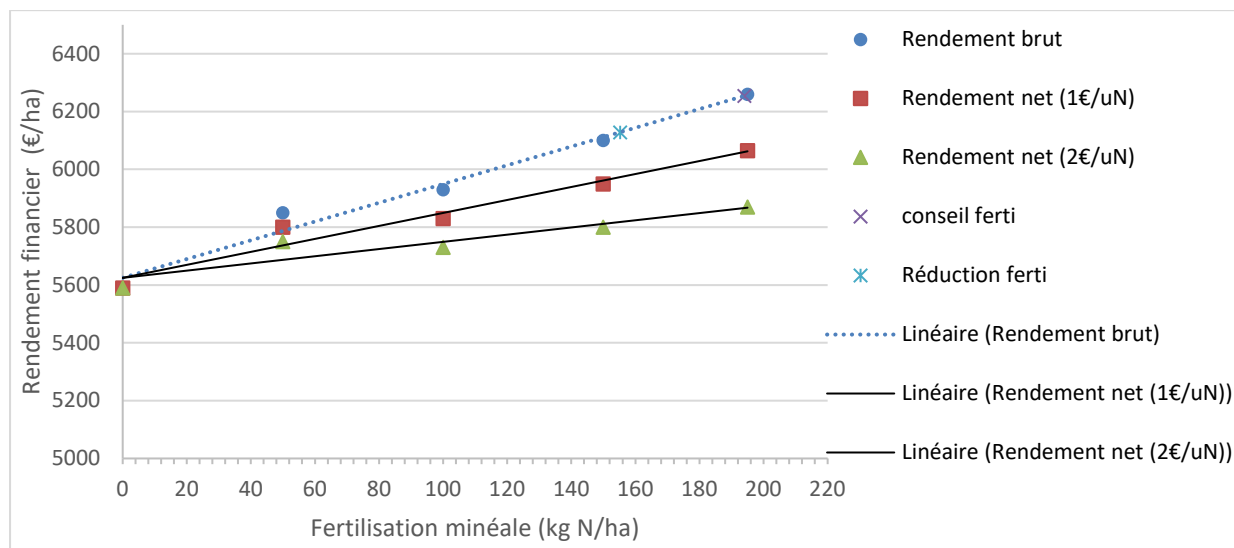


Figure 37. Courbe de réponse du rendement à la fertilisation (Ophain, 2013).

Dans cette expérimentation, une réduction de 20% de la fertilisation par rapport au conseil moyen a un impact négatif sur les rendements financiers nets (tableau 52 et tableau 53).

Tableau 52. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Ophain, 2013) (prix 100 €/t).

Conseil ferti (kg N/ha)	194	Réduction -20% ferti	155
Rendement brut	6.254 €	Rendement brut	6.128 €
Rendement net 1€/uN	6.060 €	Rendement net 1€/uN	5.973 €
Rendement net 2€/uN	5.866 €	Rendement net 2€/uN	5.818 €

Tableau 53. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Ophain, 2013) (prix 200 €/t).

Conseil ferti (kg N/ha)	194	Réduction -20% ferti	155
Rendement brut	12.509 €	Rendement brut	12.257 €
Rendement net 1€/uN	12.315 €	Rendement net 1€/uN	12.102 €
Rendement net 2€/uN	12.121 €	Rendement net 2€/uN	11.947 €

<sup>32</sup> Dossier UCL 13-44.

Une expérimentation<sup>33</sup> menée par GxABT (GRENeRA) a été valorisée dans le cadre de cette étude.

La plateforme était située à Pipaix, sur un sol limoneux. Le précédent cultural était une céréale paille enlevée. Le conseil de fertilisation moyen (Requasud et PROTECT'eau) était de 141 kg N/ha.

La figure 38 illustre l'impact de la fertilisation azotée sur le rendement financier en prenant l'hypothèse d'une valorisation de la récolte à 100 €/tonne de tubercules.

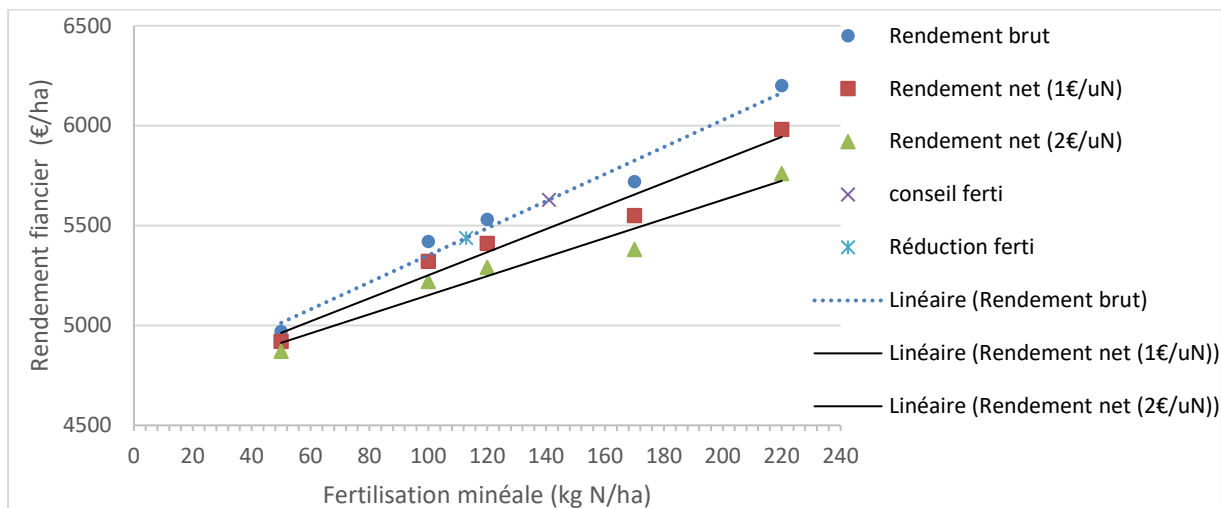


Figure 38. Courbe de réponse du rendement à la fertilisation (Pipaix, 2013).

Dans cette expérimentation, une réduction de 20% de la fertilisation par rapport au conseil moyen a un impact négatif sur les rendements financiers nets (tableau 54 et tableau 55).

Tableau 54. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Pipaix, 2013) (prix 100 €/t).

Conseil ferti moyen (kg N/ha)	141	Réduction -20% ferti	113
Rendement brut	5.629 €	Rendement brut	5.438 €
Rendement net 1€/uN	5.488 €	Rendement net 1€/uN	5.325 €
Rendement net 2€/uN	5.347 €	Rendement net 2€/uN	5.212 €

Tableau 55. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Pipaix, 2013) (prix 200 €/t).

Conseil ferti moyen (kg N/ha)	141	Réduction -20% ferti	113
Rendement brut	11.258 €	Rendement brut	10.876 €
Rendement net 1€/uN	11.117 €	Rendement net 1€/uN	10.763 €
Rendement net 2€/uN	10.976 €	Rendement net 2€/uN	10.650 €

<sup>33</sup> [https://www.gembloux.ulg.ac.be/gp/grenera/Bibliotheque/PROTECTeau/2013/DG13-07\\_Essai\\_ferti\\_pdt.pdf](https://www.gembloux.ulg.ac.be/gp/grenera/Bibliotheque/PROTECTeau/2013/DG13-07_Essai_ferti_pdt.pdf)

## 5.5. Froment

### 5.5.1. Expérimentations 2010

**Tableau 56. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Variété Julius) (prix 160 €/t).**

Rendement (t/ha)	9,634	Rendement (t/ha)	9,624
Conseil ferti (kg N/ha)	185	Réduction -20% ferti	150
Rendement brut	1.541 €	Rendement brut	1.540 €
Rendement net 1€/uN	1.356 €	Rendement net 1€/uN	1.390 €
Rendement net 2€/uN	1.171 €	Rendement net 2€/uN	1.240 €

**Tableau 57. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Variété Julius) (prix 220 €/t).**

Conseil ferti (kg N/ha)	185	Réduction -20% ferti	150
Rendement brut	2.119 €	Rendement brut	2.117 €
Rendement net 1€/uN	1.934 €	Rendement net 1€/uN	1.967 €
Rendement net 2€/uN	1.749 €	Rendement net 2€/uN	1.817 €

**Tableau 58. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Variété Istabraq) (prix 160 €/t).**

Rendement (t/ha)	8,507	Rendement (t/ha)	7,956
Conseil ferti (kg N/ha)	205	Réduction -20% ferti	150
Rendement brut	1.361 €	Rendement brut	1.273 €
Rendement net 1€/uN	1.156 €	Rendement net 1€/uN	1.123 €
Rendement net 2€/uN	951 €	Rendement net 2€/uN	973 €

**Tableau 59. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Variété Istabraq) (prix 220 €/t).**

Conseil ferti (kg N/ha)	205	Réduction -20% ferti	150
Rendement brut	1.872 €	Rendement brut	1.750 €
Rendement net 1€/uN	1.667 €	Rendement net 1€/uN	1.600 €
Rendement net 2€/uN	1.462 €	Rendement net 2€/uN	1.450 €

### 5.5.2. Expérimentations 2012

**Tableau 60. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Variété Ozon) (prix 160 €/t).**

Rendement (t/ha)	8,581	Rendement (t/ha)	8,896
Conseil ferti (kg N/ha)	185	Réduction -20% ferti	150
Rendement brut	1.373 €	Rendement brut	1.423 €
Rendement net 1€/uN	1.188 €	Rendement net 1€/uN	1.273 €
Rendement net 2€/uN	1.003 €	Rendement net 2€/uN	1.123 €

**Tableau 61. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Variété Ozon) (prix 220 €/t).**

Conseil ferti (kg N/ha)	185	Réduction -20% ferti	150
Rendement brut	1.888 €	Rendement brut	1.957 €
Rendement net 1€/uN	1.703 €	Rendement net 1€/uN	1.807 €
Rendement net 2€/uN	1.518 €	Rendement net 2€/uN	1.657 €

**Tableau 62. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Variété Istabraq) (prix 160 €/t).**

Conseil ferti (kg N/ha)	180	Réduction -20% ferti	144
Rendement brut	1.069 €	Rendement brut	1.043 €
Rendement net 1€/uN	889 €	Rendement net 1€/uN	899 €
Rendement net 2€/uN	709 €	Rendement net 2€/uN	755 €

**Tableau 63. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Variété Istabraq) (prix 220 €/t).**

Conseil ferti (kg N/ha)	180	Réduction -20% ferti	144
Rendement brut	1.469 €	Rendement brut	1.435 €
Rendement net 1€/uN	1.289 €	Rendement net 1€/uN	1.291 €
Rendement net 2€/uN	1.109 €	Rendement net 2€/uN	1.147 €

### 5.5.3. Expérimentation 2013

**Tableau 64. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Variété Ozon) (prix 160 €/t).**

Rendement (t/ha)	11,083	Rendement (t/ha)	11,079
Conseil ferti (kg N/ha)	185	Réduction -20% ferti	150
Rendement brut	1.773 €	Rendement brut	1.773 €
Rendement net 1€/uN	1.588 €	Rendement net 1€/uN	1.623 €
Rendement net 2€/uN	1.403 €	Rendement net 2€/uN	1.473 €

**Tableau 65. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Variété Ozon) (prix 220 €/t).**

Conseil ferti (kg N/ha)	185	Réduction -20% ferti	150
Rendement brut	2.438 €	Rendement brut	2.437 €
Rendement net 1€/uN	2.253 €	Rendement net 1€/uN	2.287 €
Rendement net 2€/uN	2.068 €	Rendement net 2€/uN	2.137 €

### 5.5.4. Expérimentation 2014

**Tableau 66. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Variété Ozon) (prix 160 €/t).**

Rendement (t/ha)	11,271	Rendement (t/ha)	10,945
Conseil ferti (kg N/ha)	185	Réduction -20% ferti	150
Rendement brut	1.803 €	Rendement brut	1.751 €
Rendement net 1€/uN	1.618 €	Rendement net 1€/uN	1.601 €
Rendement net 2€/uN	1.433 €	Rendement net 2€/uN	1.451 €

**Tableau 67. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Variété Ozon) (prix 220 €/t).**

Conseil ferti (kg N/ha)	185	Réduction -20% ferti	150
Rendement brut	2.480 €	Rendement brut	2.408 €
Rendement net 1€/uN	2.295 €	Rendement net 1€/uN	2.258 €
Rendement net 2€/uN	2.110 €	Rendement net 2€/uN	2.108 €

### 5.5.5. Expérimentation 2015

**Tableau 68. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Variété Mentor) (prix 160 €/t).**

Rendement (t/ha)	9,702	Rendement (t/ha)	8,468
Conseil ferti (kg N/ha)	185	Réduction -20% ferti	150
Rendement brut	1.552 €	Rendement brut	1.355 €
Rendement net 1€/uN	1.367 €	Rendement net 1€/uN	1.205 €
Rendement net 2€/uN	1.182 €	Rendement net 2€/uN	1.055 €

**Tableau 69. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Variété Mentor) (prix 220 €/t).**

Conseil ferti (kg N/ha)	185	Réduction -20% ferti	150
Rendement brut	2.134 €	Rendement brut	1.863 €
Rendement net 1€/uN	1.949 €	Rendement net 1€/uN	1.713 €
Rendement net 2€/uN	1.764 €	Rendement net 2€/uN	1.563 €

### 5.5.6. Expérimentation 2016

**Tableau 70. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Variété Mentor) (prix 160 €/t).**

Conseil ferti (kg N/ha)	180	Réduction -20% ferti	144
Rendement brut	1.480 €	Rendement brut	1.418 €
Rendement net 1€/uN	1.300 €	Rendement net 1€/uN	1.274 €
Rendement net 2€/uN	1.120 €	Rendement net 2€/uN	1.130 €

**Tableau 71. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Variété Mentor) (prix 220 €/t).**

Conseil ferti (kg N/ha)	180	Réduction -20% ferti	144
Rendement brut	2.034 €	Rendement brut	1.950 €
Rendement net 1€/uN	1.854 €	Rendement net 1€/uN	1.806 €
Rendement net 2€/uN	1.674 €	Rendement net 2€/uN	1.662 €

### 5.5.7. Expérimentation 2017

**Tableau 72. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Variété Mentor) (prix 160 €/t).**

Rendement (t/ha)	11,729	Rendement (t/ha)	10,777
Conseil ferti (kg N/ha)	180	Réduction -20% ferti	155
Rendement brut	1.877 €	Rendement brut	1.724 €
Rendement net 1€/uN	1.697 €	Rendement net 1€/uN	1.569 €
Rendement net 2€/uN	1.517 €	Rendement net 2€/uN	1.414 €

**Tableau 73. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Variété Mentor) (prix 220 €/t).**

Conseil ferti (kg N/ha)	180	Réduction -20% ferti	155
Rendement brut	2.580 €	Rendement brut	2.371 €
Rendement net 1€/uN	2.400 €	Rendement net 1€/uN	2.216 €
Rendement net 2€/uN	2.220 €	Rendement net 2€/uN	2.061 €

### 5.5.8. Expérimentation 2018

**Tableau 74. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Variété Edgar) (prix 160 €/t).**

Conseil ferti (kg N/ha)	180	Réduction -20% ferti	144
Rendement brut	1.765 €	Rendement brut	1.709 €
Rendement net 1€/uN	1.585 €	Rendement net 1€/uN	1.565 €
Rendement net 2€/uN	1.405 €	Rendement net 2€/uN	1.421 €

**Tableau 75. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Variété Edgar) (prix 220 €/t).**

Conseil ferti (kg N/ha)	180	Réduction -20% ferti	144
Rendement brut	2.427 €	Rendement brut	2.350 €
Rendement net 1€/uN	2.247 €	Rendement net 1€/uN	2.206 €
Rendement net 2€/uN	2.067 €	Rendement net 2€/uN	2.062 €

### 5.5.9. Expérimentation 2019

**Tableau 76. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Variété Mentor) (prix 160 €/t).**

Rendement (t/ha)	11,929	Rendement (t/ha)	11,966
Conseil ferti (kg N/ha)	180	Réduction -20% ferti	145
Rendement brut	1.909 €	Rendement brut	1.915 €
Rendement net 1€/uN	1.729 €	Rendement net 1€/uN	1.770 €
Rendement net 2€/uN	1.549 €	Rendement net 2€/uN	1.625 €

**Tableau 77. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Variété Mentor) (prix 220 €/t).**

Conseil ferti (kg N/ha)	180	Réduction -20% ferti	145
Rendement brut	2.624 €	Rendement brut	2.633 €
Rendement net 1€/uN	2.444 €	Rendement net 1€/uN	2.488 €
Rendement net 2€/uN	2.264 €	Rendement net 2€/uN	2.343 €

### 5.5.10. Expérimentations 2020

**Tableau 78. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Variété Chevignon) (prix 160 €/t).**

Rendement (t/ha)	12,920	Rendement (t/ha)	12,77
Conseil ferti (kg N/ha)	180	Réduction -20% ferti	150
Rendement brut	2.067 €	Rendement brut	2.043 €
Rendement net 1€/uN	1.887 €	Rendement net 1€/uN	1.893 €
Rendement net 2€/uN	1.707 €	Rendement net 2€/uN	1.743 €

**Tableau 79. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Variété Chevignon) (prix 220 €/t).**

Conseil ferti (kg N/ha)	180	Réduction -20% ferti	150
Rendement brut	2.842 €	Rendement brut	2.809 €
Rendement net 1€/uN	2.662 €	Rendement net 1€/uN	2.659 €
Rendement net 2€/uN	2.482 €	Rendement net 2€/uN	2.509 €



**Tableau 80. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Variété Mentor) (prix 160 €/t).**

Rendement (t/ha)	12,060	Rendement (t/ha)	12,12
Conseil ferti (kg N/ha)	180	Réduction -20% ferti	150
Rendement brut	1.930 €	Rendement brut	1.939 €
Rendement net 1€/uN	1.750 €	Rendement net 1€/uN	1.789 €
Rendement net 2€/uN	1.570 €	Rendement net 2€/uN	1.639 €

**Tableau 81. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Variété Mentor) (prix 220 €/t).**

Conseil ferti (kg N/ha)	180	Réduction -20% ferti	150
Rendement brut	2.653 €	Rendement brut	2.666 €
Rendement net 1€/uN	2.473 €	Rendement net 1€/uN	2.516 €
Rendement net 2€/uN	2.293 €	Rendement net 2€/uN	2.366 €

### 5.5.11. Expérimentation 2021

**Tableau 82. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Variété Chevignon) (prix 160 €/t).**

Rendement (t/ha)	10,900	Rendement (t/ha)	10,65
Conseil ferti (kg N/ha)	180	Réduction -20% ferti	150
Rendement brut	1.744 €	Rendement brut	1.704 €
Rendement net 1€/uN	1.564 €	Rendement net 1€/uN	1.554 €
Rendement net 2€/uN	1.384 €	Rendement net 2€/uN	1.404 €

**Tableau 83. Impact financier d'une réduction de la fertilisation (Variété Chevignon) (prix 220 €/t).**

Conseil ferti (kg N/ha)	180	Réduction -20% ferti	150
Rendement brut	2.398 €	Rendement brut	2.343 €
Rendement net 1€/uN	2.218 €	Rendement net 1€/uN	2.193 €
Rendement net 2€/uN	2.038 €	Rendement net 2€/uN	2.043 €

# Impact du potentiel de réduction de la fertilisation azotée

*Heens J., Dauby J., Evrard R., Guillaume A., Van den Bossche T.*

*Gembloux Agro-Bio Tech, University of Liege, 5030 Gembloux, Belgium*

## INTRODUCTION

Le changement climatique et la détérioration de l'environnement actuels représentent une menace pour le monde. C'est pourquoi, à son échelle, l'Union Européenne (UE) a décidé d'agir. Le Green Deal est un pacte qu'elle a initié, visant à rendre son économie moderne, efficace dans l'utilisation des ressources et compétitive (European Commission, 2019).

Ce pacte a notamment pour objectif de « réduire l'empreinte environnementale et climatique du système alimentaire de l'UE » tout « en assurant la sécurité alimentaire face au changement climatique et à la perte de biodiversité ». Pour ce faire, des mesures ont été adoptées, visant à réduire les émissions nettes de gaz à effet de serre de 55% d'ici 2030 et totalement pour 2050 (European Commission, 2019).

L'oxyde nitreux ( $N_2O$ ) est un gaz à effet de serre caractérisé par un potentiel d'évolution de la température planétaire (GTP) 284 fois et 298 fois plus important que le  $CO_2$  après respectivement 20 ans et 100 ans. Le Green Deal mène donc une stratégie en faveur de la biodiversité en passant par une réduction de l'impact des intrants dans les systèmes agricoles. En effet, selon le 5<sup>ème</sup> Rapport d'Evaluation du GIEC, 60% des émissions anthropiques de  $N_2O$  sont dues à l'agriculture et environ 13% sont expliqués directement par la fertilisation azotée. De plus, des émissions indirectes sont corrélées à l'agriculture dont 45% sont attribuées au lessivage et ruissellement de l'azote. Ce qui, du point de vue des émissions anthropiques de  $N_2O$ , équivaut à un peu moins de 10% (Stocker (Ed.), 2014 ; Syakila & Kroeze, 2011).

Un engagement a donc été pris en vue de réduire d'au moins 50% les pertes en nutriments tout en veillant à la bonne fertilité des sols. Une application concrète en est la réduction de 20% de l'utilisation d'engrais azoté d'ici 2030 (Schefer, 2020). Cette réduction est d'autant

plus intéressante que la réponse en termes d'émissions à l'augmentation de l'apport en azote (N) est exponentielle. Une réduction de ce dernier diminuerait dès lors plus que proportionnellement les émissions engendrées (Shcherbak et al., 2014). Dans le même sens, le lessivage des nitrates répond de manière exponentielle à l'augmentation des apports en N (Wang et al., 2019).

Toutefois, cette stratégie met l'UE face à un dilemme : « Comment réduire l'utilisation d'intrants dans les systèmes agricoles tout en maintenant le niveau de production nécessaire pour répondre aux besoins de la société ? ». Il est dès lors important de mieux comprendre et quantifier les différents impacts de cette mesure sur la production agricole (Schefer, 2020).

En effet, l'azote joue un rôle important dans le métabolisme des plantes. Il est essentiel à la bonne croissance des cultures. C'est un macronutriment majeur qui limite souvent la croissance des plantes (Hawkesford, 2014). Il est impliqué dans l'efficacité de la photosynthèse par son rôle au niveau de la surface foliaire et dans la chlorophylle. L'assimilation nette de l'N et des carences éventuelles ont également un impact sur le nombre de tiges émis, la capacité des tiges à monter en épis, le nombre d'épillets par épis et leur fertilité. Cela impacte le nombre de grains mis en place par épi et/ou par unité de surface et donc le rendement (Gate, 1995 ; Oscarson, 2000).

Deux aspects complémentaires qui rendent l'optimisation de la gestion du N complexe sont sa forte dépendance aux conditions de sol et aux conditions climatiques intra-annuelles (Basso et al., 2012) et le fait que le choix du moment de l'apport ou de la quantité de N à appliquer sont temporellement découplés des effets qu'ils produiront au terme de la saison sur le rendement (Basso et al., 2011).

L'objectif de ce travail est donc précisément d'étudier, pour la culture de froment d'hiver, l'impact agronomique (rendement), économique (marge brute de l'agriculteur) et environnemental (lessivage, volatilisation) de la réduction de 20% de l'utilisation d'engrais azoté et ce sur base d'une analyse pluriannuelle d'essais de fertilisations.

## 1. MATÉRIEL

### 1.1. Description générale du contexte agronomique

Afin d'améliorer la culture du froment d'hiver en Wallonie, le Centre Pilote Céréales Oléo-Protéagineux (CePiCOP) mène, depuis de nombreuses années, des essais sur différentes modalités de fertilisation du froment d'hiver (*Triticum aestivum* L.), majoritairement à finalité fourragère. Ces essais sont conduits principalement à Lonzée, en Hesbaye, en Belgique.

Cette région est caractérisée par un sol limoneux à drainage naturel majoritairement favorable et un climat tempéré avec annuellement 818 mm de pluie, 9,6°C de température moyenne et une radiation solaire moyenne de 825 J.cm<sup>-2</sup>.jour<sup>-1</sup> (Dumont et al., 2018).

La plupart des essais succède à une culture de betteraves (situation la plus rencontrée en Hesbaye) mais certains ont comme précédent cultural un autre froment d'hiver, des pommes de terre ou exceptionnellement pour l'essai de 2019 avec la variété Mentor, des épinards.

Au cours des dix années sur lesquelles se penche cette étude, les semis ont généralement été réalisés du milieu à la fin du mois d'octobre à une densité de 250 grains.m<sup>-2</sup> (sauf exception pour l'essai Istabraq de 2012 et l'essai Mentor de 2017 avec des densités respectives de 225 grains.m<sup>-2</sup> et de 300 grains.m<sup>-2</sup>). La récolte a eu lieu le plus souvent entre la fin-juillet et la mi-août.

En ce qui concerne les opérations culturales autres que la fertilisation comme le travail du sol (labour), la gestion des bio-agresseurs ou encore l'application éventuelle de régulateur de croissance, les cultures ont bénéficié d'une gestion uniforme à l'échelle de la parcelle.

### 1.2. Protocoles expérimentaux

#### 1.2.1. Gestion de la fertilisation azotée

En Wallonie, la fertilisation azotée se fait traditionnellement en trois fractions égales avec comme valeur de référence 180 kg N.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>. La première dose est généralement appliquée en sortie

d'hiver au moment du tallage, autour des stades Zadok 23-25, la seconde aux alentours du stade redressement/premier nœud, vers le stade Zadok 30, et la troisième lorsque la dernière feuille est étalée, soit au stade Zadok 39 (Zadoks et al., 1974). Cependant, il est déjà apparu que ce modèle se voie modifié dans différentes situations propres à une année ou à un contexte pédoclimatique donné. En effet, des applications en deux fractions ont déjà été réalisées, avec un apport entre le moment du tallage et du redressement et un second au stade Zadok 39.

### 1.3. Implémentation des essais

Depuis de nombreuses années, la réponse du froment d'hiver à différentes fumures et à divers schémas de fractionnement de ces dernières est étudiée pour chaque saison par le Centre Pilote Céréales Oléo-Protéagineux (CePiCOP) et l'ULiège-GxABT. Un exemple de protocole est illustré en annexe pour la saison culturale 2018 (Annexe 1). Au cours de ces dix dernières années, les différents modèles de fertilisation ont pu être étudiés. Chaque modalité de fertilisation a été répétée quatre fois au sein de micro-parcelles disposées en blocs aléatoires complets pour contrer l'hétérogénéité liée à la parcelle et garantir l'obtention de données non biaisées.

## 2. MÉTHODES

### 2.1. Aspect agronomique

#### 2.1.1. Analyse globale

L'étude de l'impact agronomique de la réduction de la fertilisation azotée a débuté par une représentation graphique du rendement en fonction de l'apport d'engrais azoté en se basant sur l'ensemble des données pour observer d'éventuelles tendances générales.

Afin de mieux comprendre les facteurs influençant le rendement, la méthode de représentation de Kaya-Porter a été utilisée (Porter et Christensen, 2013). Les différents facteurs d'influence ont été justifiés par la littérature.

#### 2.1.2. Analyse spécifique

Un tri des données a été effectué afin de regrouper celles dont la fertilisation est réalisée en trois apports, les données pour les fertilisations en deux apports étant trop peu nombreuses. Sur base de ce jeu de données, une étude des corrélations entre les différents apports, le rendement ainsi que ses composantes a été réalisée deux à deux.

Sur base de ces corrélations, un modèle a été créé afin de proposer, d'une part, une synthèse des résultats des essais de fertilisation en trois apports sur les dix dernières années et, d'autre part, un modèle visant à conseiller la fertilisation azotée réduite de 20%.

La construction de ce modèle a nécessité la normalisation des données afin de gommer les effets années et variétaux. Cette normalisation a été effectuée selon la formule suivante :

$$\text{Rendement normalisé}_n = \frac{\text{rendement}_n - \text{rendement minimum}_n}{\text{rendement maximum}_n - \text{rendement minimum}_n}$$

avec  $n$  = l'année considérée pour une variété donnée.

Ainsi, chaque valeur de rendement varie entre 0 et 1, représentant respectivement le rendement le plus bas et le plus haut obtenu pour une année et une variété données.

Deux surfaces de réponses ont été créées sur base du modèle et de l'étude des corrélations, celles-ci afin d'apporter une approche plus visuelle quant à l'impact des différents apports azotés sur le rendement. De plus, en s'appuyant sur l'apport de référence de 180 kg N.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>, la diminution de 20% équivaut à un apport de 144 kg N.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>. C'est sur ce dernier que l'analyse des surfaces de réponses s'est portée.

## 2.2. Aspect économique

Pour analyser l'impact économique d'une réduction de 20% des apports d'azote sur le froment d'hiver en Belgique, les essais de fertilisation de trois années ont été ciblés. Pour chacune des trois années, une seule variété a été retenue. 2018, avec la variété Edgar, a été retenue comme étant une année favorable pour les rendements. À l'inverse, 2012, avec la variété Istabraq, a été considérée comme une année moins favorable avec des rendements plus faibles. 2016, avec la variété Mentor, a été retenue comme une année intermédiaire. Le choix de se focaliser sur trois années de la sorte a été réalisé suite à la grande variation de rendement observée entre 2010 et 2019 dans les essais du CePiCOP.

Le rendement exprimé en fonction de l'apport azoté total a été approché par une régression quadratique pour chacune des trois années afin de modéliser la relation entre ces deux variables. Sur base de ces équations de régression, le rendement a été simulé pour un apport azoté total de 180 et 144 kg N.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>. La différence dite "brute" entre les rendements simulés a été calculée pour les trois années comme la différence entre le rendement simulé pour l'apport

total de 180 kg d'N et le rendement simulé pour un apport total de 144 kg d'N.

Pour calculer la différence nette de rendement, la différence d'apport azoté, exprimée en équivalent en kg de froment, a été soustraite de la différence brute. Pour exprimer la différence d'apport azoté en kg de froment, trois ratios de conversion (4, 6 et 8) ont été utilisés. Ces ratios se basent sur le prix de l'ammonitrate 27% et celui du froment, selon la formule suivante :

$$\frac{\text{Prix de vente de l'ammonitrate } 27\% / 27}{\text{Prix de vente du froment}}$$

Plus ce ratio augmente et plus le prix de l'ammonitrate est élevé par rapport au prix de vente du froment. Ces trois ratios ont été choisis car ils correspondent à ce qui a pu être observé durant les dix dernières années en termes de prix de vente de froment et de prix d'achat de l'azote.

## 2.3. Aspect environnemental

### 2.3.1. Emissions directes de N<sub>2</sub>O

Les valeurs d'émissions décrites en introduction sont basées sur la méthode de Mosier et al. (1998) dont la formule estimant les émissions directes de N<sub>2</sub>O provenant des terres agricoles a été revue par Syakila & Kroeze (2011). Cette formule modifiée se base sur l'addition de quatre variables multipliées par un facteur d'émissions qui est celui pour les émissions directes du sol (EF<sub>1</sub>). Ce dernier est défini selon la relation linéaire 100/1 entre l'apport d'engrais azoté et les émissions de N<sub>2</sub>O.

Cependant, Shcherbak et al. (2014) ont apporté des preuves que cette relation est plutôt exponentielle et définie comme telle :

$$Emis = 0,001N(6,49 + 0,0187N)$$

avec  $Emis$  = émissions de N<sub>2</sub>O [kg N<sub>2</sub>O-N ha<sup>-1</sup>] et  $N$  = apport d'engrais azoté [kg N.ha<sup>-1</sup>]. C'est cette équation qui a été utilisée dans le cadre de cette étude pour mesurer l'impact environnemental de la diminution de la fertilisation de 20%.

Une simulation d'apport azoté allant de 0 à 240 kg N.ha<sup>-1</sup> a été réalisée par pas de 12 kg N.ha<sup>-1</sup> afin d'effectuer une analyse statistique de type ANOVA et une structuration des moyennes avec le test de Student-Newman-Keuls.

### 2.3.2. Lessivage de l'azote

Tout comme pour les émissions directes, les valeurs des émissions indirectes sont obtenues sur base de la méthode de Mosier et al. (1998) dont le facteur d'émission pour les émissions de N<sub>2</sub>O dues au lessivage et au ruissellement de l'azote (EF<sub>5</sub>) s'est vu modifié par Syakila & Kroeze (2011) et basé sur celui des lignes directrices du GIEC de 2006 (Eggleton et al., 2006). La formule utilisée se base sur l'addition de quatre variables, multipliée par deux facteurs que sont l'EF<sub>5</sub> et la proportion d'azote apportée par la fertilisation qui a été lessivée (Fra<sub>CLEACH-(H)</sub>). Ce dernier est défini comme constant et s'élève à 30%.

Cependant, Wang et al. (2019) ont apporté des preuves que cette proportion suit plutôt une relation exponentielle et est définie comme telle :

$$ER = 0,01N(2,84 + 0,030N)$$

avec  $ER$  = taux de nitrates lessivé [kg NO<sub>3</sub>-N ha<sup>-1</sup>] et  $N$  = apport d'engrais azoté [kg N.ha<sup>-1</sup>]. C'est cette équation qui a été utilisée dans le cadre de cette étude pour mesurer la proportion d'azote lessivé.

Une simulation d'apport azoté allant de 0 à 240 kg N.ha<sup>-1</sup> a été réalisée par pas de 12 kg N.ha<sup>-1</sup> afin d'effectuer une analyse statistique de type ANOVA et une structuration des moyennes avec le test de Student-Newman-Keuls.

## 3. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

### 3.1. Impact agronomique

#### 3.1.1. Facteurs d'influence du rendement

À partir du graphique exprimant le rendement (Yield) en fonction de l'apport d'engrais azoté (N apply) (Figure 1, quadrant n°2), il n'est pas possible d'émettre de conclusion exclusivement liée à la réduction de la fertilisation azotée, passant de 180 à 144 kg N.ha<sup>-1</sup>. En effet, de nombreux facteurs tels que le reliquat azoté présent dans le sol des différentes parcelles, le précédent cultural, la génétique de la variété cultivée ou encore les variations climatiques liées aux différentes saisons culturales ont également un impact sur le rendement.

Pour mieux comprendre les rendements, les quatre graphiques basés sur le modèle Kaya-Porter et réalisés sur base des données du CePiCOP (Figure 1) montrent les relations entre le rendement (Yield), l'N absorbé (N uptake), l'N présent dans le sol (N soil) et l'N amené par la fertilisation (N apply). Ils mettent en avant que plus "N uptake" est important plus le rendement l'est également. Or, plus "N soil" est élevé, plus "N uptake"

est important. Pour finir, il est logique que plus "N apply" est important, plus "N soil" est élevé.

Ces différentes composantes conditionnant le rendement sont influencées par les facteurs précédemment cités. Alors, bien qu'aucun n'ait pu être étudié indépendamment par manque de modalités lors des essais, ceux-ci n'ayant pas été menés dans cet objectif, la littérature permet d'expliquer l'influence des plus importants.

Le reliquat azoté et le choix variétal, deux facteurs ayant un impact majeur sur le rendement, sont conditionnés par le précédent cultural. Ivanova et al. (2007) ont démontré l'impact de ce dernier sur le nombre de grains et, dans une moindre mesure, sur le poids de 1000 grains et donc sur le rendement également.

En effet, selon l'espèce cultivée, les stocks d'azote présents dans les sols à l'issue de la culture sont différents. Dès lors, la quantité d'azote initialement disponible pour la culture suivante n'est pas identique. Par exemple, à l'issue d'une culture de pommes de terre, les quantités d'azote minéral de 0 à 150 cm de profondeur sont supérieures aux quantités retrouvées après une culture de betterave (Herman et al., 2002). Les données de la variété Edgar cultivée en 2018 à la suite d'une culture de pommes de terre semblent effectivement montrer des rendements plus importants que la variété KWS Ozon en 2011.

D'autre part, le précédent cultural est un facteur important à prendre en compte dans le choix variétal, compte tenu des différences de pression des maladies et ravageurs exercée selon l'espèce précédemment cultivée. Par exemple, la culture d'un froment succédant à un autre froment nécessite l'utilisation d'une variété plus résistante envers les différents agents pathogènes et insectes ravageurs propres à cette espèce. En effet, la variété Istabraq implantée en 2012 avait pour précédent cultural un froment d'hiver. Cette situation pourrait expliquer le caractère très faible du rendement observé pour cette année-là avec cette variété. L'influence du choix variétal sur le poids de 1000 grains a également été démontrée par Ivanova et al. (2007).

#### 3.1.2. Corrélations

La réduction de 20% d'utilisation d'engrais azotés dans la production des céréales doit résulter d'un raisonnement intégrant les variables agronomiques et leur impact sur le rendement. La densité des épis et de grains par unité de surface sont les principaux composants à maximiser afin de préserver un bon rendement. Sans un certain nombre de grains par m<sup>2</sup>, la capacité photosynthétique excéderait la capacité de

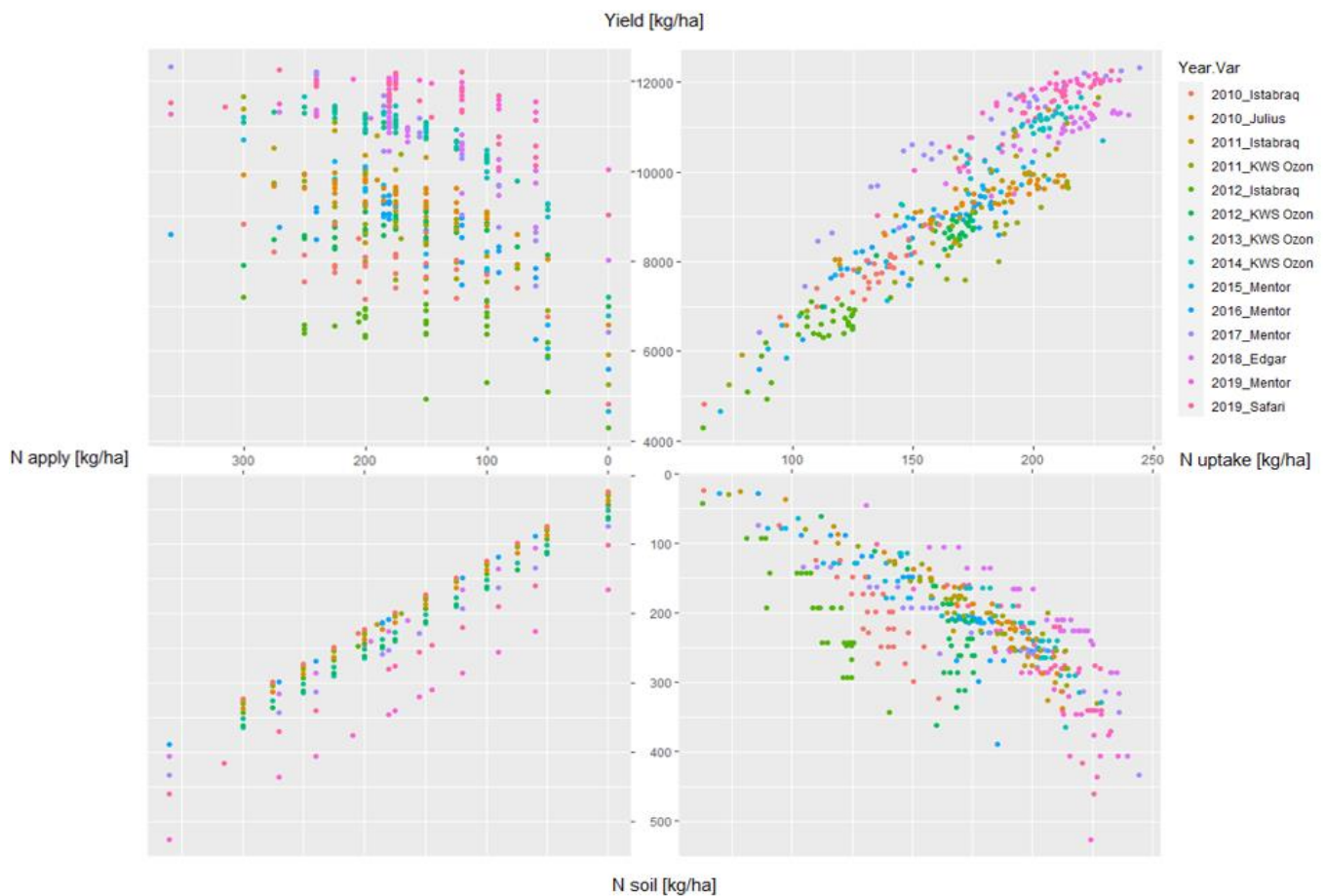


Figure 1 - Représentation visuelle à quatre quadrants des processus impliqués dans l'efficacité de l'utilisation des nutriments (NUE).

remplissage, le rendement ne serait donc pas optimal (Reynolds, 1996).

Une autre composante intervenant dans la création du rendement est le poids de mille grains (PMG). Celle-ci, ainsi que celle du nombre de grains par m<sup>2</sup> (Grains\_sqm), est reprise dans l'étude de corrélation présentée dans le tableau 1. Il en ressort une corrélation très hautement significative entre le rendement et Grains\_sqm, avec comme valeur 0,74. La corrélation entre rendement et PMG est également hautement significative mais pour une valeur de 0,28 seulement. Cela traduit l'importance de maximiser le nombre de grains au m<sup>2</sup>, plus que le PMG, afin d'atteindre des rendements élevés. De plus, la corrélation entre Grains\_sqm et PMG est également très hautement significative mais négative (-0,43). La conclusion de ceci est que l'augmentation du nombre de grains par m<sup>2</sup> semble faire diminuer le PMG et vice-versa. Ainsi, logiquement, plus il y a de grains, moins ceux-ci sont denses.

Tableau 1 – Corrélation entre rendements et ses composantes

	Rendement	Grains_sqm	PMG
Rendement	1	0,74***	0,28***
Grains_sqm		1	-0,43***
PMG			1

Suite à l'existence de corrélations entre le rendement et ces composantes (Tableau 1), il semble pertinent d'évaluer l'impact des différentes fractions azotées sur ces dernières. L'étude de corrélation indique clairement qu'aucune corrélation significative n'existe entre le PMG et les différentes fractions, c'est pourquoi celui-ci n'est pas affiché dans le tableau 2. Cela étant, une corrélation très hautement significative existe entre les deux premières fractions (N<sub>Z 23-25</sub> et N<sub>Z 30</sub>) et le rendement et Grains\_sqm tandis qu'elle n'est que simplement significative avec la dernière fraction (N<sub>Z 39</sub>) (Tableau 2). Cela met en avant l'importance qu'ont les deux premières fractions sur le rendement.

Tableau 2 – Corrélation entre les fractions azotées et le rendement et le nombre de grains au m<sup>2</sup>

	Rendement	Grains_sqm
N <sub>Z 23-25</sub>	0,31***	0,35***
N <sub>Z 30</sub>	0,29***	0,33***
N <sub>Z 39</sub>	0,12*	0,15*

Toutefois, le taux de protéine dans le grain, définissant sa qualité, est corrélé de manière très hautement significative avec les trois fractions azotées mais de manière plus importante avec la dernière (0,65 pour  $N_z_{39}$  tandis que 0,31 et 0,40 pour  $N_z_{23-25}$  et  $N_z_{30}$  respectivement). Le 3<sup>ème</sup> apport azoté a donc une importance non négligeable si le blé cultivé est à finalité biscuitière. Cela étant, ce débouché est rare dans le contexte wallon.

### 3.1.3. Surfaces de réponse

La première surface de réponse se base sur un modèle intégrant deux variables : la quantité d'azote apportée aux deux premières fractions ( $N_z_{23-25} + z_{30}$ ) et celle apportée en dernière fraction ( $N_z_{39}$ ). Le choix de sommer les deux premières fractions s'explique par leurs valeurs de corrélation avec le rendement décrites plus haut et quasi similaires.

De plus, les différentes courbes présentes sur la surface de réponse s'expriment en termes de rendement relatif, c'est-à-dire qu'elles indiquent une valeur de rendement entre 0 et 100, étant respectivement le rendement minimum obtenu sans application d'azote et le rendement maximum pour une application azotée optimale (Figure 2). La droite de couleur rouge indique la limite d'apport azoté à ne pas dépasser, qui est donc 144 kg N.ha<sup>-1</sup>. Ainsi, sur base de cette surface de réponse et de cette droite, le fractionnement optimal permettant d'atteindre le plus haut rendement relatif est de 122,73 kg N.ha<sup>-1</sup> pour les deux premières fractions ensemble et 21,27 kg N.ha<sup>-1</sup> pour la dernière. Ce rendement relatif étant alors de 83,09%, en comparant avec un apport de 180 kg N.ha<sup>-1</sup> (en trois apports équivalents), cela amène à une diminution de rendement relatif de 7,39%.

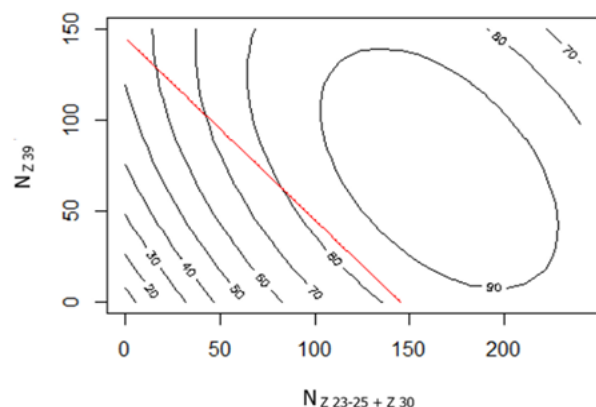


Figure 2 – Surface de réponse exprimant l'impact de  $N_z_{23-25} + z_{30}$  et  $N_z_{39}$  sur le rendement

L'équation de cette première surface de réponse est décrite en annexe (Annexe 2). Elle se justifie d'une part, par l'indicateur de qualité ( $R^2$  ajusté) qui vaut 0,8074 et d'autre part, par sa p-valeur très hautement significative ( $< 2.2e-16$ ).

Ayant obtenu une valeur optimale théorique pour la somme des deux premières fractions, une deuxième surface de réponse a été créée pour distinguer des valeurs respectives à celles-ci (Figure 3). En effet, il semble judicieux de les quantifier afin d'avoir une valeur optimale distincte pour les trois fractions. La ligne rouge indique ici la valeur optimale d'apport azoté à ne pas dépasser pour ces deux fractions (122,73 kg N.ha<sup>-1</sup>).

Sur base de cette surface de réponse et de cette droite, il semble qu'il n'y ait quasi aucune différence entre les deux fractions en termes d'impact sur le rendement. Dans une optique de minimisation des émissions de  $N_2O$ , le fractionnement dit "50/50" semble idéal. Ainsi, un peu plus de 60 kg N.ha<sup>-1</sup> peut être supposé optimal pour  $N_z_{23-25}$ , de même pour  $N_z_{30}$ .

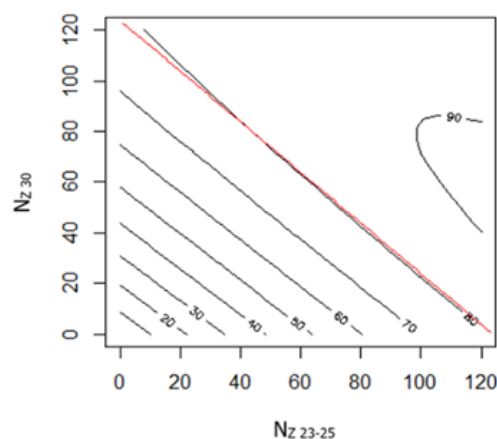


Figure 3 – Surface de réponse exprimant l'impact de  $N_z_{23-25}$  et  $N_z_{30}$  sur le rendement

L'équation de cette deuxième surface de réponse est décrite en annexe (Annexe 3). Elle se justifie d'une part, par l'indicateur de qualité ( $R^2$  ajusté) qui vaut 0,8866 et d'autre part, par sa p-valeur très hautement significative ( $< 2.2e-16$ ).

### 3.2. Impact économique

La régression quadratique permet d'approximer correctement le rendement en fonction de l'apport azoté total pour Mentor 2018 et Edgar 2016 avec un  $R^2$  ajusté respectif de 0,8316 et 0,7856. Il en est autrement pour Istabraq 2012 pour laquelle le  $R^2$  ajusté est bien plus faible (0,3715). Cette différence pourrait être expliquée par de nombreuses variables comme discuté précédemment. Cependant, le modèle quadratique a été conservé pour évaluer les trois années de la même manière. L'apport azoté total a, dans les trois cas de figure, une influence significative sur le rendement avec des p-valeurs inférieure à 0,005 (Annexe 4).

Le tableau 3 montre que la différence de rendement est la plus élevée pour l'année 2016 qui est considérée

comme une année intermédiaire, entre une bonne et une mauvaise année en termes de rendements. Ceci semble logique puisque on peut supposer que d'autres facteurs comme le précédent cultural ou les conditions climatiques ont eu moins d'influence sur le rendement que durant une bonne ou une mauvaise année où un rendement particulièrement élevé ou faible serait plutôt favorisé par ces facteurs. La différence de rendement la plus élevée survient lors d'une année médiane, en l'occurrence Mentor 2016, lorsque 1 kg d'N correspond à 4 kg de froment en termes de prix, c'est-à-dire quand le prix de l'ammonitrate 27% est proche du prix de vente du froment. Plus le prix d'achat

	Edgar 2018	Mentor 2016	Istabraq 2012
Rendement N180 kg/ha	11031	9247	6679
Rendement N144 kg/ha	10681	8863	6521
Différence Rendement N180-N144 kg/ha	350	384	158
Différence nette avec 1 kg N = 4 kg de froment	206	240	14
Différence nette avec 1 kg N = 6 kg de froment	134	168	-58
Différence nette avec 1 kg N = 8 kg de froment	62	96	-130

de l'ammonitrate 27% est élevé par rapport au prix de vente du froment, plus cette différence est faible.

**Tableau 3** - Rendements simulés pour un apport total de 180 et 144 ainsi que les différences entre ces rendements selon trois facteurs de conversion de kg d'N en kg de froment.

La différence devient même négative pour Istabraq 2012 avec des kg d'N valant 6 et 8 kg de froment. Selon la simulation, lorsque le prix de l'azote est élevé par rapport au prix de vente du froment et que l'année est considérée mauvaise en termes de rendement, il devient même intéressant de réduire l'apport azoté total de 20%. Cependant, dans les autres cas la différence est positive et donc le manque à gagner pour l'agriculteur dépendra du prix de vente de son froment.

Ainsi, pour donner un exemple concret, pour l'année médiane (Mentor 2016) où 1 kg d'N vaut 6 kg de froment (avec un prix de vente du froment de 160€/t et le prix de l'ammonitrate 27% de 260 €/t), le manque à gagner pour l'agriculteur serait de 26,88 €/ha.

Dans ce travail, l'impact d'une diminution de 20 % de l'apport azoté sur les qualités technologiques du grain n'a pas été pris en compte. Une possible différence de valorisation du grain suite à une diminution de la qualité de celui-ci n'a pas non plus été prise en compte pour calculer l'impact économique.

### 3.3. Impact environnemental

#### 3.3.1. Emissions directes de N<sub>2</sub>O

Le test SNK montre une différence d'émissions de N<sub>2</sub>O significative entre un apport de 180 kg N.ha<sup>-1</sup> et de 144 kg N.ha<sup>-1</sup>. Dans ce cas, l'apport total a été considéré sans prendre en compte son fractionnement. Ce fractionnement, typique de la culture de blé tendre d'hiver *Triticum aestivum*, ne montrerait aucune différence d'émissions sur base de Syakila & Kroeze (2011). Cependant, avec l'équation de Shcherbak et al. (2014), le fractionnement influence les valeurs des émissions. En effet, en considérant un fractionnement en 3 apports de 60 kg N.ha<sup>-1</sup>, les émissions de N<sub>2</sub>O s'élèvent à 1,37 kg N<sub>2</sub>O-N ha<sup>-1</sup> tandis qu'elles s'élèvent à 1,77 sans cette considération. Dans le cas d'un apport total de 144 kg N .ha<sup>-1</sup> fractionné en 3 apports de 60, 60 et 24 kg N.ha<sup>-1</sup>, les émissions ne s'élèvent pas à 1,32 mais à 0,79 kg N<sub>2</sub>O-N ha<sup>-1</sup>. Sur base de ces nouvelles valeurs, la conclusion du test SNK reste identique entre un apport à 180 et à 144 kg N.ha<sup>-1</sup>.

#### 3.3.2. Lessivage de l'azote

Le test SNK ne montre aucune différence significative entre un apport non fractionné à 180 et à 144 kg N.ha<sup>-1</sup>. Cependant, en utilisant l'équation de Wang et al. (2019), le fractionnement influence les valeurs de l'azote lessivé. En effet, en considérant un fractionnement en trois apports de 60 kg N.ha<sup>-1</sup> chacun, les pertes d'azote par lessivage s'élèvent à 8,35 kg NO<sub>3</sub>-N ha<sup>-1</sup> tandis qu'elles s'élèvent à 14,83 sans cette considération. Dans le cas d'un apport total de 144 kg N.ha<sup>-1</sup> fractionné en 3 apports de 60, 60 et 24 kg N.ha<sup>-1</sup>, l'azote lessivé ne s'élève pas à 10,31 mais à 6,42 kg NO<sub>3</sub>-N ha<sup>-1</sup>. Sur base de cela, la conclusion du test SNK reste identique.

## CONCLUSION ET PERSPECTIVE

L'impact environnemental est significatif du point de vue des émissions de N<sub>2</sub>O, ce qui tend à démontrer que l'objectif du Green Deal de diminuer l'apport azoté de 20% est pertinent pour la culture du froment d'hiver. De plus, il en ressort des avantages économiques lorsque le prix d'achat de l'azote est élevé et que l'année est considérée comme mauvaise en termes de rendements. A l'inverse et dans la majorité des cas, l'agriculteur voit son revenu baisser et ce d'autant plus si le prix de l'azote est faible et le prix du froment élevé. Cependant, ces conclusions économiques, basées sur des apports azotés totaux, pourraient être revues en considérant le fractionnement. Ce dernier est optimisé en diminuant la dernière fraction de manière plus importante que les deux premières, celles-ci conditionnant majoritairement le rendement.



## BIBLIOGRAPHIE

- Basso B., Ritchie J.T., Cammarano D. & Sartori L., 2011. A strategic and tactical management approach to select optimal N fertilizer rates for wheat in a spatially variable field. *European Journal of Agronomy* **35**(4), 215–222, DOI:[10.1016/j.eja.2011.06.004](https://doi.org/10.1016/j.eja.2011.06.004).
- Basso B., Sartori L., Cammarano D., Fiorentino C., Grace P.R., Fountas S. & Sorensen C.A., 2012. Environmental and economic evaluation of N fertilizer rates in a maize crop in Italy: A spatial and temporal analysis using crop models. *Biosystems Engineering* **113**(2), 103–111, DOI:[10.1016/j.biosystemseng.2012.06.012](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.06.012).
- Dumont B., Basso B., Destain J.-P., Meza Morales W. & Bodson B., 2018. Développement d'un système d'aide à la décision multicritère pour l'optimisation de la fertilisation azotée. *PHLOEME. 1ères biennales de l'innovation céréalière* 9.
- Eggleston H.S., Intergovernmental Panel on Climate Change, National Greenhouse Gas Inventories Programme, & Chikyū Kankyō Senryaku Kenkyū Kikan, 2006. *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*.
- European Commission, 2019. COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE EUROPEAN COUNCIL, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS The European Green Deal.
- Gate P., 1995. *Ecophysiologie du Blé : de la plante à la culture*, Tec & Doc Lavoisier : ITCF, Paris.
- Hawkesford M.J., 2014. Reducing the reliance on nitrogen fertilizer for wheat production. *Journal of Cereal Science, Cereal Science for Food Security, Nutrition and Sustainability* **59**(3), 276–283, DOI:[10.1016/j.jcs.2013.12.001](https://doi.org/10.1016/j.jcs.2013.12.001).
- Herman J.L., Destain J.-P., Goffart J.P., Bodson B., Vancutsem F., Couvreur L. & Grévy L., 2001. L'azote minéral du sol en 2000-2001 sous froment d'hiver. *Livre Blanc "Céréales" F.U.S.A. et C.R.A. Gembloux - Février 2001* 4.
- Ivanova A., Nankova M. & Tsenov N., n.d. Effect of previous crop, mineral fertilization and environment on the characters of some wheat varieties. *Bulgarian Journal of Agricultural Science* **13**, 55–62.
- Mosier A., Kroeze C., Nevison C., Oenema O., Seitzinger S. & van Cleemput O., 1998. Closing the global N<sub>2</sub>O budget: nitrous oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **52**(2/3), 225–248, DOI:[10.1023/A:1009740530221](https://doi.org/10.1023/A:1009740530221).
- Oscarson P., 2000. The strategy of the wheat plant in acclimating growth and grain production to nitrogen availability. *Journal of Experimental Botany* **51**(352), 1921–1929, DOI:[10.1093/jexbot/51.352.1921](https://doi.org/10.1093/jexbot/51.352.1921).
- Porter J.R. & Christensen S., 2013. Deconstructing crop processes and models via identities: Crop models for climate change. *Plant Cell Environ* n/a-n/a, DOI:[10.1111/pce.12107](https://doi.org/10.1111/pce.12107).
- Reynolds M.P., Rajaram S., McNab A., & International Maize and Wheat Improvement Center, 1996. *Increasing yield potential in wheat: breaking the barriers : proceedings of a workshop held in Ciudad Obregon, Sonora, Mexico*, CIMMYT, Mexico, D.F.
- Schefer G., 2020. What role for R&I in reducing the dependency on pesticides and fertilising products in the EU agriculture?
- Shcherbak I., Millar N. & Robertson G.P., 2014. Global metaanalysis of the nonlinear response of soil nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) emissions to fertilizer nitrogen. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **111**(25), 9199–9204, DOI:[10.1073/pnas.1322434111](https://doi.org/10.1073/pnas.1322434111).
- Stocker T. (Ed.), 2014. *Climate change 2013: the physical science basis: Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, New York, 1535.
- Syakila A. & Kroeze C., 2011. The global nitrous oxide budget revisited. *Greenhouse Gas Measurement and Management* **1**(1), 17–26, DOI:[10.3763/ghgmm.2010.0007](https://doi.org/10.3763/ghgmm.2010.0007).
- Wang Y., Ying H., Yin Y., Zheng H. & Cui Z., 2019. Estimating soil nitrate leaching of nitrogen fertilizer from global meta-analysis. *Science of The Total Environment* **657**, 96–102, DOI:[10.1016/j.scitotenv.2018.12.029](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.029).
- Zadoks J.C., Chang T.T. & Konzak C.F., 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Res* **14**(6), 415–421, DOI:[10.1111/j.1365-3180.1974.tb01084.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1974.tb01084.x).

## ANNEXES

### Annexe 1 - Exemple de protocole expérimental tel que implémenté lors de la saison culturale 2018

Objet	Apport azoté [kg/ha]				Total
	Zadok 23-25	Zadok 25-30	Zadok 30	Zadok 39	
1	-	-	-	-	0
2	-	-	-	60	60
3	-	-	60	-	60
4	60	-	-	-	60
5	-	-	60	60	120
6	60	-	-	60	120
7	60	-	60	-	120
8	60	-	60	60	180
9	-	-	-	90	90
10	-	-	90	-	90
11	90	-	-	-	90
12	-	-	90	90	180
13	90	-	-	90	180
14	90	-	90	-	180
15	90	-	90	90	270
16	-	-	-	120	120
17	-	-	120	-	120
18	120	-	-	-	120
19	-	-	120	120	240
20	120	-	-	120	240
21	120	-	120	-	240
22	120	-	120	120	360
23	30	-	90	60	180
24	30	-	60	90	180
25	90	-	30	0	120
26	90	-	60	30	180
27	80	-	40	80	200
28	80	-	40	60	180
32	60	-	50	55	165
33	-	80	-	85	165

### Annexe 2 - Equation pour la première surface de réponse

$$Rendement_{relatif} = a + b \times N_{Z23-25+Z30} + c \times N_{Z39} + d \times (N_{Z23-25+Z30} \times N_{Z39}) + e N_{Z23-25+Z30}^2 + f N_{Z39}^2$$

Avec  $a = 5.79634525$ ,  $b = 0.82972007$ ,  $c = 0.59574711$ ,  $d = -0.0019331$ ,  $e = -0.00207871$  et  $f = -0.00188326$

### Annexe 3 - Equation pour la deuxième surface de réponse

$$Rendement_{relatif} = a + b \times N_{Z23-25} + c \times N_{Z30} + d \times (N_{Z23-25} \times N_{Z30}) + e N_{Z23-25}^2 + f N_{Z30}^2$$

Avec  $a = 1.25541582$ ,  $b = 0.90212412$ ,  $c = 1.03106150$ ,  $d = -0.00520892$ ,  $e = -0.00212253$  et  $f = -0.00327085$

### Annexe 4 - Régression quadratique du rendement en fonction de l'apport azoté total pour Edgar 2018, Mentor 2016 et Istabraq 2012

	Edgar 2018	Mentor 2016	Istabraq 2012
i	8195	5727	4918
a (Coefficient de N)	23,3	30,68	16,54
b (Coefficient de N <sup>2</sup> )	-0,0419	-0,0618	-0,03754
R <sup>2</sup> ajusté	0,8316	0,7856	0,3715
p-valeur	1,37E-11	1,65E-10	7,21E-04