

FERTILISATION EN POMMES DE TERRE

-

**SYNTHESE DES EXPERIMENTATIONS VISANT A
EVALUER L'INTERET D'UNE FERTILISATION
ORGANIQUE VIA UN DIGESTAT DE
BIOMETHANISATION**

De Toffoli Marc⁽¹⁾, Quoilin Guillaume⁽¹⁾, Imbrecht Olivier⁽¹⁾, Bourmanne Guillaume⁽¹⁾, Khalidi Mostafa⁽²⁾, Lambert Richard^(1,3), 2024.

(1) Université catholique de Louvain – Earth and Life Institute – agronomy
Place Croix du Sud, 2 boîte L7.05.26
1348 Louvain-la-Neuve

(2) PROTECT'eau ASBL
Centre de Gembloux
Avenue de Stassart, 14-16
5000 Namur

(3) ASBL Centre de Michamps
Horritine, 3
B-6600 Michamps (Bastogne)

Table des matières

0	INTRODUCTION	3
1	MATERIEL ET METHODE	4
2	RESULTATS ET DISCUSSION	10
2.1	INTERCULTURE.....	10
2.1.1	<i>Biomasse des couverts</i>	<i>10</i>
2.1.2	<i>Effet CIPAN</i>	<i>11</i>
2.2	PRODUCTION DE POMMES DE TERRE	12
2.2.1	<i>Rendement en calibre supérieur à 35mm.....</i>	<i>12</i>
2.2.2	<i>Conseils de fertilisation.....</i>	<i>16</i>
2.2.3	<i>Efficacité du digestat.....</i>	<i>17</i>
2.2.4	<i>Pourcentage de tubercules de calibre supérieur à 50 mm</i>	<i>19</i>
2.2.5	<i>Teneur en matière sèche</i>	<i>21</i>
2.3	RELIQUATS AZOTES.....	23
2.3.1	<i>Reliquats en sortie d'hiver.....</i>	<i>23</i>
2.3.2	<i>Reliquats à la plantation</i>	<i>24</i>
2.3.3	<i>Reliquats en sols nus</i>	<i>25</i>
2.3.4	<i>Reliquats azotés après récolte.....</i>	<i>26</i>
2.4	INTERET ECONOMIQUE	31
3	SYNTHESE ET CONCLUSION	33
3.1.1	<i>Production</i>	<i>33</i>
3.1.2	<i>Impact environnemental</i>	<i>34</i>
3.1.3	<i>Conclusion</i>	<i>35</i>
4	BILIOGRAPHIE	37
5	ANNEXES.....	38
5.1	EXTRAIT BD REQUASUD	38

0 Introduction

Le digestat est une matière organique dont la production est croissante, 880.000 t/an en 2023 (500.000 t/an en 2019), suite à la multiplication des stations de biométhanisation en Wallonie, qui sont passées de 55 unités en 2019 à 63 unités en 2023 (Valbiom 2024). A la demande de PROTECT'eau, l'UCLouvain a mis en place des expérimentations visant à étudier l'utilisation du digestat de biométhanisation en tant que fertilisant de la culture de pommes de terre. L'intérêt de l'étude se situe tant au niveau de la surface concernée (97.000 ha en Belgique, 42.000 ha en Wallonie) qu'au niveau de l'impact sur la qualité de l'eau (classe de culture à risque d'APL élevé).

L'objectif des expérimentations présentées dans ce travail est centré sur la détermination de coefficients d'équivalence azotée du digestat de biométhanisation. L'originalité du travail réside notamment dans la comparaison de deux dates d'application de la fertilisation organique par rapport à un témoin sans apport organique. Des doses croissantes de fertilisation par un engrais azoté minéral sur chaque modalité permettent d'évaluer l'impact des paramètres étudiés sur les facteurs de production et environnementaux.

Les expérimentations ont été menées par l'UCLouvain Earth & Life Institute en collaboration avec des centres d'action de PROTECT'eau (Gembloux et Philippeville) et des agriculteurs utilisant ce type de produits et disposés à participer à cette recherche. Nous les remercions vivement pour leur précieuse participation à la conduite de ces expérimentations.



Photo 1. Épandage de printemps du digestat, avec enfouissement et avant plantation des PDT (Marbisoux, le 5/05/2023)

1 Matériel et méthode

Dispositif expérimental

L'expérimentation vise à évaluer la réponse des facteurs de production de pomme de terre en fonction de la combinaison de deux facteurs : une fertilisation azotée minérale et une fertilisation organique par du digestat de biométhanisation.

Facteur 1 - Fertilisation organique (trois niveaux) :

- Sans digestat
- Digestat de biométhanisation apporté l'été précédant la culture
- Digestat de biométhanisation apporté au printemps

Facteur 2 - Fertilisation azotée minérale (quatre ou cinq niveaux selon l'essai) :

- 0 – 100 – 150 – 200 kg N/ha (Ligny 2019, Marbisoux 2021 et Marbisoux 2023)
- 0 – 60 – 120 – 180 – 230 kg N/ha (Erquelinnes 2021 et Beaumont 2022)

Cependant, en fonction de l'essai, toutes les combinaisons de ces niveaux de facteurs (appelées traitements de l'expérimentation) n'ont pas été testées uniformément (Tableau 1).

A Erquelinnes et à Beaumont, un apport de digestat n'a pas été réalisé en été. Pour ces deux essais, les différents niveaux de fertilisation minérale sont différents des autres essais. Selon les expérimentations, les différents traitements ont été répétés trois ou quatre fois.

Tableau 1. Combinaisons de facteurs testées selon le lieu d'essai

	Ligny 2019	Marbisoux 2021	Erquelinnes 2021	Beaumont 2022	Marbisoux 2023
Fertilisation organique (Facteur 1)	Sans digestat	Sans digestat	Sans digestat	Sans digestat	Sans digestat
	Digestat été	Digestat été			Digestat été
	Digestat printemps	Digestat printemps	Digestat printemps	Digestat printemps	Digestat printemps
Fertilisation minérale (Facteur 2)	0 kg N/ha	0 kg N/ha	0 kg N/ha	0 kg N/ha	0 kg N/ha
	100 kg N/ha	100 kg N/ha	60 kg N/ha	60 kg N/ha	100 kg N/ha
	150 kg N/ha	150 kg N/ha	120 kg N/ha	120 kg N/ha	150 kg N/ha
	200 kg N/ha	200 kg N/ha	180 kg N/ha	180 kg N/ha	200 kg N/ha
			230 kg N/ha	230 kg N/ha	
Réplifications	3	4	3	3	4
Unités expérimentales	36	48	30	30	48

Analyses du digestat

Les digestats utilisés pour fertiliser les parcelles expérimentales ont été analysés avant les applications d'été et de printemps. Les quantités totales d'azote vont de 160 à 230 kg N/ha (Tableau 2) avec des proportions d'azote ammoniacal allant de 46 à 66% (moyenne à 55%). Les quantités appliquées sont en moyenne de 35 m³ (30 à 40 m³ selon les essais). Les analyses réalisées montrent que les matières utilisées ont des teneurs proches des moyennes de la base de données de l'ASBL Requasud qui analyse les produits dans les unités présentes en Wallonie (cf. annexe 5.1 page 38).

Tableau 2. Synthèse des fertilisations organiques via les apports de digestats en été et au printemps

		Ligny 2019	Marbisoux 2021	Erquelines 2021	Beaumont 2022	Marbisoux 2023
Digestat été	Volume épandu [m³]	40	30	X	X	30
	Quantité N total [kg]	231	162			176
	Teneur en N total [kg/t MF]	5,8	5,4			5,9
	Quantité N-NH4 [kg]	141	93			90
	Teneur en N-NH4 [kg/t MF]	3,5	3,1			3
	Rapport N-NH4/N total [%]	61	57			51
Digestat printemps	Volume épandu [m³]	40	30	40	40	30
	Quantité N total [kg]	187	168	188	162	206
	Teneur en N total [kg/t MF]	4,7	5,6	4,7	4	6,9
	Quantité N-NH4 [kg]	123	78	104	80	104
	Teneur en N-NH4 [kg/t MF]	3,1	2,6	2,6	2	3,5
	Rapport N-NH4/N total [%]	66	46	55	50	50

Parcelles expérimentales

Les parcelles expérimentales sont soit situées, en région limoneuse, dans la masse d'eau prioritaire des sables bruxelliens (essais avec application de digestat en été et au printemps), soit en Condroz dans le Sud du Hainaut. Les variétés implantées sont de type 'transformation', et représentent environ les deux tiers de la production en Wallonie (Figure 2) : Fontane, Challenger ou Innovator, dont la première représente 57% de la surface emblavée en pomme de terre de conservation et est plantée par 70% des producteurs de Wallonie. Au niveau belge, la Fontane représente la première production avec 2,8 millions de tonnes estimées en 2023 (Tableau 3).

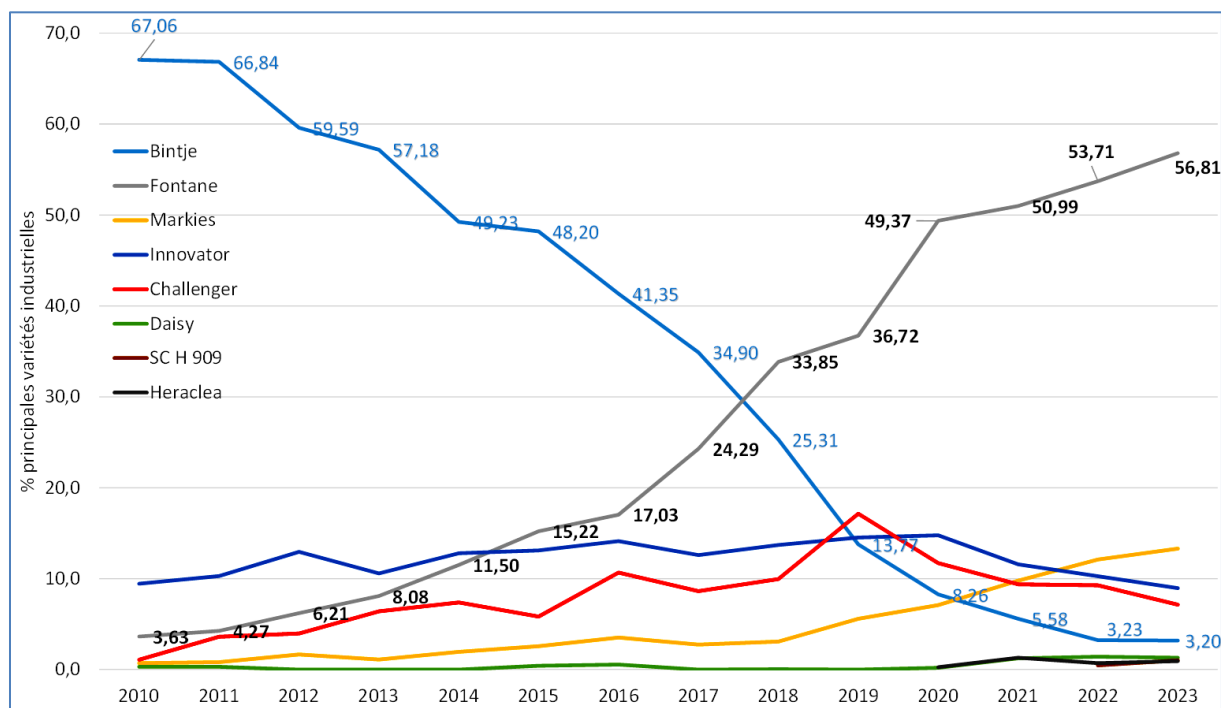


Figure 1. Evolution du pourcentage des variétés industrielles les plus importantes, en % des surfaces de pdt de consommation en Wallonie, enquête stock novembre (Sources : FIWAP, CARAH, compilation Fiwap - Communiqué FIWAP novembre 2023)

Tableau 3 : Surfaces, rendements et productions 2023 estimés par (type de) variété en Belgique (Source surfaces : déclarations régionales PAC ; Source rendement : enquête stocks Fiwap / Carah / PCA ; Communiqué FIWAP novembre 2023)

2023	Hâtives	Fontane	Innovator	Challenger	Bintje	Autres	Total pdt
Surfaces (ha) ⁽¹⁾	6.594	53.622	6.189	5.298	3.617	21.377	96.697
Rendement (t/ha) ⁽²⁾	38,6	52,2	53,5	54,9	45,3	47,3	50,1
Production (milliers t)	250	2.800	330	290	160	1.010	4.850

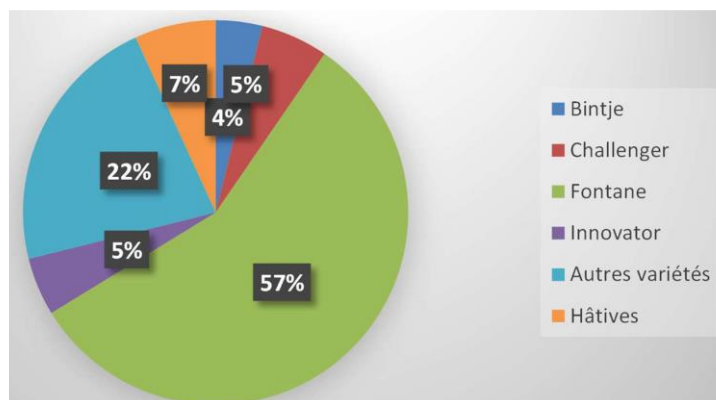


Figure 2. Répartition des emblavements de PDT par variété (Source : Statbel + enquêtes Fiwap / Carah / PCA / Inagro in Centre Pilote de la Pdt - Communiqué n°5 : 27 octobre 2023)

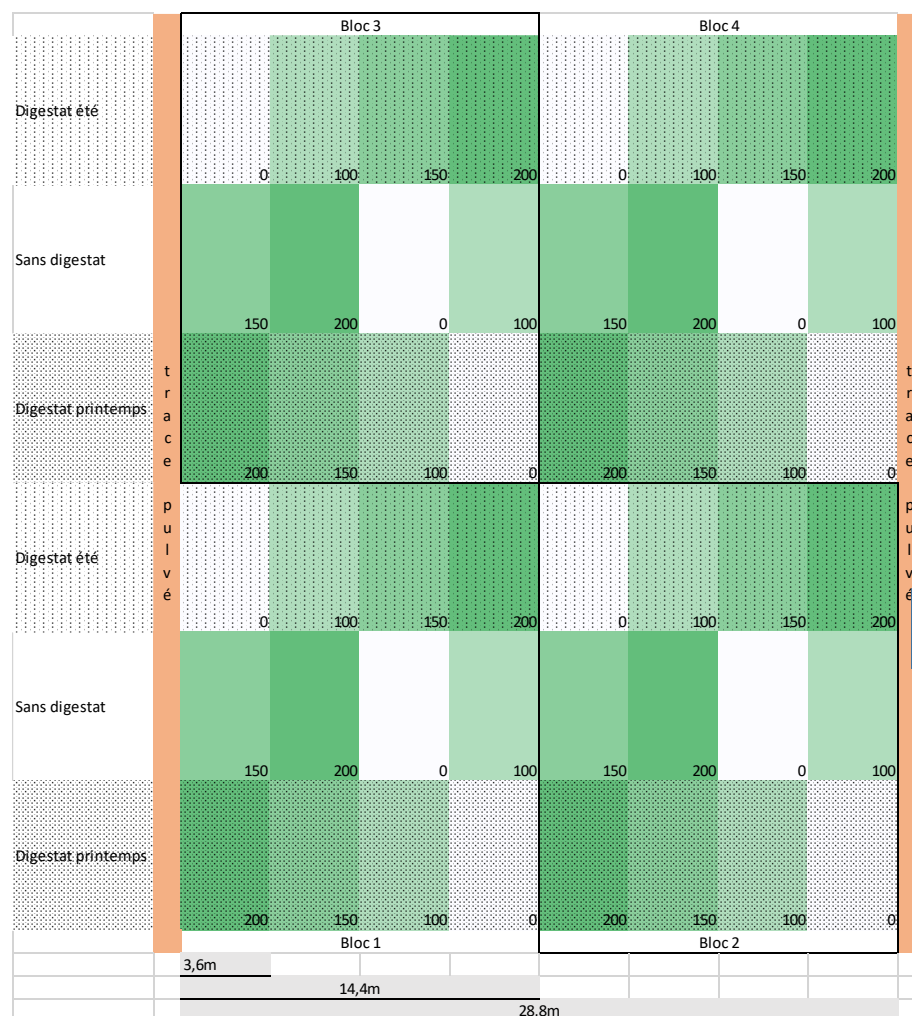


Figure 3. Exemple de disposition des traitements sur une parcelle expérimentale (Marbisois,2023)

Itinéraire cultural

Vers la fin du mois d'août, le digestat d'été est épandu par un automoteur avec enfouissement par disques/dents ou immédiatement enfoui après épandage à l'aide d'un déchaumeur. Dans les jours suivant l'apport de digestat d'été, une CIPAN est semée. Avant la fin de l'hiver, le couvert est détruit. L'épandage du digestat de printemps est effectué vers la fin avril ou le début mai également avec incorporation. L'azote minéral est ensuite épandu dans toutes les micro-parcelles à la main. Après épandage de l'azote minéral, le sol est travaillé et les pommes de terre sont plantées. Les plants de pommes de terre ont ensuite été défanés avant d'être récoltés quelques semaines plus tard, aux alentours du mois d'octobre selon les essais. Sur les quatre rangs d'une unité expérimentale, la récolte n'a eu lieu que sur un rang central ou sur les deux centraux (séparément), en fonction des essais. Les différentes dates-clés des opérations et autres informations relatives à l'itinéraire cultural des cinq expérimentations sont reprises dans le Tableau 4.

Tableau 4. Résumé de l'itinéraire cultural des cinq expérimentations

	Ligny 2019	Marbisoux 2021	Erquelines 2021	Beaumont 2022	Marbisoux 2023
Digestat été	30/08/18 40 m3	25/08/20 30 m3	X	X	22/08/22 30 m3
Digestat printemps	23/04/19 40 m3	23/04/21 30 m3	6/05/21 40 m3	25/04/22 40m3	8/05/23 30 m3
Date plantation PDT Variété	25/04/19 Challenger	30/04/21 Fontane	7/05/21 Innovator	2/05/22 Fontane	8/05/23 Fontane
Défanage PDT	9/09/19	24/09/21	20/09/21	15/09/22	25/09/23
Récolte PDT	7/10/19	28/10/21	11/10/21	6/10/22	23/11/23
Jours jusqu'au défanage	137	147	136	136	140
Température moyenne de la plantation au défanage	16,8 °C	15,7 °C	15,6 °C	18 °C	17,1 °C
Pluviométrie totale de la plantation au défanage	266 mm	451 mm	408 mm	200 mm	287 mm

Mesures effectuées

Différentes mesures ont été effectuées avant la plantation, pendant la croissance et après la récolte des pommes de terre. Les reliquats d'azote minéral ont été réalisés sur une profondeur de 90 centimètres.

- La biomasse des couverts d'interculture [t MS/ha] : elle permet de comparer le gain de biomasse suite à l'apport du digestat d'été.
- La quantité d'azote absorbée par les couverts d'interculture [kg N/ha] : cette mesure permet de quantifier l'accumulation supplémentaire d'azote dans la biomasse des couverts ayant reçu du digestat d'été. Elle permet de déterminer la quantité d'azote total apportée par le digestat qui a été valorisée par le couvert.
- Reliquats d'azote minéral en fin de période d'APL [kg Nmin/ha] : ces reliquats sont mesurés en fin de période d'APL et permettent d'évaluer l'efficacité piège à nitrate du couvert implanté. D. Reliquats azotés en sortie d'hiver [kg Nmin/ha] : cette mesure permet d'évaluer le reliquat azoté en fin d'hiver.
- Reliquats azotés à la plantation [kg Nmin/ha] : une mesure des reliquats au moment de la plantation des pommes de terre permet d'obtenir la quantité d'azote disponible au départ de la culture.
- Reliquats azotés en sols nus [kg Nmin/ha] : ces reliquats sont mesurés en parcelles de sol nu, sans pommes de terre, sans butte et sans fertilisation minérale. Ils permettent d'estimer la minéralisation de la matière organique durant la période de végétation.
- Le rendement brut en tubercules [t/ha]

- g) La tare pomme de terre [t/ha] : elle correspond aux tubercules de calibres inadéquats, les tubercules présentant des défauts visuels ou ayant subi des dommages mécaniques ainsi que les débris et matières étrangères (cailloux et mottes de terre).
- h) Le rendement en tubercules 35 mm+ [t/ha]
- i) Le pourcentage de tubercules 50 mm+ [%]
- j) La teneur en matière sèche des tubercules [%]
- k) Reliquats azotés après récolte [kg Nmin/ha] : les reliquats d'azote minéral mesurés après récolte des pommes de terre sont comparés aux valeurs de référence APL afin d'en établir la (non-)conformité.



Photo 2. Plantation de pomme de terre dans un des essais (Erquelinnes, le 7/05/2021)

Données économiques de la production

La valeur économique de la production a été calculée sur base des paramètres repris dans le Tableau 9. Le prix de vente des pommes de terre est basé sur les prix du marché, hors TVA (Source : FIWAP). Le coût de la fertilisation organique correspond au prix facturé pour l'épandage du digestat. La valeur économique de la production a été calculée pour deux périodes de vente différentes : en décembre et en février (année suivante).

Tableau 5. Paramètres économiques utilisés pour évaluer la valeur économique de la production

Lieu et année	Paramètres économiques			
	Coût N27 (€/kg N)	Coût digestat (€/ha)	Prix vente PDT décembre (€/t)	Prix vente PDT février (€/t)
Ligny 2019	0,89	185	126	139
Marbisoux 2021	1,06	185	134	196
Erquelinnes 2021	1,06	200	157	205
Beaumont 2022	2,33	200	233	300
Marbisoux 2023	1,07	220	200	300

Données météorologiques

Ligny 2019

L'année 2019 se classe en troisième position parmi les étés les plus chauds, avec une température moyenne de juin à août de 19,1 °C. Les trois mois de l'été se sont tous clôturés par une vague de chaleur. Malgré des mois de mai et juin relativement pluvieux, l'année a été globalement sèche. Le déficit hydrique s'est principalement manifesté au cours de l'été avec un mois de juillet très sec (trois semaines sans pluie) et un mois d'août relativement sec (IRM, 2024).

Erquelinnes et Marbisoux 2021

Selon l'IRM (2024), le printemps 2021 fut globalement plus froid qu'en moyenne suivi d'un premier mois d'été chaud. Le reste de l'été, les températures ont été inférieures à la normale pendant la majeure partie du temps. Au niveau de la pluviométrie, les mois de mars et surtout avril ont été plus secs qu'en moyenne. Le cumul printanier de précipitations atteint une valeur normale. Durant l'été, un excédent hydrique de 205 mm par rapport à la normale a été enregistré. Le mois d'août a totalisé 20 jours de pluie. L'été 2021 est devenu l'été le plus humide jamais enregistré.

Beaumont 2022

L'année 2022 a été l'année la plus chaude jamais enregistrée et une des années les plus séchantes (combinaison d'une faible pluviosité et d'une température élevée). La température moyenne en août est supérieure à la valeur normale (21,4 °C, normale : 18,4°C). L'année 2022 a été plus sèche que la normale affichant un déficit hydrique de 183 mm. Ce déficit s'est surtout marqué au cours du printemps et de l'été. En effet, seulement 200 mm de pluie sont tombés au cours de ces six mois pour une valeur normale de 400 mm. Lors des mois de juillet et août, seuls 22 mm de précipitations ont été relevés, pour une normale de 163 mm (IRM, 2024).

Marbisoux 2023

L'année 2023 se classe parmi les trois années les plus chaudes depuis 1991, avec une température moyenne de 12,1°C. La température moyenne au printemps a été conforme à la normale. Par contre, l'été a été plus chaud que la normale avec un mois de juin le plus chaud jamais enregistré (20,3°C, normale : 16,7°C). Au niveau des précipitations, l'année a été plus pluvieuse que la normale (excédent hydrique de 175 mm). Le printemps a été relativement humide et les cumuls de précipitations estivales mesurés ont été supérieurs à la moyenne. En effet, en juillet, pas moins de 21 jours de précipitations (131mm, normale : 77 mm) ont été enregistrés (IRM, 2024).

2 Résultats et discussion

2.1 Interculture

Dans cette partie, les effets d'un apport de digestat en été sur la biomasse des couverts végétaux et sur les quantités d'azote résiduel dans le sol seront analysés. L'apport de digestat en été n'ayant pas été étudié dans les essais d'Erquelinnes et de Beaumont, seules les données des essais de Marbisoux (2021 et 2023) et de Ligny (2019) seront traitées.

2.1.1 Biomasse des couverts

Les couverts d'interculture ont bien valorisé l'apport de digestat avant leur implantation (Figure 4). Dans les trois essais, l'apport de digestat en été a permis d'augmenter la quantité de matière sèche produite par le couvert. Des différences significatives de 1,4 ; 1,1 et 0,7 t MS/ha ont été mesurées. Ces différentes valeurs représentent une accumulation d'azote supplémentaire de 44, 40 et 40 kg N/ha dans la biomasse des couverts ayant reçu du digestat en été. Un coefficient de 1,22 a été appliqué pour tenir compte de la part d'azote racinaire.

Le couvert a valorisé respectivement 19 %, 25 % et 23 % de l'azote apporté par le digestat (Tableau 6). En fonction du rapport C/N du couvert et selon les conditions climatiques et les pratiques agricoles, entre 30 et 50 % de l'azote fixé par un couvert est restitué à la culture suivante (Juste *et al.*, 2009).

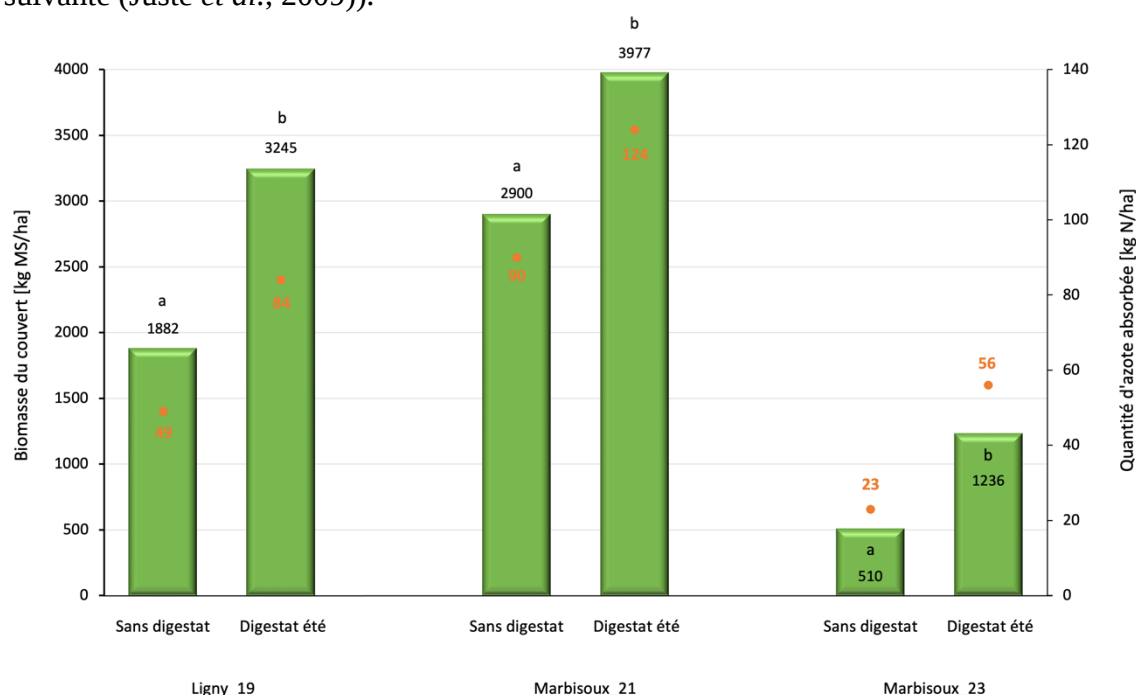


Figure 4. Quantité de matière sèche produite et d'azote absorbé par les couverts d'interculture avec et sans apport de digestat en été

Dans l'essai de Marbisoux_23, il est intéressant de remarquer que l'accumulation d'azote supplémentaire dans la biomasse (40 kg N/ha) est similaire à celle observée à Ligny et à Marbisoux_21, malgré un couvert d'interculture moins développé. Cette similitude s'explique par une teneur en azote plus élevée dans la biomasse à Marbisoux_23 (4,5 %), contrairement aux autres sites où la teneur est de 2,6 % et 3,1 % (Tableau 6).

Tableau 6. Pourcentage de l'azote total du digestat valorisé par le couvert

	Ligny_19	Marbisoux_21	Marbisoux_23
Gain de biomasse (aérienne) avec apport de digestat en été [kg MS/ha]	1363	1077	726
Teneur en N de la biomasse [%]	2,6	3,12	4,52
Accumulation d'N supplémentaire dans la biomasse (aérienne + racinaire) avec apport de digestat en été [kg N/ha]	44	40	40
N total apporté par le digestat en été [kg N/ha]	231	162	176
Pourcentage de l'azote du digestat valorisé par le couvert [%]	19	25	23

2.1.2 Effet CIPAN

Les reliquats d'azote minéral mesurés avant le semis de la CIPAN à Ligny, Marbisoux_21 et Marbisoux_23 s'élèvent respectivement à 48, 32 et 40 kg Nmin/ha (Figure 5). Les reliquats mesurés en fin de période d'APL, avec ou sans digestat, sont inférieurs aux niveaux mesurés avant l'implantation de la CIPAN. Ces observations témoignent de l'efficacité piège à nitrate du couvert implanté.

En fin de période d'APL, les niveaux d'azote minéral dans le profil sont plus élevés avec l'apport de digestat en été comparativement à ceux observés sans apport de digestat. Toutefois, dans les trois essais, les valeurs APL sont considérées conformes par rapport aux références annuelles, quelle que soit la modalité appliquée.

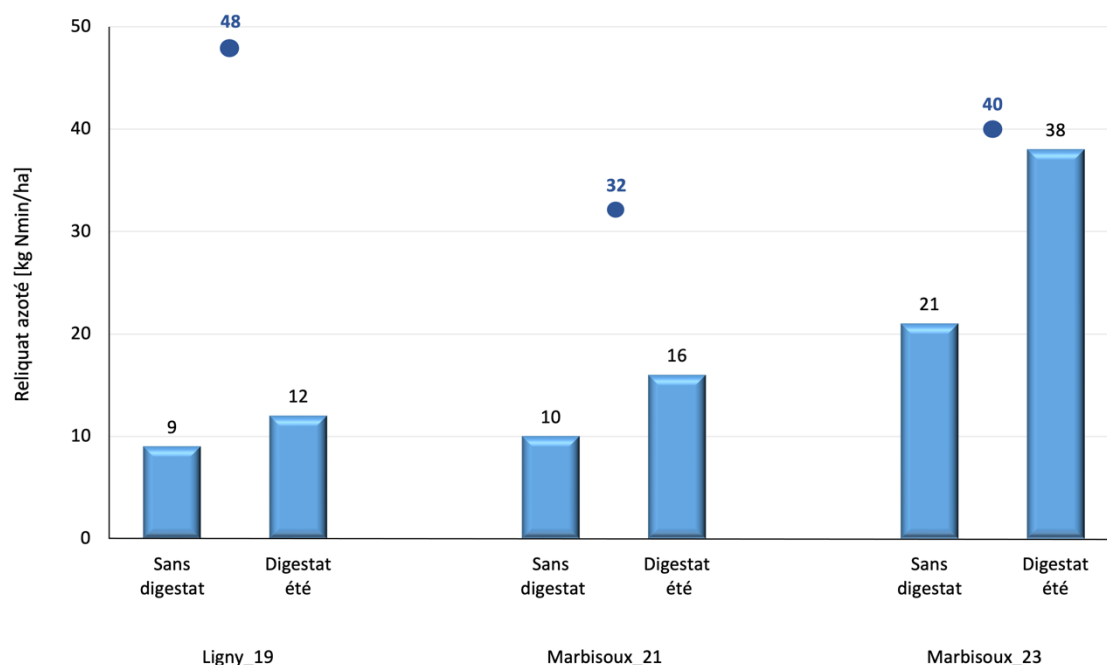


Figure 5. Reliquats d'azote minéral mesurés en fin de période d'APL avec et sans digestat apporté en été. Les points bleus correspondent aux reliquats d'azote minéral mesurés avant le semis de la CIPAN

2.2 Production de pommes de terre

Pour chaque variable mesurée, deux graphiques ont été réalisés : l'un pour analyser la réponse du rendement à la fertilisation organique et l'autre pour étudier la réponse à la fertilisation minérale. La réponse à l'interaction entre les deux formes d'engrais sera uniquement discutée pour les rendements en tubercules 35 mm+.

2.2.1 Rendement en calibre supérieur à 35mm

À l'exception de l'essai de 2019, les rendements sont élevés et proches des valeurs observées en Belgique (Tableau 7). Les températures extrêmement élevées et le déficit hydrique semblent avoir fortement pénalisé le rendement à Ligny en 2019, avec seulement 28,2 t/ha. Cependant, les rendements de 2019 observés en Belgique pour la même variété que celle de Ligny sont nettement supérieurs (+19,2 t/ha) à ceux obtenus dans l'essai de Ligny.

Tableau 7. Comparaison entre les rendements des pommes de terre 35 mm+ en Belgique et ceux observés dans les essais de l'étude en fonction de l'année et de la variété de pomme de terre étudiée

Variétés et années	Challenger - 2019	Fontane - 2021	Innovator - 2021	Fontane - 2022	Fontane - 2023
Rendements ¹ des pommes de terre en Belgique [t/ha]	47,4	48,1	47,5	43,4	49,2
Rendements observés dans l'essai de l'étude [t/ha]	28,2	49,1	52,5	44,2	49,9

Pour chaque essai, les analyses statistiques ont montré que l'interaction entre les deux facteurs (fertilisation organique et minérale) n'a pas d'influence significative sur la production de calibres supérieurs à 35 mm. Les modèles statistiques pour cette partie ont été réalisés sans interaction entre ces deux facteurs.

Fertilisation organique

Les analyses statistiques montrent que la fertilisation organique a un effet significatif sur la production des tubercules de calibre supérieur à 35 mm, à l'exception de l'essai de Marbisoux en 2023 (p-valeur = 0.2368).

Dans les cinq essais, l'application de digestat en été et au printemps a mené à une augmentation de la production de tubercules (Figure 6). A Marbisoux en 2023, ces augmentations ne sont pas significatives. Pour les autres essais, le rendement est significativement supérieur suite à un apport d'été par rapport à la modalité sans digestat. Quant à l'apport de printemps, il a permis d'augmenter significativement les rendements à Ligny, Erquelinnes et Beaumont.

Dans les essais de Marbisoux 2021 et 2023, l'application de digestat en été a permis des augmentations du rendement de 0,5 et 0,4 t/ha par rapport à l'apport de printemps. Les tests de Tukey montrent que ces différences ne sont pas significatives (p-valeurs = 0.9162 et 0.9779). Le troisième essai ayant évalué l'effet d'un apport de digestat en été montre un rendement plus faible qu'avec un apport de printemps, sans que cette différence ne soit significative (p-valeur = 0.4189).

En 2023, à Marbisoux, l'apport d'un digestat en été avant l'implantation de la CIPAN, contenant moins d'azote total et ammoniacal (176 kg d'N total dont 90 kg d'N-NH₄), a conduit à un rendement plus élevé que celui obtenu avec un apport au printemps, plus riche en azote total et ammoniacal (206 kg d'N total dont 104 kg d'N-NH₄). Or, l'effet fertilisant observé dans tous les essais après l'application de digestat est essentiellement attribuable à une disponibilité accrue en azote ammoniacal, directement assimilable par les cultures.

Sans tenir compte de l'essai de Ligny¹, l'apport de digestat en été avant la CIPAN semble donc légèrement plus efficace que l'apport de digestat au moment de la plantation des pommes de terre. Le digestat apporté au printemps étant un engrais organique riche en azote ammoniacal, cette observation est quelque peu inattendue.

Les conditions climatiques sont à prendre en considération dans l'interprétation de ces résultats. En effet, les deux essais de Marbisoux ont été marqués par des épisodes pluvieux intenses². Les pluies ont vraisemblablement réduit la teneur du sol en azote disponible pour la culture, affectant davantage les parcelles contenant plus d'azote minéral³. Par conséquent, les parcelles fertilisées avec du digestat au printemps ont perdu une plus grande quantité de nitrates par lixiviation comparativement à celles traitées avec du digestat d'été. En effet, l'azote des parcelles fertilisées avant l'implantation de la CIPAN a été partiellement valorisé par le couvert hivernal. Cela a réduit la quantité d'azote minéral lessivable lors des événements pluvieux durant la croissance de la culture. On peut encore ajouter deux éléments qui ont pu intervenir en faveur de l'apport d'été précédent la plantation des pommes de terre.

- Les parcelles fertilisées avec du digestat avant CIPAN, ont bénéficié d'un effet fertilisant du couvert plus élevé. Ce dernier, plus développé et riche en azote (cf. point 2.1.2 Effet CIPAN), a permis une libération progressive d'azote via la minéralisation. Ce processus a permis une restitution plus intense et régulière de l'azote, réduisant ainsi les pertes d'azote utile à la culture.
- L'apport effectué plus de sept mois avant la croissance de la culture a permis, via les processus de minéralisation de la fraction organique du digestat, de libérer un complément d'azote pour la culture de pomme de terre.

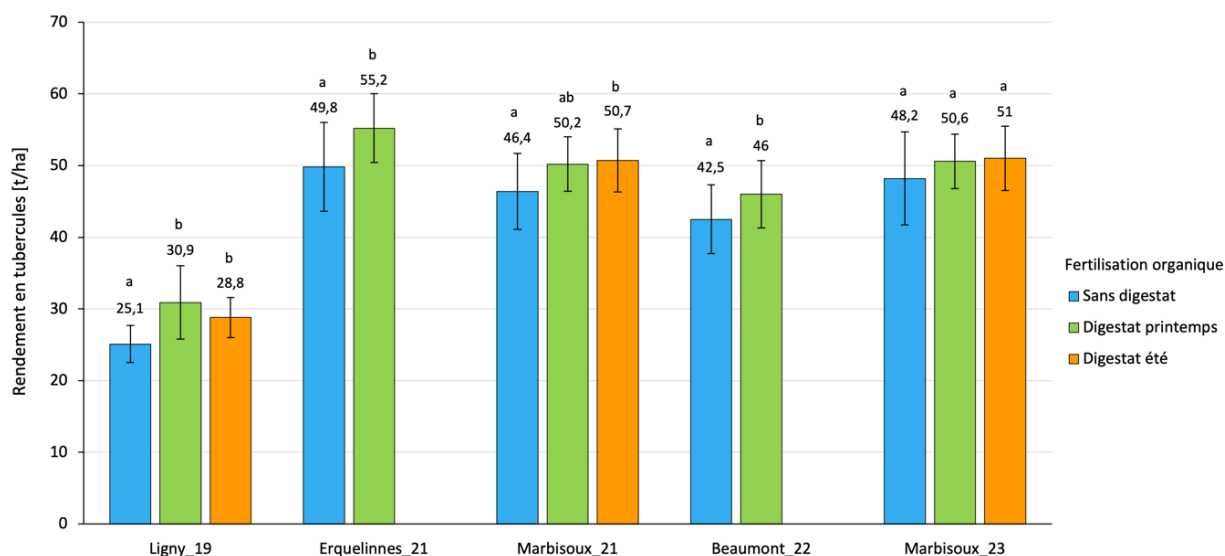


Figure 6. Production de pommes de terre (calibre supérieur à 35 mm) en tonnes par hectare, moyennes et écarts-types, en fonction de la fertilisation organique

¹ Des facteurs extérieurs à l'essai ont entraîné un déficit de production conséquent qui a réduit les possibilités d'observer de manière optimale les effets des différents facteurs étudiés.

² Lors de l'essai de Marbisoux_21, l'été a été le plus humide jamais enregistré avec un excédent hydrique de 205 mm par rapport à la normale. Lors de l'essai de Marbisoux_23, des cumuls de précipitations supérieurs à la moyenne ont été mesurés. Au mois de juillet, pas moins de 21 jours de précipitations ont été enregistrés.

³ Cela a pu être mis en évidence par les mesures de reliquat d'azote minéral en parcelle de sol nu, tout au long de la saison culturale (cf. 2.3.3).

Fertilisation minérale

Les rendements en tubercules augmentent avec la fertilisation minérale jusqu'à une certaine dose d'azote, avant de diminuer (Figure 7). A l'exception des essais de Ligny et Marbisoux_21, le maximum de rendement n'est pas obtenu avec le niveau de fertilisation le plus élevé.

Cette diminution de rendement au-delà d'une certaine dose d'azote est en accord avec ce qui est rapporté dans la littérature. Une fertilisation azotée excessive pénalise les rendements (Chambenoit et al., 2002). De trop fortes doses d'azote favorisent la croissance végétative, au détriment de la production de tubercules. Cette diminution de rendement peut également s'expliquer par un effet toxique des doses d'azote trop fortes, induisant un stress physiologique Alborno (2016) et Degan *et al.* (2019) ont rapporté qu'une surfertilisation azotée retarde l'initiation de la tubérisation, pénalisant les rendements.

Les analyses statistiques montrent que la fertilisation minérale n'a pas d'effet significatif sur la production des tubercules de calibre supérieur à 35 mm, à l'exception des deux essais de Marbisoux (p -valeurs = 5.3×10^{-6} et 0.008). Pour ces essais de 2021 et 2023, un apport de 100 kg N/ha a provoqué une augmentation significative du rendement par rapport au témoin non fertilisé, respectivement de 5,2 t/ha (p -valeur = 0.0041) et 5,7 t/ha (p -valeur = 0.0382). Les apports supérieurs à cette dose d'engrais minéral n'augmentent pas significativement la production.

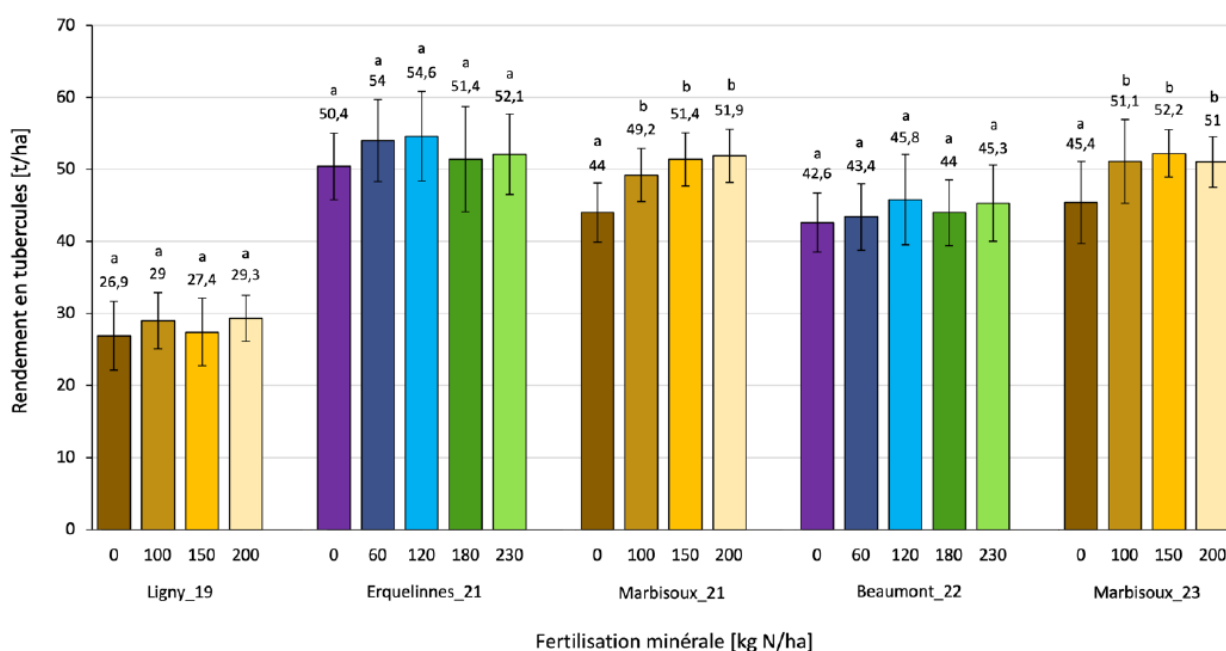


Figure 7. Production de pommes de terre de calibre supérieur à 35 mm (moyennes et écarts-types) en fonction de la fertilisation minérale pour les cinq sites d'expérimentation

Interaction entre les différentes formes d'engrais

Lors de l'essai de Marbisoux en 2021, l'interaction entre les deux types de fertilisation a montré qu'un apport d'engrais minéral de 100 kg N/ha en complément du digestat d'été ou de printemps était suffisant pour obtenir un rendement statistiquement équivalent au rendement maximal (Figure 8). Des apports supérieurs à cette dose n'augmentent pas la production de manière significative. Lorsque la fertilisation est uniquement minérale, un apport de 150 kg N/ha est suffisant pour obtenir un rendement statistiquement équivalent au maximum.

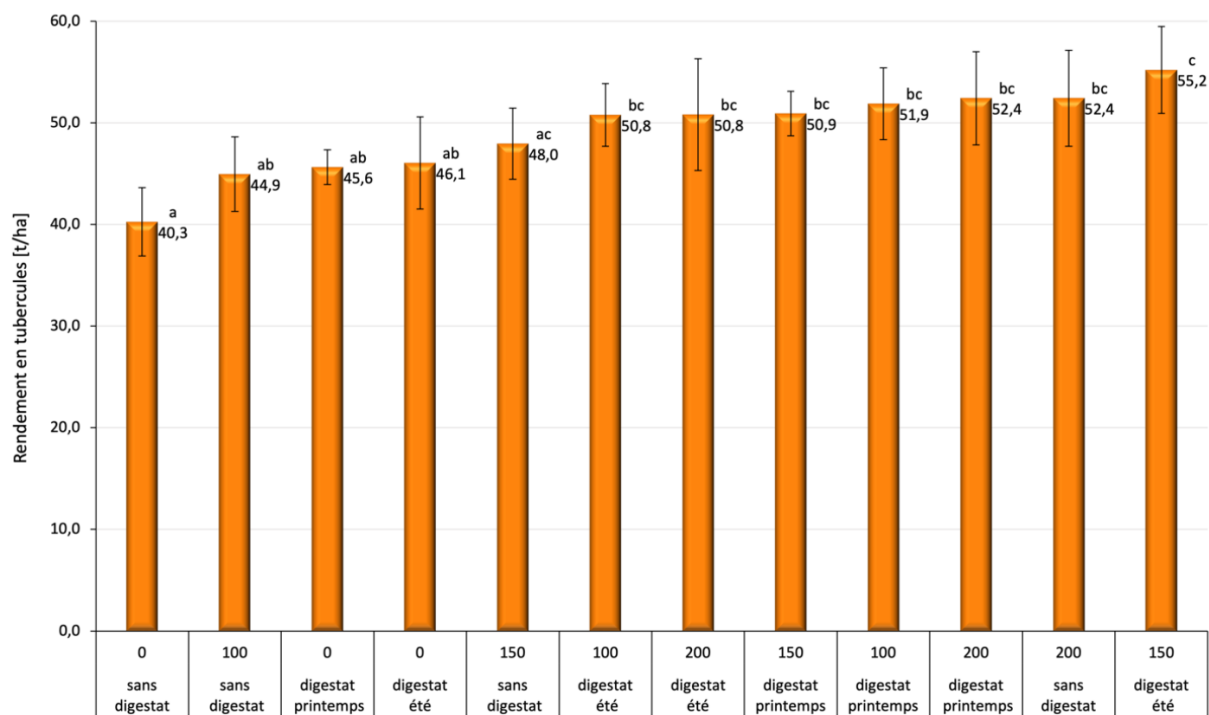


Figure 8. Production de pommes de terre de calibre supérieur à 35 mm (moyennes et écarts-types) en fonction de la fertilisation minérale (Marbisoux 2021)

Lors de l'essai de Marbisoux en 2023, les résultats ont donné que l'apport de digestat d'été ou de printemps sans fertilisation minérale était suffisant pour obtenir un rendement statistiquement équivalent au rendement maximal. Lorsque la fertilisation est uniquement minérale, un apport de 100 kg N/ha est suffisant pour obtenir un rendement statistiquement équivalent au maximum.

Dans tous les essais, le traitement sans fertilisation (« sans digestat 0 ») a entraîné le rendement le plus faible. Ce résultat est cohérent étant donné que ce traitement correspond à celui qui amène le moins d'azote à la culture (apport nul).

Dans les expérimentations menées à Ligny, Beaumont et Erquelinnes, tous les traitements d'un même essai affichent un niveau de significativité similaire. Cette observation peut être attribuée d'une part aux faibles gains de rendement suite aux applications d'azote minéral, et d'autre part aux écarts-types élevés associés à chaque moyenne, ce qui réduit la capacité à détecter des différences significatives entre les traitements.

2.2.2 Conseils de fertilisation

A l'exception de trois cas, les doses d'azote « conseil » et « expérimentales » ne diffèrent que faiblement, avec une différence en valeur absolue ne dépassant pas 25 kg N/ha (Tableau 8). Dans l'ensemble, les doses expérimentales optimales sont donc en accord avec les doses conseillées par le Module Ferti culture de PROTECT'eau.

A Ligny, le conseil réalisé pour l'apport de digestat de printemps s'élève à 87 kg N/ha. Cette dose est bien supérieure à la dose de 0 kg N/ha, ayant permis le meilleur rendement de l'essai. Le rendement le plus élevé à Ligny, avec apport de digestat de printemps, a été obtenu sans fertilisation minérale (32 t/ha) alors que le rendement le plus faible a été obtenu avec la dose d'azote la plus élevée (29,7 t/ha). Ces résultats contradictoires s'expliquent par des facteurs extérieurs à l'essai qui ont entraîné un déficit de production important et ont réduit les possibilités d'observer de manière optimale les effets des facteurs étudiés. Pour un niveau de facteur donné, les mesures de rendement ont présenté une variabilité notable. Cela s'est confirmé lors du calcul des écarts-types.

A Erquelinnes, le conseil réalisé pour l'apport de digestat de printemps s'élève à 62 kg N/ha. Cet apport permet d'atteindre un rendement inférieur au maximum observé (-6,3 t/ha), atteint avec une dose d'azote de 120 kg N/ha. Cette différence de rendement n'est cependant pas significative (p-valeur = 0.955). Cet écart entre la dose conseil et la dose expérimentale pourrait s'expliquer par les conditions climatiques très humides lors de l'année 2021. Sur les 137 jours de croissance, 408 mm de précipitations sont tombés. Une part considérable de l'azote ammoniacal apporté par le digestat au printemps a probablement été lixiviée, ce qui a réduit la disponibilité d'azote pour les plantes. Par conséquent, une dose d'azote minéral plus élevée que la dose conseil a pu partiellement compenser cette perte par lixiviation et assurer un apport d'azote suffisant pour atteindre le rendement observé.

A Beaumont, le conseil établi sans apport organique s'élève à 165 kg N/ha. Cet apport a permis d'atteindre un rendement inférieur au maximum observé (-3 t/ha). Cette différence n'est cependant pas significative.

Tableau 8. Comparaison des doses d'azote expérimentales menant au rendement maximal et des doses d'azotes conseil (obtenues via le Module Ferti culture de PROTECT'eau), calculées pour chaque essai et chaque niveau de fertilisation

Fertilisation organique	Doses d'azote [kg N/ha]	Ligny 2019	Erquelinnes 2021	Marbisoux 2021	Beaumont 2022	Marbisoux 2023
Digestat été	Doses d'azote expérimentales	109	X	128	X	128
	Doses d'azote conseil	103		105		120
Digestat printemps	Doses d'azote expérimentales	0	120	117	100	93
	Doses d'azote conseil	87	62	95	89	72
Sans digestat	Doses d'azote expérimentales	200	140	200	230	150
	Doses d'azote conseil	176	151	175	165	170

2.2.3 Efficacité du digestat

Les coefficients apparents d'utilisation de l'azote du digestat et de l'ammonitrate ont été calculés sur base des rendements des calibres supérieurs à 35 mm. Les CAU mesurés sur l'ensemble des essais sont faibles. Les moyennes des CAU sont de 5 %, 3 % et 3,8 % respectivement pour l'engrais minéral, le digestat d'été et le digestat de printemps (Tableau 9). Pour chaque essai, le CAU du digestat d'été est plus faible que le CAU de l'engrais minéral.

A Ligny et à Beaumont, le CAU du digestat de printemps est supérieur au CAU de l'engrais minéral. A l'exception de l'essai de Marbisoux 2021, le CAU du digestat de printemps est plus élevé que celui du digestat d'été.

Tableau 9. Coefficients apparents d'utilisation de l'azote (CAU) de l'engrais minéral et du digestat dans les différents essais

	Ligny 2019	Marbisoux 2021	Erquelinnes 2021	Beaumont 2022	Marbisoux 2023
CAU sans digestat	3,1%	6,1%	4,6%	2,5%	8,9%
CAU digestat été	1,9%	3,6%			3,8%
CAU digestat printemps	5,2%	3,2%	3,5%	2,7%	4,4%

Lors des essais menés à Ligny et Beaumont, les coefficients d'équivalence engrais minéral du digestat appliqué au printemps sont supérieurs à 100 % (Tableau 10), ce qui est théoriquement impossible à obtenir. Pour l'essai de Ligny, le rendement maximal a été obtenu avec un apport de digestat au printemps sans fertilisation minérale. Le CAU du digestat apporté au printemps est par conséquent plus élevé dans cet essai, expliquant cette valeur de Kék supérieur à 100 %. Des facteurs extérieurs à l'essai (attaques de doryphores, sécheresse, structure de sol) ont entraîné un déficit de production important et ont réduit les possibilités d'observer de manière optimale les effets des facteurs étudiés. Les écarts-types élevés associés aux moyennes rendent délicates l'utilisation des résultats pour déterminer l'efficacité du digestat de printemps. Quant à l'essai de Beaumont, l'apport de digestat donne également des rendements élevés avec de faibles compléments azotés. De plus, le rendement augmente peu avec la fertilisation azotée minérale entraînant un faible CAU pour cet engrais. En conséquence de CAU de digestat élevés et de CAU d'engrais minéral faible, le Kék de l'apport du digestat au printemps est élevé, voire supérieur à 1. Cette efficacité de l'apport organique supérieure au minéral peut aussi exprimer des carences en phosphore ou d'autres facteurs limitant que l'azote et auquel l'engrais organique donne une réponse positive.

Tableau 10. Coefficients d'équivalence engrais minéral (Kék) du digestat dans les différents essais

	Ligny 2019	Marbisoux 2021	Erquelinnes 2021	Beaumont 2022	Marbisoux 2023
Kék digestat été	61%	59%			43%
Kék digestat printemps	168%	52%	76%	107%	50%

Les faibles coefficients apparents d'utilisation de l'azote minéral peuvent être expliqués par les rendements élevés observés en absence d'apport de fertilisant. Ces valeurs basses peuvent également être expliquées par un faible volume de sol prospecté par les racines des plants de pomme de terre, réduisant l'efficacité d'absorption de l'azote (Chambenoit, 2022). L'efficacité

de la fertilisation azotée dépend de plusieurs facteurs : les dates d'apport, le climat, le type d'intrants ou encore de la vitesse de minéralisation de la fraction organique de l'azote dans le cas d'un engrais organique.

En excluant les deux résultats supérieurs à 100 %, les Kéq moyens sont de 54 % et 59 % respectivement pour le digestat apporté en été et pour celui de printemps. L'équivalence minérale de l'apport de printemps (59 %) est comparable à celle recensée dans la littérature. Reibel (2018) rapporte un Kéq du digestat brut de 65 % en culture de pomme de terre. Le Kéq moyen pour l'apport d'été (54 %) ne peut être comparé à des valeurs de référence car la littérature scientifique ne propose pas de données pour un apport réalisé à l'été, avant l'implantation d'une CIPAN.

Les CAU, utilisés pour calculer les Kéq, sont déterminés en se basant uniquement sur la quantité totale d'azote présente dans le digestat. Bien que l'azote ammoniacal, qui est la forme d'azote directement assimilable par les plantes et donc la plus influente sur les rendements, soit inclus dans l'azote total, il n'est pas spécifiquement pris en compte dans le calcul. À Marbisoux en 2021, le Kéq a été observé comme étant plus élevé lors des apports d'été par rapport aux apports de printemps. Le digestat appliqué avant la CIPAN (apport d'été) contenait 57 % d'azote minéral, tandis que celui appliqué avant la plantation des pommes de terre (apport de printemps) en contenait seulement 46 % (Tableau 8). Ainsi, le calcul du Kéq basé sur les CAU est influencé par la quantité totale d'azote, mais ne reflète pas nécessairement la quantité d'azote ammoniacal disponible. Il est donc important de considérer la teneur en azote ammoniacal dans l'interprétation des résultats. Dans les trois essais ayant étudié l'effet d'un apport d'été, le Kéq le plus élevé est obtenu avec l'apport de digestat qui contenait la teneur en azote ammoniacal la plus élevée.

Outre le contenu en azote minéral, la valeur du Kéq est influencée par les conditions climatiques, le phénomène de volatilisation de l'azote ammoniacal ou encore la vitesse de minéralisation de la fraction organique de l'azote du digestat. Cependant, dans le cas du digestat brut, l'azote organique est peu minéralisé en première année d'application (Michaux et al., 2019), surtout en cas d'apport de printemps.

2.2.4 Pourcentage de tubercules de calibre supérieur à 50 mm

Pour chaque essai, les analyses statistiques ont montré que l'interaction entre les deux facteurs (fertilisation organique et minérale) n'a pas d'influence significative sur le pourcentage de tubercules de calibre supérieur à 50 mm. Les modèles statistiques pour cette partie ont été réalisés sans interaction entre ces deux facteurs.

Fertilisation organique

Les analyses statistiques permettent de mettre en évidence le gain significatif des fertilisations organiques dans les proportions de gros calibres, à l'exception de l'essai de Beaumont (p-valeur = 0.1091).

Dans les cinq essais, l'application de digestat en été et au printemps a mené à une augmentation du pourcentage de tubercules de calibre supérieur à 50 mm (Figure 9). A Ligny et à Beaumont, ces augmentations ne sont pas significatives. Pour les autres essais, le rendement est significativement supérieur suite à un apport d'été par rapport à la modalité sans digestat. Quant à l'apport de printemps, il a permis d'augmenter significativement le rendement à Erquelinnes et à Marbisoux_23.

Dans les essais de Ligny et Marbisoux_23, l'application de digestat au printemps a conduit à des augmentations du pourcentage de gros calibres de 3,7 % et 0,4 % par rapport à l'apport d'été. Les tests de Tukey montrent que ces différences ne sont pas significatives (p-valeurs = 0.4585 et 0.9601). A Marbisoux_21 l'apport de digestat d'été a mené à une augmentation du pourcentage de gros calibres, par rapport à l'apport de printemps (+ 2,5%). Cette différence n'est pas significative (p-valeur = 0.1171).

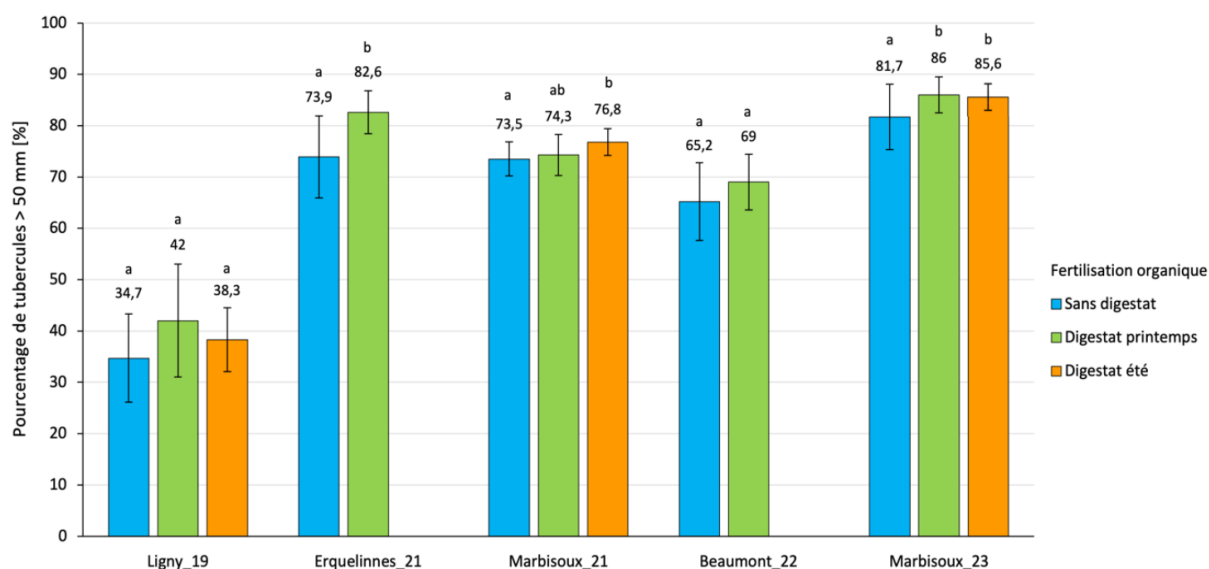


Figure 9. Pourcentage de tubercules de calibre supérieur à 50 mm (moyennes et écarts-types) en fonction de la fertilisation organique

Fertilisation minérale

Les analyses statistiques montrent que la fertilisation minérale n'a pas d'effet significatif sur le pourcentage de tubercules de calibre supérieur à 50 mm, à l'exception de l'essai de Marbisoux_23 (p-valeur = 0.0406).

Les pourcentages de gros calibres augmentent avec la fertilisation minérale jusqu'à une certaine dose d'azote, avant de diminuer (Figure 10). A l'exception des essais de Ligny_19 et Marbisoux_21, le pourcentage maximal n'est pas obtenu avec le niveau de fertilisation le plus élevé.

Les pourcentages les plus élevés ont été observés à Marbisoux en 2023, avec une moyenne de 84,4 %. Alors qu'à Ligny, la proportion de tubercules de calibre supérieur à 50 mm ne s'élève qu'à 38,4 %.

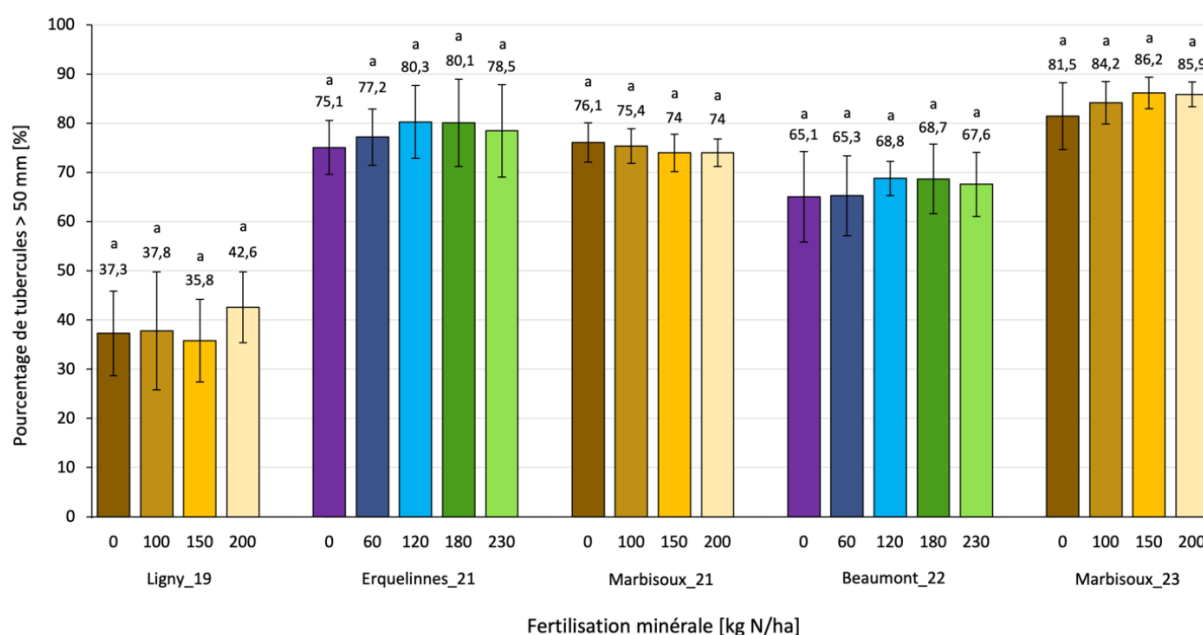


Figure 10. Pourcentage de tubercules de calibre supérieur à 50 mm (moyennes et écarts-types) en fonction de la fertilisation organique

Cette augmentation de la proportion des gros calibres avec la fertilisation azotée jusqu'à une certaine dose a été rapportée par Degan et al. (2019). Les observations semblent montrer que la dose d'azote optimale maximisant le rendement total correspond aussi à la dose maximisant la proportion des calibres supérieurs à 50 mm. Ce constat a été rapporté par d'autres études dans la littérature scientifique (Chambenoit et al., 2022 ; Degan et al., 2019).

2.2.5 Teneur en matière sèche

Pour chaque essai, les analyses statistiques ont révélé que l'interaction entre la fertilisation organique et minérale n'avait pas d'effet significatif sur la teneur en matière sèche des tubercules (communément exprimée par le terme 'poids sous eau'). Par conséquent, les modèles statistiques pour cette partie ont été réalisés sans prendre en compte l'interaction entre ces deux facteurs.

Fertilisation organique

Les analyses statistiques montrent que la fertilisation organique a un effet significatif sur la teneur en matière sèche des tubercules, à l'exception de l'essai de Ligny (p-valeur = 0.2666).

Dans tous les essais, l'application de digestat a mené à une réduction de la teneur en matière sèche des tubercules (Figure 31). À l'exception de l'essai de Ligny, la fertilisation avec du digestat appliqué au printemps réduit significativement la teneur en matière sèche des tubercules par rapport à la fertilisation uniquement minérale. La teneur en matière sèche étant corrélée négativement avec la quantité d'azote disponible pour la culture (Chambenoit *et al.*, 2002), cette réduction de teneur en matière sèche suite à un apport d'azote ammoniacal est cohérente.

Quant à l'apport d'été, il a permis de réduire significativement la teneur en matière sèche à Marbisoux_21 (- 0,6 % ; p-valeur = 0.0049). En revanche, les diminutions observées à Ligny et à Marbisoux_23 ne sont pas significatives.

L'application de digestat au printemps a permis des réductions de la teneur en matière sèche de 0,9 et 2,9 % par rapport à l'apport d'été, dans les essais de Marbisoux 2021 et 2023. Les tests de Tukey montrent que ces différences sont significatives (p-valeur < 0.0001 et p-valeur = 0.0001). À Ligny, la teneur en matière sèche suite à un apport de digestat au printemps est plus élevée qu'avec un apport en été, mais cette différence n'est pas significative (p-valeur = 0.9418). Les teneurs en matière sèche plus élevées observées après l'apport de digestat d'été, comparé à celui de printemps pourraient être dues à une quantité d'azote minéral dans le sol plus faible. Étant donné que la teneur en matière sèche et la fertilisation azotée sont corrélées négativement, l'apport de digestat en été a mené à des teneurs en matière sèche plus élevées.

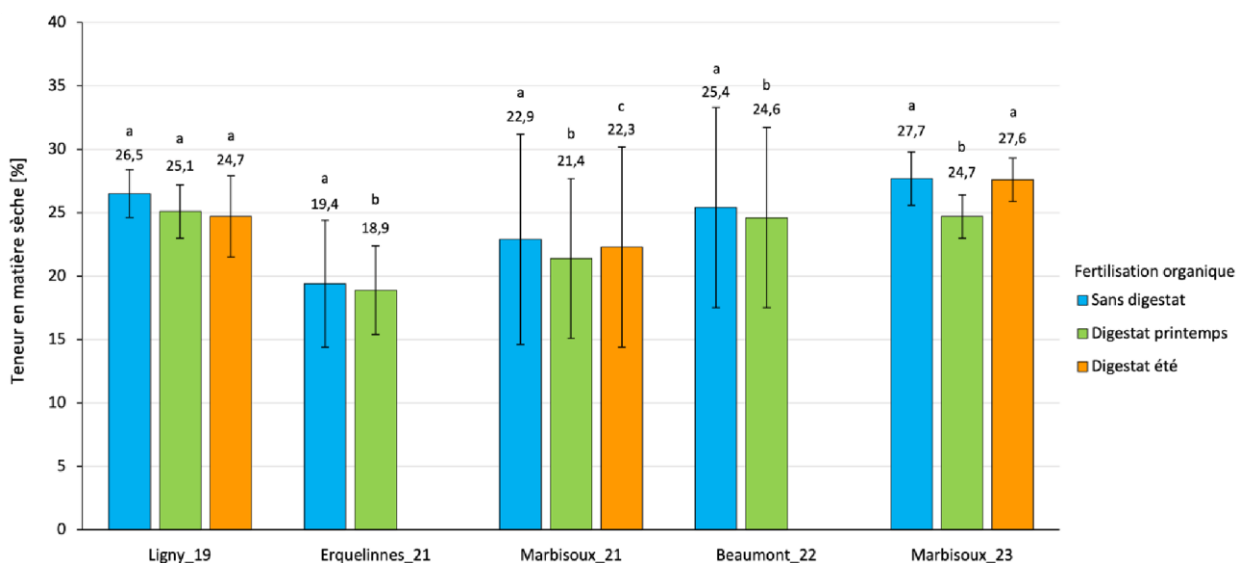


Figure 11. Teneur en matière sèche des tubercules, moyennes et écarts-types en fonction de la fertilisation organique

Fertilisation minérale

Les analyses statistiques montrent que la fertilisation minérale n'a pas d'effet significatif sur la teneur en matière sèche des tubercules, à l'exception des deux essais de Marbisoux (pvaleurs = 5.2e-09 et 0.0258).

Pour l'essai de 2021, un apport de 100 kg N/ha a provoqué une diminution significative de la teneur en matière sèche par rapport au témoin non fertilisé de 1,2 % (p-valeur < 0.0001) (Figure 12). Les apports supérieurs à cette dose d'engrais minéral n'augmentent pas significativement la teneur en matière sèche. Pour l'essai de 2023, seul l'apport de 150 kg N/ha a provoqué une diminution significative de la teneur en matière sèche par rapport au témoin non fertilisé de 2,1 % (p-valeur = 0.0295).

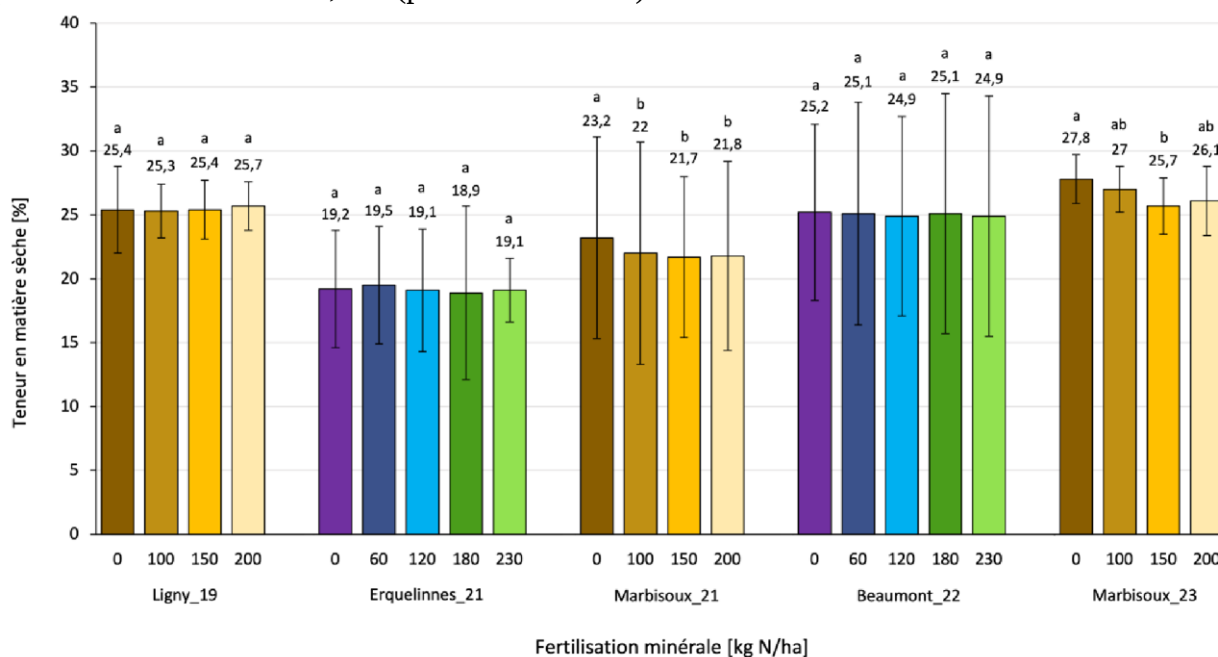


Figure 12. Teneur en matière sèche des tubercules, moyennes et écarts-types en fonction de la fertilisation minérale

La diminution de la teneur en matière sèche des tubercules en réponse à l'augmentation des doses d'azote rejoint les résultats observés dans d'autres études (Jenkins & Nelson, 1992 ; Maltas *et al.*, 2018). Cette diminution s'explique par une redirection des assimilats vers la croissance foliaire, au détriment de la synthèse et de l'accumulation de réserves dans les tubercules (Taiz & Zeiger, 2003). Toutefois, d'autres facteurs tels que les conditions climatiques, la variété cultivée et l'alimentation hydrique peuvent influencer la teneur en matière sèche des tubercules (Degan *et al.*, 2019).

Gravouille (2007) rapporte que la teneur en matière sèche des tubercules est sensible aux conditions climatiques : elle diminue dans des environnements humides et augmente dans des environnements secs. Ces résultats expliquent les faibles teneurs observées à Erquelines (conditions humides) et les teneurs élevées à Ligny, Beaumont et Marbisoux_23 (climat sec). Taiz et Zeiger (2003) ont détaillé les mécanismes physiologiques responsables de cette différence de matière sèche en fonction des conditions climatiques : la sécheresse stimule la synthèse et l'accumulation de substances sèches dans les tubercules afin de maintenir la turgescence des cellules. Inversement, l'humidité réduit ce besoin et favorise une dilution des substances sèches.

2.3 Reliquats azotés

2.3.1 Reliquats en sortie d'hiver

Des mesures de reliquats azotés ont été réalisées en sortie d'hiver dans les essais comprenant une fertilisation avec du digestat en été⁴ (le 18/03/2019 à Ligny et le 30/03/2021 à Marbisoux). Les parcelles fertilisées avec du digestat en été affichent un reliquat azoté significativement plus élevé (Figure 13). Ces parcelles ont accumulé plus de biomasse. Le processus de minéralisation étant plus intense, une quantité plus importante d'azote disponible dans le sol est libérée. Les parcelles traitées avec du digestat à Ligny et Marbisoux présentent un reliquat enrichi respectivement de + 44 et + 35 kg Nmin/ha. Ces valeurs sont comparables aux quantités d'azote supplémentaire fixées par le couvert suite à l'apport de digestat (+ 44 et + 40 kg Nmin/ha).

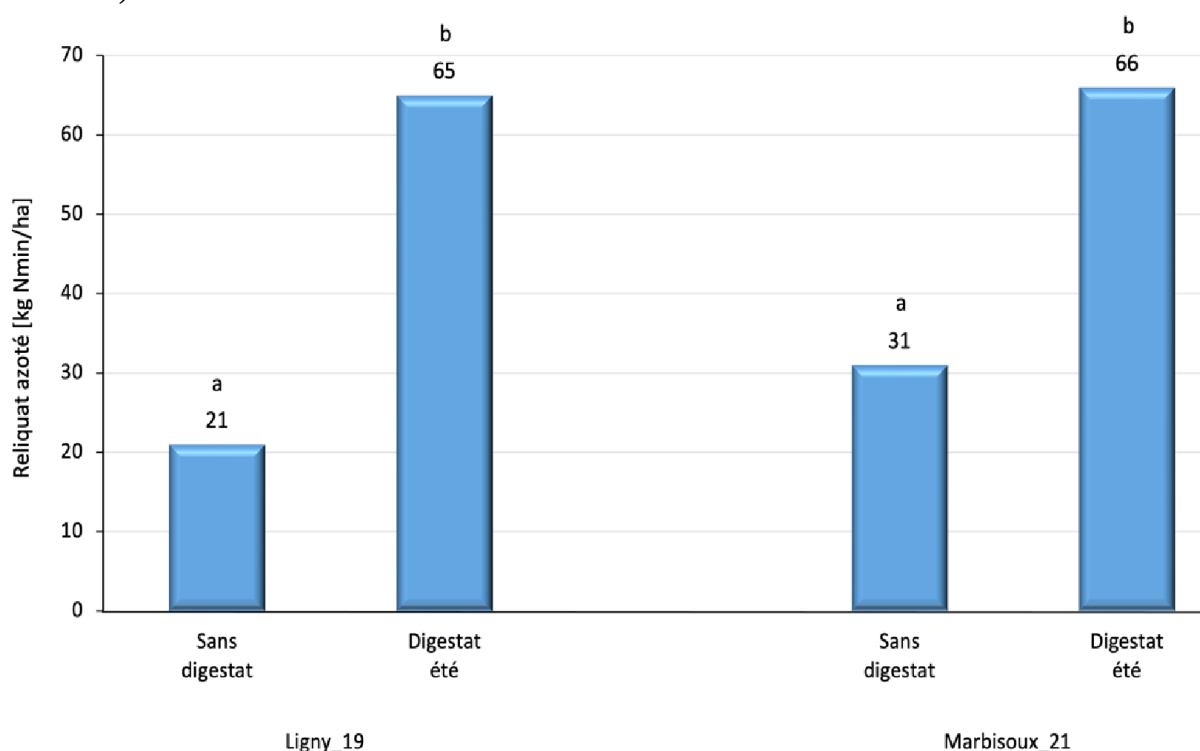


Figure 13. Reliquats d'azote minéral mesurés en sortie d'hiver, avec ou sans digestat appliqué en été.

⁴ Excepté pour l'essai de Marbisoux 2023.

2.3.2 Reliquats à la plantation

Des mesures de reliquats azotés ont été réalisées au moment de la plantation des pommes de terre. Elles permettent de déterminer la quantité d'azote disponible dans le sol au départ de la culture (Figure 14). Lors de la plantation, des différences significatives de 35, 31 et 22 kg Nmin/ha entre les parcelles fertilisées avec du digestat et celles sans digestat ont été respectivement mesurées à Ligny, Marbisoux_21 et Marbisoux_23. A Ligny, les reliquats à la plantation pour les objets sans digestat et avec digestat d'été ont augmenté de 21 et 12 kg Nmin/ha depuis la mesure en sortie d'hiver, 37 jours plus tôt. Cette accumulation d'azote dans le profil est le résultat de la minéralisation intervenue depuis la mesure des reliquats en sortie d'hiver.

Pour l'essai de Marbisoux en 2021, les quantités d'azote dans le profil n'ont quasiment pas évolué depuis la mesure en sortie d'hiver, excepté pour les parcelles ayant reçu du digestat de printemps (juste avant la plantation). Pour ces parcelles, le reliquat mesuré est de 67 kg Nmin/ha, un niveau strictement identique au reliquat mesuré dans les parcelles ayant reçu du digestat en été. L'apport de digestat de printemps a mené à une augmentation d'environ 30 kg Nmin/ha par rapport à l'objet non fertilisé. Cela correspond à environ 40 % de l'azote ammoniacal contenu dans le digestat épandu. Même si une partie de l'azote ammoniacal a visiblement déjà été transformé en nitrate (une vingtaine d'unités), il y a seulement 8 kg N-NH₄/ha dans le reliquat mesuré 7 jours après l'épandage du digestat qui a été épandu à raison de 78 kg N-NH₄/ha. Cela montre la difficulté d'interpréter correctement des résultats d'échantillons réalisés peu de temps après l'application de matière organique.

Dans les trois essais, l'azote minéral contenu dans le profil se situe majoritairement dans le premier horizon (0-30 cm) (Figure 14). A Marbisoux_21, celui-ci contient logiquement davantage d'azote minéral après l'apport de digestat au printemps par rapport à l'apport d'été, alors que les reliquats azotés sur 90 cm sont identiques.

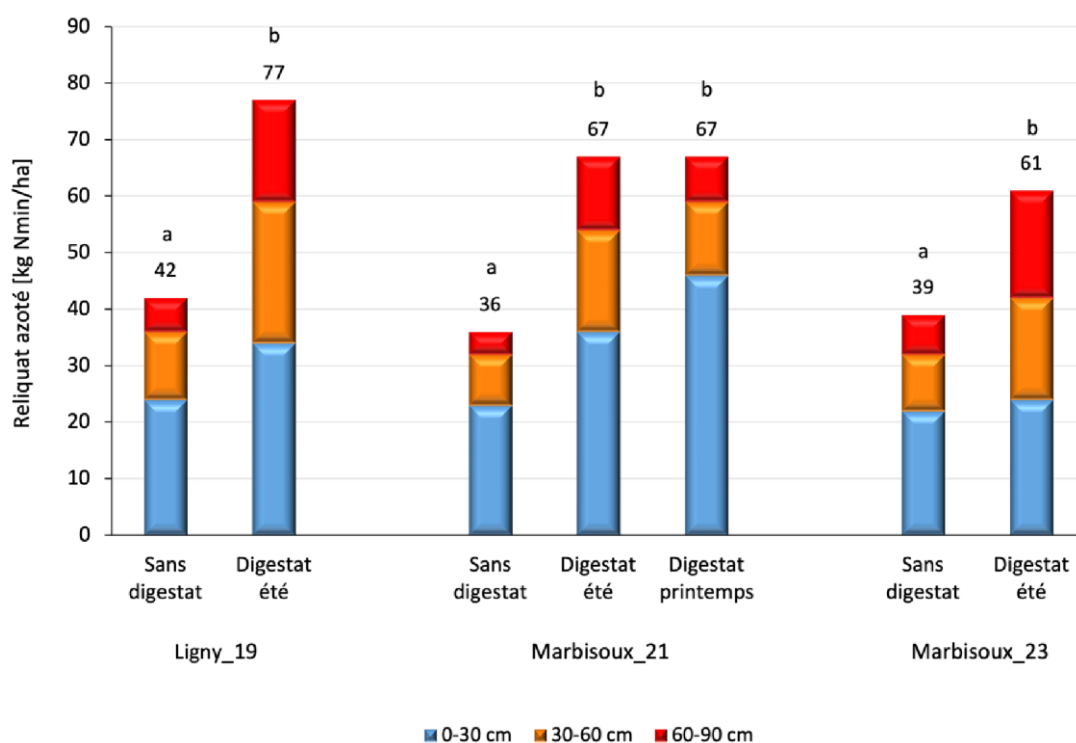


Figure 14. Reliquats d'azote minéral sur 90 cm mesurés à la plantation des pommes de terre, avec ou sans digestat apporté à l'été précédent

2.3.3 Reliquats en sols nus

Les reliquats en sols nus sont mesurés en parcelles non couvertes, sans pommes de terre, sans butte et sans fertilisation minérale. Ils permettent d'estimer la minéralisation de la matière organique durant la période de végétation. Ces mesures ont également permis de confronter les niveaux d'azote résiduel dans le sol suite aux apports d'été et de printemps, tout au long de la saison de culture. Parmi les trois essais ayant étudié l'effet du digestat d'été, seuls ceux de Marbisoux ont été retenus pour l'analyse. Les résultats de Ligny montrent une augmentation très forte en début d'été. Par la suite, des valeurs très élevées avec l'objet « digestat printemps » ont été mesurées et soulèvent des questions : 516, 273 et 309 kg N/ha. L'erreur dans la mesure est potentiellement plus grande avec des valeurs élevées, d'autant plus qu'il n'y a pas eu de répétition dans l'échantillonnage cette année-là. Les tendances observées à Marbisoux 2021 et 2023 étant similaires, seul l'essai de 2023 sera discuté dans cette partie.

Les reliquats mesurés montrent une très forte augmentation en fin de printemps, synonyme d'une minéralisation intense (Figure 15), avec logiquement un maximum atteint avec l'apport de digestat juste avant la plantation (+174 kg N/ha en 51 jours). Les reliquats des parcelles avec apport de printemps sont significativement supérieurs à celles avec apport l'été précédent, +43 kg N/ha, elles-mêmes supérieures à celles sans digestat de 31 kg N/ha. La mesure suivante, le 7 août montre une diminution importante de l'azote nitrique dans le profil par suite des pluies de juillet (121 mm de précipitations cumulées en 41 jours). A partir de cette date, et à cause de cette lixiviation intense, les mesures effectuées ne permettent plus d'évaluer de manière satisfaisante les quantités d'azote minéralisés dans les différents objets, si ce n'est que le digestat apporté au printemps donne un profil toujours au-dessus des deux autres modalités. Les reliquats augmentent à nouveau en septembre, mais la lixiviation de l'azote minéral est trop élevée pour pouvoir comparer ces observations.

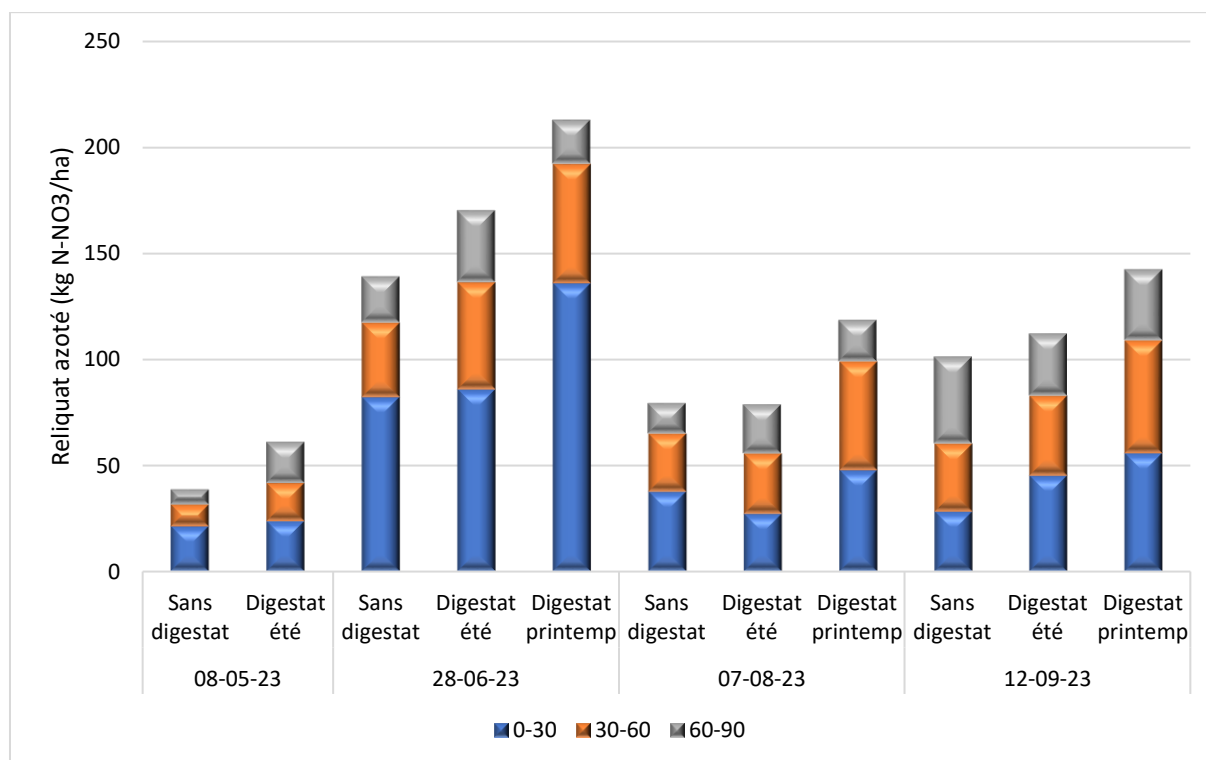


Figure 15. Reliquats d'azote minéral mesurés en parcelles de sol nu en cours de saison de culture des pommes de terre sans engrais, avec digestat d'été ou de printemps (Marbisoux, 2023)

2.3.4 Reliquats azotés après récolte

Pour trois essais, selon les analyses statistiques, l'interaction entre les deux formes de fertilisation a un effet significatif sur les quantités d'azote minéral mesurées après la récolte. Dans les deux autres essais, cet effet n'est pas significatif (Erquelinnes : p-valeur = 0.9394 et Marbisoux 2023 : p-valeur = 0.3392).

Fertilisation organique

Dans tous les essais, les analyses statistiques ont mis en évidence un impact significatif de la fertilisation organique sur le reliquat post-récolte qui peut être assimilé à la mesure de l'azote potentiellement lessivable⁵ (APL).

La Figure 16 montre que les valeurs observées pour les trois objets à Ligny sont très élevées, dépassant largement le seuil d'intervention fixé à 144 kg N-NO₃/ha (Tableau 15) à cette date pour cet essai, à mettre en lien avec le déficit de prélèvement illustré par les faibles rendements présentés plus hauts. Dans tous les essais, le digestat de printemps (moyenne de toutes les modalités 'fertilisation minérale') entraîne un reliquat azoté significativement plus élevé par rapport aux autres objets (apport d'été et fertilisation uniquement minérale). Dans les essais de Ligny et Marbisoux_23, les modalités avec digestat appliqué en été ont conduit à un reliquat azoté inférieur à celui du traitement sans digestat, bien que cette différence ne soit pas significative. A l'exception de l'essai d'Erquelinnes, l'apport de printemps a entraîné un reliquat supérieur à la référence⁶ annuelle pour la classe A5 (pomme de terre).

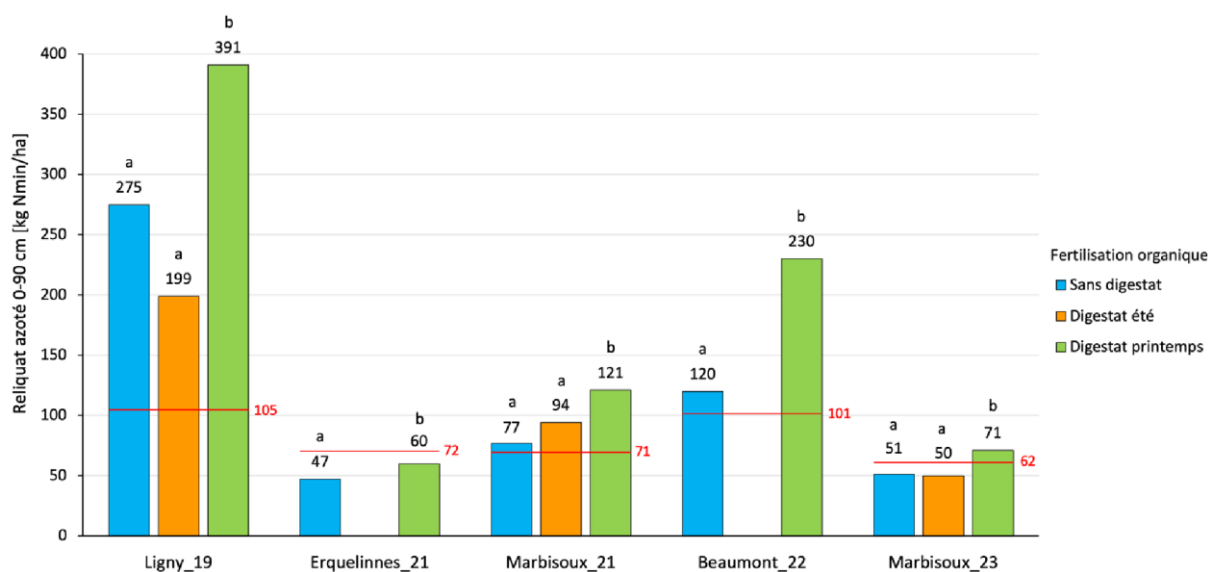


Figure 16. Reliquats d'azote minéral mesurés après récolte des pommes de terre en fonction de la fertilisation organique. Les lignes rouges représentent la référence APL (médiane⁶)

Les mesures de reliquat post-récolte élevées suite à l'apport de digestat au printemps peuvent s'expliquer, pour les modalités complétées avec une dose de minéral trop élevée, par une fourniture d'azote ammoniacal plus importante que les besoins de la culture en début du cycle de croissance et tout au long de la culture. Entre le moment de l'épandage du digestat et une dizaine de jours après l'émergence des plants, l'absorption d'azote par la culture est nulle. Par la suite, le prélèvement d'azote par le système racinaire sera progressif. Ce dernier est

⁵ Les essais Erquelinnes_21 et Beaumont_22 ont dû être échantillonnés à une date légèrement antérieure au début de la période réglementaire d'APL, à la demande des agriculteurs désireux de semer le froment rapidement.

⁶ La référence est déterminée par la médiane des valeurs mesurées annuellement dans les parcelles du SSA, à ne pas confondre avec le seuil de conformité APL qui est le centile 66 augmenté d'une marge de tolérance.

également limité en profondeur. Dès lors, l'azote non absorbé par la culture peut être soumis à la lixiviation en cas d'épisodes pluvieux.

L'apport de digestat en été n'entraîne pas d'augmentation significative des reliquats azotés par rapport à une situation sans apport (Figure 17 - annexe 5.2 page 39). Tout au long du cycle de croissance, la quantité d'azote disponible pour la culture était inférieure avec l'apport d'été comparé à l'apport de printemps. Le processus de minéralisation à la suite de la destruction du couvert enrichi en azote permet une libération progressive de l'azote, mieux synchronisée avec les besoins de la culture et réduisant les risques de pertes par lixiviation.

Tableau 11. Médiane, centile 66 et seuil d'intervention des reliquats azotés mesurés dans les parcelles du SSA en fonction des dates de prélèvement

	Ligny 2019	Marbisoux 2021	Erquelinnes 2021	Beaumont 2022	Marbisoux 2023
Date de prélèvement APL post-récolte	29/10/19	28/10/21	12/10/21	6/10/22	1/12/23
Médiane (Référence APL) (0-90cm) [kg NO ₃ /ha]	105	71	72	101	62
Centile 66 (0- 90cm) [kg NO ₃ /ha]	123	81	84	116	74
Seuil d'intervention (0- 90cm) [kg NO ₃ /ha]	144	96	99	135	89

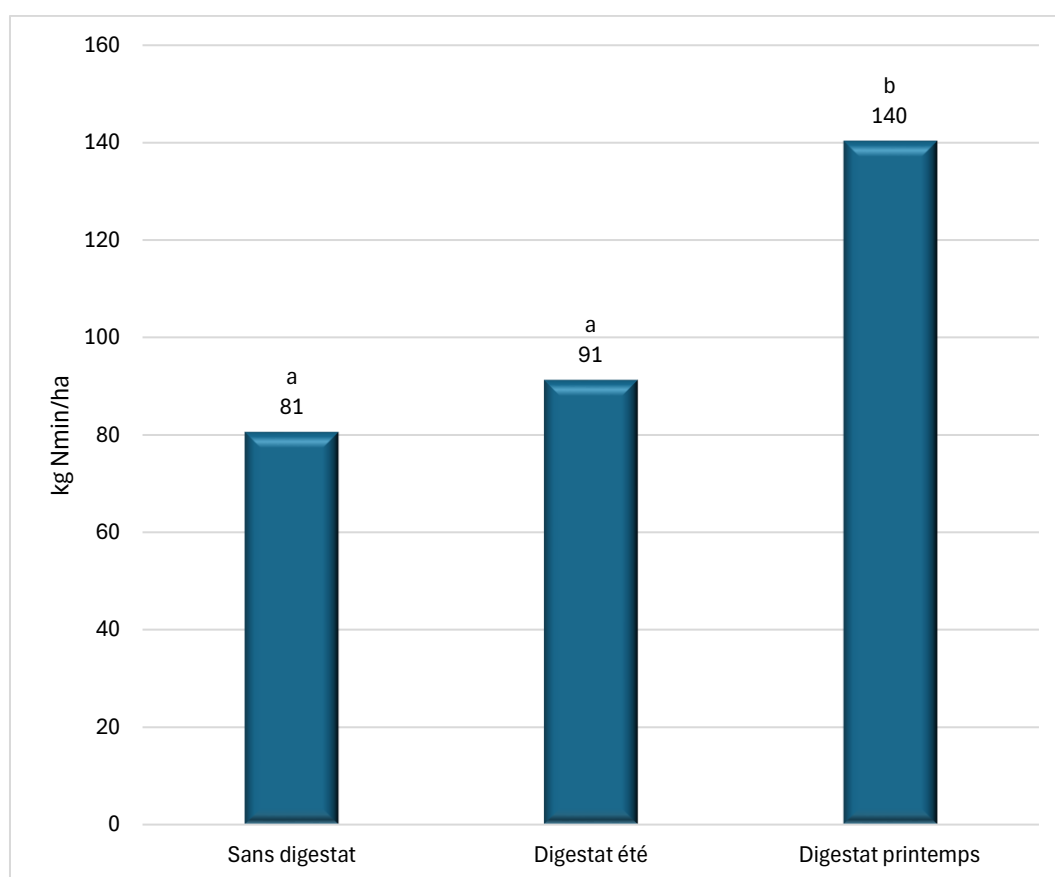


Figure 17. Reliquat d'azote minéral moyen de tous les essais, excepté Ligny_19⁷, mesurés sur 90 cm après récolte des pommes de terre et exprimés en fonction de la fertilisation organique (2021-2023)

⁷ Des facteurs extérieurs à l'essai ont entraîné un déficit de production conséquent qui a fortement impacté les reliquats post-récoltes (cf. 2.2.3).

Fertilisation minérale

Dans tous les essais, les analyses statistiques ont mis en évidence un impact significatif de la fertilisation minérale sur les valeurs d'APL.

La fertilisation minérale a engendré des reliquats azotés croissants (Figure 18). Pour les essais de Marbisoux, la fertilisation minérale augmente significativement le reliquat post-récolte à partir d'un apport de 150 kg N/ha. A Ligny, cet apport est de 100 kg N/ha alors qu'il est de 180 kg N/ha à Erquelinnes et Beaumont. Comme pour la fertilisation organique, toutes les valeurs mesurées à Ligny sont supérieures à la médiane des mesures de référence APL. A Erquelinnes, seul l'apport de 180 kg N/ha entraîne un reliquat supérieur à la référence APL. A Marbisoux_23, ce sont les fertilisations au-delà de 150 kg N/ha qui entraînent un reliquat supérieur à la référence. Lorsque les comparaisons des reliquats mesurés sont faites avec le seuil d'intervention, toutes les valeurs mesurées à Erquelinnes et Marbisoux_23 sont conformes. Les seuils de (non-) conformité respectifs sont situés à 99 et 89 kg N-NO₃/ha (Tableau 11).

Les valeurs d'APL très élevées mesurées dans l'essai de Ligny s'expliquent à nouveau par un rendement en tubercules nettement inférieur à la prévision. En effet, les conditions de sécheresse durant cette expérimentation ont engendré une sénescence précoce des plants de pommes de terre. Cela a mené à une moindre absorption de l'azote par la culture. Une quantité significative d'azote est restée dans le sol à la fin de la saison de croissance. Ce surplus d'azote se manifeste sous forme de reliquats azotés élevés.

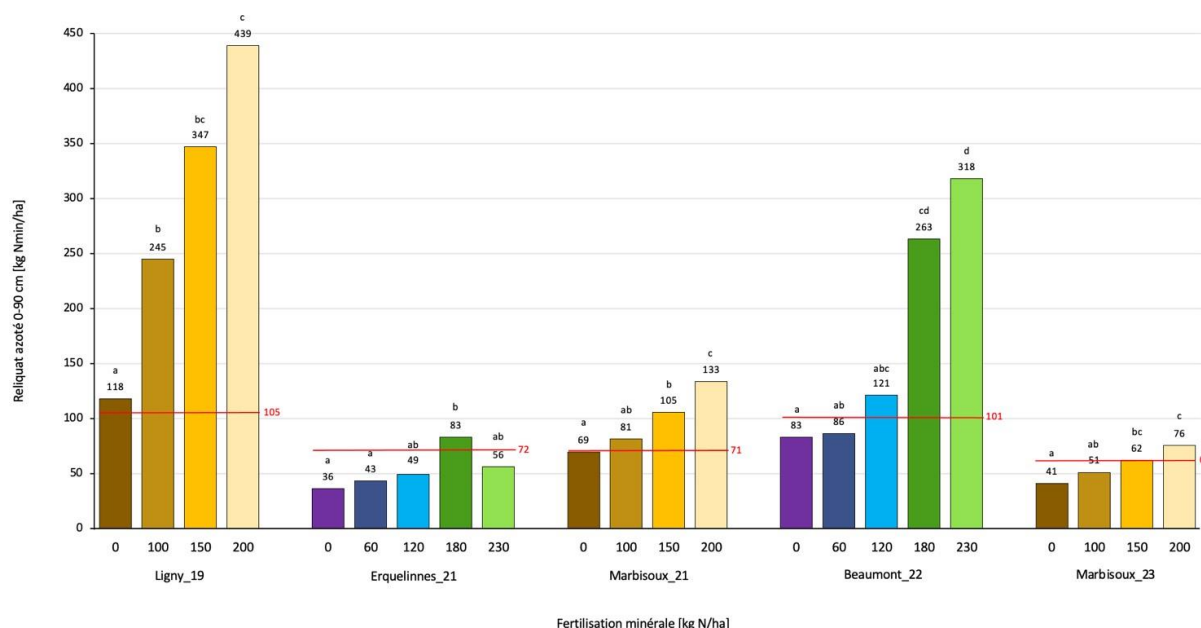


Figure 18. Reliquats d'azote minéral mesurés après récolte des pommes de terre en fonction de la fertilisation minérale. Les lignes rouges représentent les références APL

En extrapolant, sur base des courbes de tendances de chaque essai, les mesures de reliquats de tous les essais pour toutes les valeurs de fertilisation minérales testées, on obtient une évolution significative du reliquat en fonction de la fertilisation minérale (Figure 19), avec dès la quatrième dose d'engrais une augmentation significative de l'APL par rapport au témoin non fertilisé (cf. annexe 5.2 page 39).

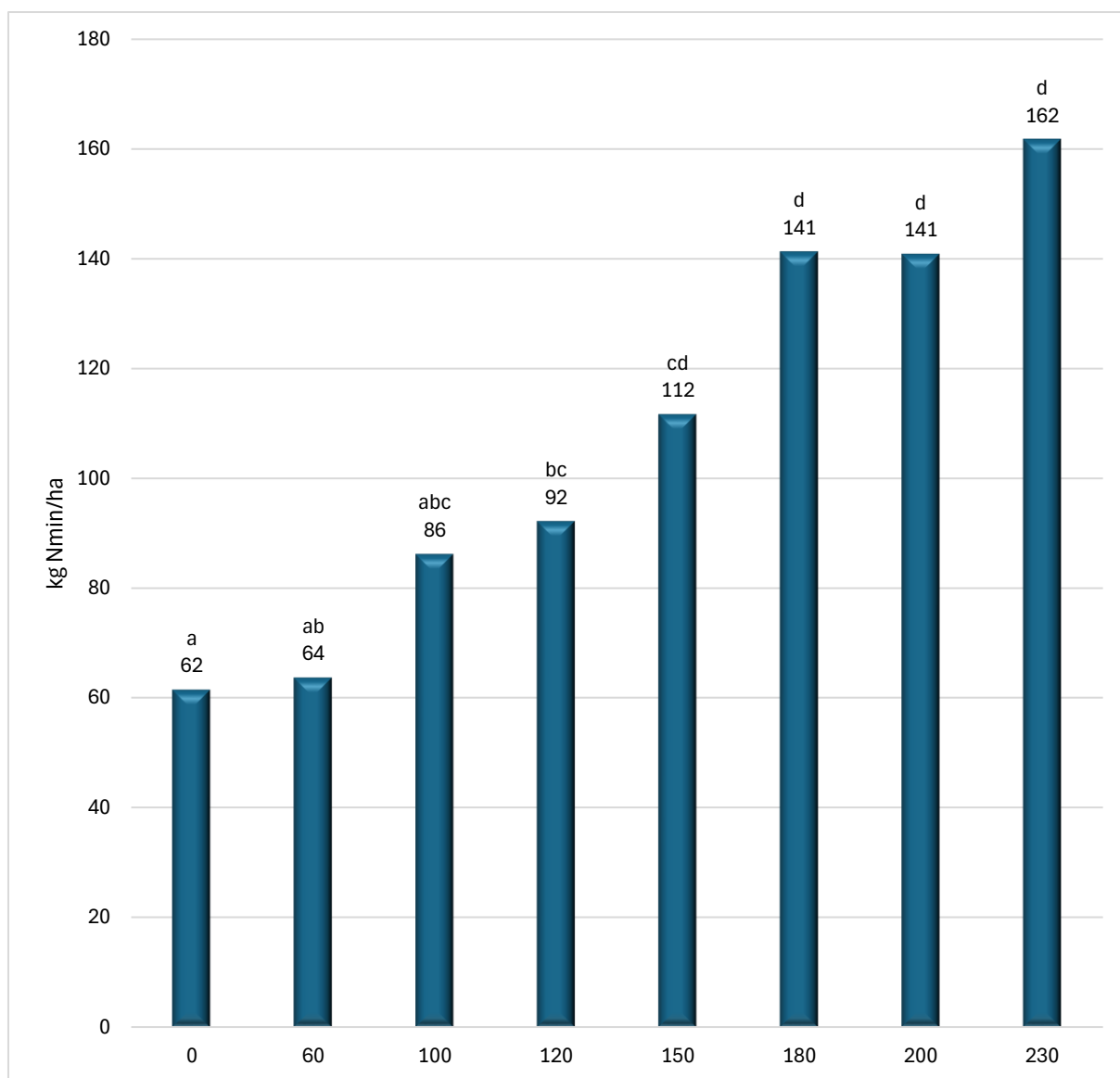


Figure 19. Reliquat d'azote minéral moyen de tous les essais, excepté Ligny_19⁸, mesurés sur 90 cm après récolte des pommes de terre et exprimés en fonction de la fertilisation minérale (2021-2023)

⁸ Des facteurs extérieurs à l'essai ont entraîné un déficit de production conséquent qui a fortement impacté les reliquats post-récoltes (cf. 2.2.3).

Interaction entre la fertilisation organique et minérale

Pour chaque essai et chaque modalité de la fertilisation organique, la première dose d'azote qui entraîne un reliquat azoté supérieur à la référence APL (médiane) a été calculée. Ces doses d'azote sont en moyenne de 126, 95 et 67 kg N/ha pour la modalité sans digestat, l'apport d'été et l'apport de printemps, respectivement. Afin de limiter le reliquat en période d'APL, le niveau de fertilisation azotée à combiner avec l'apport de digestat au printemps doit être plus faible qu'avec l'apport d'été. En reprenant l'extrapolation des mesures de reliquats de tous les essais pour toutes les valeurs de fertilisation minérales testées, on observe en effet que l'apport de digestat de printemps entraîne une augmentation plus rapide du reliquat lorsque la fertilisation complémentaire augmente (Figure 20). Cette interaction entre fertilisation minérale et organique calculée sur l'ensemble des essais (excepté Ligny_19) n'est cependant pas significative (p-valeur = 0.459 - annexe 5.2 page 39).

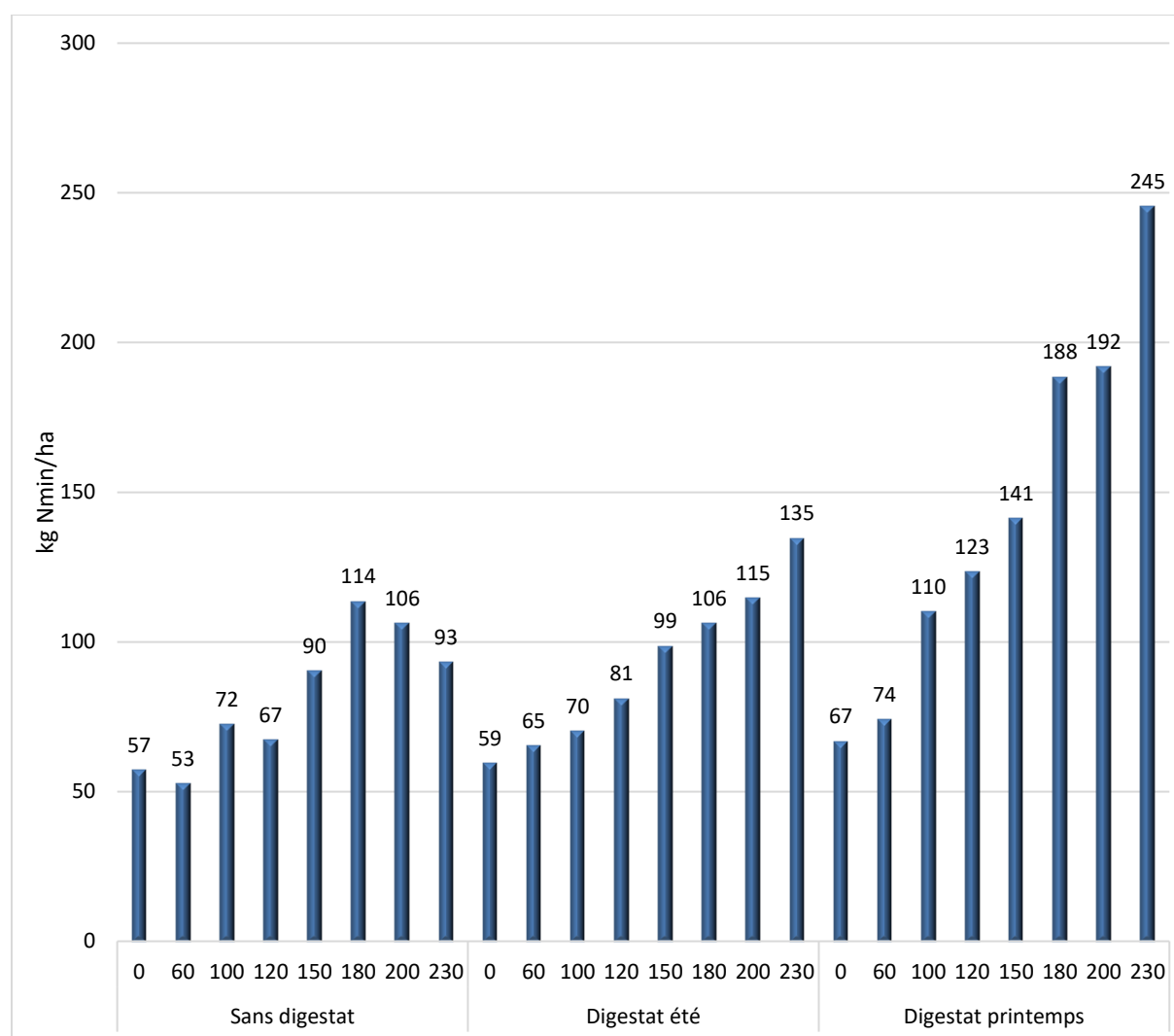


Figure 20. Reliquat d'azote minéral moyen de tous les essais⁹, mesurés sur 90 cm après récolte des pommes de terre et exprimés en fonction de la fertilisation minérale (2021-2023)

⁹ Excepté Ligny_19, où des facteurs extérieurs à l'essai ont entraîné un déficit de production conséquent qui a fortement impacté les reliquats post-récoltes (cf. 2.2.3).

2.4 Intérêt économique

Pour chaque niveau du facteur « Fertilisation organique » dans tous les essais, les valeurs économiques ont été calculées pour la production obtenue avec la dose d'azote qui maximise le rendement, en plus de toutes les autres doses d'azote. Dans chaque essai, la valeur économique la plus élevée a été obtenue avec la dose d'azote qui maximise le rendement (lignes en vert sur la Figure 38). Pour cette raison, la comparaison entre les différents niveaux de la fertilisation organique d'un essai sera basée sur la valeur économique atteinte avec le rendement le plus élevé. La valeur économique atteinte avec le digestat d'été est toujours supérieure à celle obtenue avec la modalité sans digestat ainsi qu'avec l'apport de digestat au printemps, à l'exception de l'essai de Ligny. Quant à l'apport printanier, il a conduit à une valeur économique supérieure à celle de la modalité sans digestat, à l'exception des essais de Marbisoux. Ces conclusions sont également valables pour les valeurs économiques calculées avec les prix de vente des pommes de terre du mois de février. Pour cette raison, seules les valeurs économiques calculées pour le mois de décembre sont illustrées sur le Tableau 12.

L'approche économique proposée semble montrer que l'apport de digestat permet d'atteindre une valeur économique plus élevée malgré une fertilisation minérale réduite. Cela s'explique par un rendement maximal atteint avec le digestat (été ou printemps) systématiquement plus élevé que celui atteint avec la fertilisation minérale uniquement, excepté pour l'apport de digestat de printemps lors de l'essai de Marbisoux_23.

Tableau 12. Valeurs économiques de la production des différents essais en fonction des fertilisations organique et minérale. Les lignes surlignées en vert correspondent aux doses d'azote de chaque niveau du facteur « Fertilisation organique » qui maximisent le rendement, et à la valeur économique associée à ce rendement

Ligny 2019			
Fertilisation organique	Fertilisation minérale (kg N/ha)	Rendement (t/ha)	Valeur économique décembre 2019 (€/ha)
digestat été	0	26,7	3177
	100	29,0	3374
	109	29,1	3380
	150	28,7	3301
	200	27,4	3090
digestat printemps	0	32,0	3847
	100	31,3	3668
	150	30,6	3542
	200	29,8	3389
sans digestat	0	22,1	2783
	100	24,7	3029
	150	26,1	3152
	200	27,4	3276

Marbisoux 2021			
Fertilisation organique	Fertilisation minérale (kg N/ha)	Rendement (t/ha)	Valeur économique décembre 2021 (€/ha)
digestat été	0	45,8	5947
	100	52,2	6704
	128	52,5	6715
	150	52,4	6678
	200	50,6	6384
digestat printemps	0	45,6	5925
	100	51,9	6652
	117	52,0	6659
	150	50,9	6477
	200	50,6	6384
sans digestat	0	39,8	5327
	100	45,7	6014
	150	48,6	6357
	200	51,6	6700

Erquelinnes 2021			
Fertilisation organique	Fertilisation minérale (kg N/ha)	Rendement (t/ha)	Valeur économique décembre 2021 (€/ha)
digestat printemps	0	52,6	8055
	60	55,8	8495
	120	56,8	8595
	180	55,7	8357
	230	53,1	7899
sans digestat	0	47,1	7395
	60	50,9	7928
	120	51,4	7943
	140	51,7	7969
	180	51,6	7911
	230	50,7	7717

Beaumont 2022			
Fertilisation organique	Fertilisation minérale (kg N/ha)	Rendement (t/ha)	Valeur économique décembre 2022 (€/ha)
digestat printemps	0	44,2	10092
	60	48,4	10933
	100	49,2	11028
	120	49,0	10936
	180	46,0	10100
	230	40,8	8762
sans digestat	0	39,9	9307
	60	41,2	9468
	120	42,5	9628
	180	43,8	9789
	230	44,9	9922

Marbisoux 2023			
Fertilisation organique	Fertilisation minérale (kg N/ha)	Rendement (t/ha)	Valeur économique décembre 2023 (€/ha)
digestat été	0	46,9	9153
	100	53,1	10288
	128	53,4	10319
	150	53,2	10255
	200	51,3	9822
digestat printemps	0	49,4	9659
	93	51,2	9920
	100	51,1	9893
	150	51,0	9819
	200	50,4	9640
sans digestat	0	40,2	8040
	100	48,2	9533
	150	52,1	10259
	200	50,8	9945

3 Synthèse et conclusion

3.1.1 Production

Intérêt agronomique

La comparaison des rendements obtenus avec les différents traitements (digestat d'été, de printemps, sans digestat) en fonction des doses croissantes d'azote permet de quantifier l'impact sur la production des apports de digestat et d'engrais minéral. En utilisant les équations de courbes de réponse de chaque essai¹⁰ pour extrapoler les réponses de rendements (et reliquats) à toutes les doses d'engrais azoté testées, on obtient les courbes de réponses moyennes présentée à la Figure 21. Attention, ce graphique de synthèse fait intervenir des résultats de différents sites où toutes les modalités n'ont pas été testées. Or, les conditions de expérimentales influencent les résultats (cf. critique méthodologique ci-après). Des ces résultats plusieurs enseignements peuvent toutefois être tirés.

- Les productions uniquement avec engrais minéral (sans digestat) sont (faiblement mais) régulièrement croissantes en fonction des doses apportées.
- L'apport de digestat de biométhanisation en été permet d'obtenir des rendements élevés. Le coefficient équivalent engrais minéral (K_{eq}) est en moyenne de 54 %. En moyenne sur les deux essais, lorsqu'on applique 30 m³ de digestat, équivalent à 170 kg N/ha, on obtient un rendement correspondant à 90 kg d'azote sous forme d'engrais minéral. La courbe de réponse de la Figure 21 évalue le complément minéral nécessaire à 129 unités d'azote pour atteindre le maximum. Un autre intérêt du digestat apporté avant le semis de la culture intermédiaire semble être lié au fait que son efficacité est en partie intégrée dans l'effet azote de celle-ci. En effet, l'apport avant CIPAN permet une libération progressive de l'azote après destruction de celle-ci et une valorisation potentiellement plus importante du digestat *via* la minéralisation d'une partie de la fraction organique.
- L'apport de digestat au printemps avant l'implantation des pommes de terre a un coefficient d'équivalence plus élevé, à 59 % en moyenne sur les essais. La valorisation rapide de l'azote ammoniacal a en effet un impact rapide sur le rendement, parfois sans nécessité de complément minéral. En moyenne, l'apport de 34 m³ de digestat (181 kg N/ha) donne un rendement équivalent à 107 kg d'azote sous forme d'engrais minéral. La courbe de réponse de la Figure 21 évalue le complément minéral nécessaire à 109 unités d'azote pour atteindre le maximum.

Les chiffres de complément minéral nécessaires pour atteindre l'optimum de rendement sont théoriques. D'une manière générale, les apports de digestats permettent d'atteindre des rendements élevés avec un complément minéral limité. Les analyses statistiques montrant régulièrement que la première dose d'engrais complémentaire à la matière organique donne une production statistiquement semblable au maximum observé.

Un autre aspect intéressant de l'apport de digestat est l'impact significatif sur la proportion de calibres supérieurs à 50 mm. Cette observation a été répétée sur la plupart des modalités testées sur tous les sites expérimentaux.

¹⁰ Excepté Ligny 19, où des facteurs extérieurs à l'essai ont entraîné un déficit de production conséquent qui a fortement impacté les résultats (cf. 2.2.3)

Critique méthodologique

Dans plusieurs parcelles d'essai, les conditions de production ont permis d'atteindre des rendements relativement élevés, et ce même en absence d'apport de fertilisant. Cela entraîne des coefficients apparents d'utilisation de l'azote faibles, compliquant la détermination de l'efficacité des apports organiques. De plus, pour une évaluation plus pertinente de l'impact des apports de digestat, il serait méthodologiquement plus judicieux d'ajuster les volumes épandus en fonction de la teneur en azote ammoniacal du digestat. Cela permettrait d'apporter des quantités équivalentes d'azote ammoniacal, avant la mise en place de la CIPAN et avant la plantation des pommes de terre. L'azote organique du digestat étant peu minéralisé l'année suivant l'épandage, seule la fraction ammoniacale influence les facteurs étudiés, comme le rendement et les reliquats azotés. Lors des essais, les teneurs en azote ammoniacal du digestat appliqué en été et au printemps différaient sensiblement, ce qui a pu affecter les résultats. Un ajustement des volumes épandus permettrait de mieux isoler l'effet de la période d'application sur les paramètres mesurés et d'obtenir des résultats plus fiables et pertinents.

La comparaison entre les apports de digestat en été et au printemps a été étudiée dans trois essais. Tous ont été touchés par des conditions climatiques par certains aspects défavorables à certains facteurs étudiés. Cela a réduit la possibilité d'observer pleinement leurs effets. Ce nombre forcément limité d'essais évaluant conjointement l'apport de digestat en été et au printemps a représenté une faiblesse méthodologique. Pour obtenir des conclusions plus fiables et généralisables, il serait nécessaire de mener de nouvelles expérimentations, dans des conditions météorologiques différentes avec des impacts différents sur les rendements et le lessivage des nitrates.

3.1.2 Impact environnemental

Interculture

Pendant l'interculture précédant la pomme de terre, en moyenne, 22 % de l'azote du digestat apporté en été avant CIPAN est valorisé dans la biomasse de celle-ci. En fonction de la composition du couvert et de sa gestion phytotechnique entre 20 et 50 % de l'azote ainsi prélevé est à nouveau disponible pour la culture suivante, c'est-à-dire entre 5 et 11 % de l'azote du digestat épandu.

Par rapport au témoin, l'APL de l'interculture avant PDT est également augmenté, d'une quantité d'azote équivalente à environ 5% de l'azote total du digestat apporté en été.

L'écart de reliquat mesuré à la plantation de la pomme de terre montre que l'apport d'été impacte la disponibilité de l'azote à ce moment par son augmentation significative de 15% en moyenne sur les trois essais.

Reliquats post-récolte et APL

Lorsque la production de pommes de terre est conforme aux attentes (rendement correct), les modalités avec fertilisation uniquement minérale ou associant digestat d'été et engrais minéral, présentent des reliquats post-récolte qui restent conformes sur une plage de fertilisation minérale relativement large (courbe évoluant graduellement à la hausse - Figure 21).

Par contre, en fertilisation de printemps associant du digestat et un complément minéral, le reliquat augmente rapidement avec la fertilisation azotée. Il est donc important de modérer ce complément d'engrais minéral en cas d'apport de printemps en réalisant un reliquat avant culture et en tenant compte de l'efficacité du digestat proche de l'ordre de 60%.

Le risque d'APL non conforme est d'autant plus élevé que la quantité d'azote sous forme de digestat est élevée et/ou avec une teneur élevée en N ammoniacal. La Figure 21 montre que pour les modalités avec de printemps, à l'inverse de la fertilisation purement minérale, le rendement évolue peu quand on approche de l'optimum de rendement augmente la dose d'engrais minéral complémentaire, tandis que le reliquat augmente rapidement et donc le risque d'APL non conforme.

Évaluation quantitative

3.1.3 Conclusion

L'utilisation de digestat pour fertiliser la culture de pommes de terre semble une manière pertinente de valoriser ce sous-produit de la biométhanisation. Les rendements sont améliorés avec une réduction significative de la fertilisation azotée minérale. La comparaison des traitements organiques en fonction de doses croissantes d'azote permet de mettre en évidence l'intérêt pour l'agriculteur de combiner un apport organique de type digestat avec une fertilisation minérale correctement adaptée pour éviter les apports inutiles et le risque d'APL non conforme. En cas d'apport de printemps, l'impasse sur le complément minéral peut dans certains cas s'avérer être possible. Dans ce cas mais également de manière générale, un conseil de fertilisation basé sur un reliquat sortie d'hiver (Rsh) permet de combiner une production optimale tout en limitant le risque de perte d'azote vers la ressource en eau.

Les différentes expérimentations montrent cependant que chaque essai a ses propres caractéristiques et que la variabilité issue des différents facteurs qui influencent les résultats entraîne une variabilité parfois importante sur ceux-ci. Le coefficient moyen déterminé par les expérimentations peut être supérieur ou inférieur de manière significative en fonction de paramètres liés à la parcelle ou au produit épandu, mais aussi en fonction de paramètres liés aux pratiques de l'agriculteur (ou de l'entrepreneur) : la date de l'apport et la technique d'épandage, le calcul et les modalités d'apport du complément minéral, la conduite de la culture (notamment la phyto-protection), etc. Il convient de tenir compte de tous les leviers disponibles pour rendre l'utilisation du digestat de biométhanisation la plus efficiente pour la production et la moins impactante pour la ressource en eau.

A retenir

Les coefficients d'équivalence minérale moyens déterminés par les essais :

- Kéq été = 54%
- Kéq printemps = 59%

La production de PDT fertilisée avec du digestat est possiblement plus élevée avec du digestat et comporte une proportion plus élevée de calibres supérieurs à 50 mm.

Le digestat d'été + CIPAN correctement installée = sécurité rendement et APL

Le digesta printemps est plus efficace, mais plus risqué pour l'APL → réaliser un conseil ferti sur base de Rsh et ne pas dépasser 35m³ + 80-100 uN.

Il existe une variabilité en fonction du produit (teneur en N et N-NH₄), mais aussi des conditions d'épandage et pédoclimatiques.

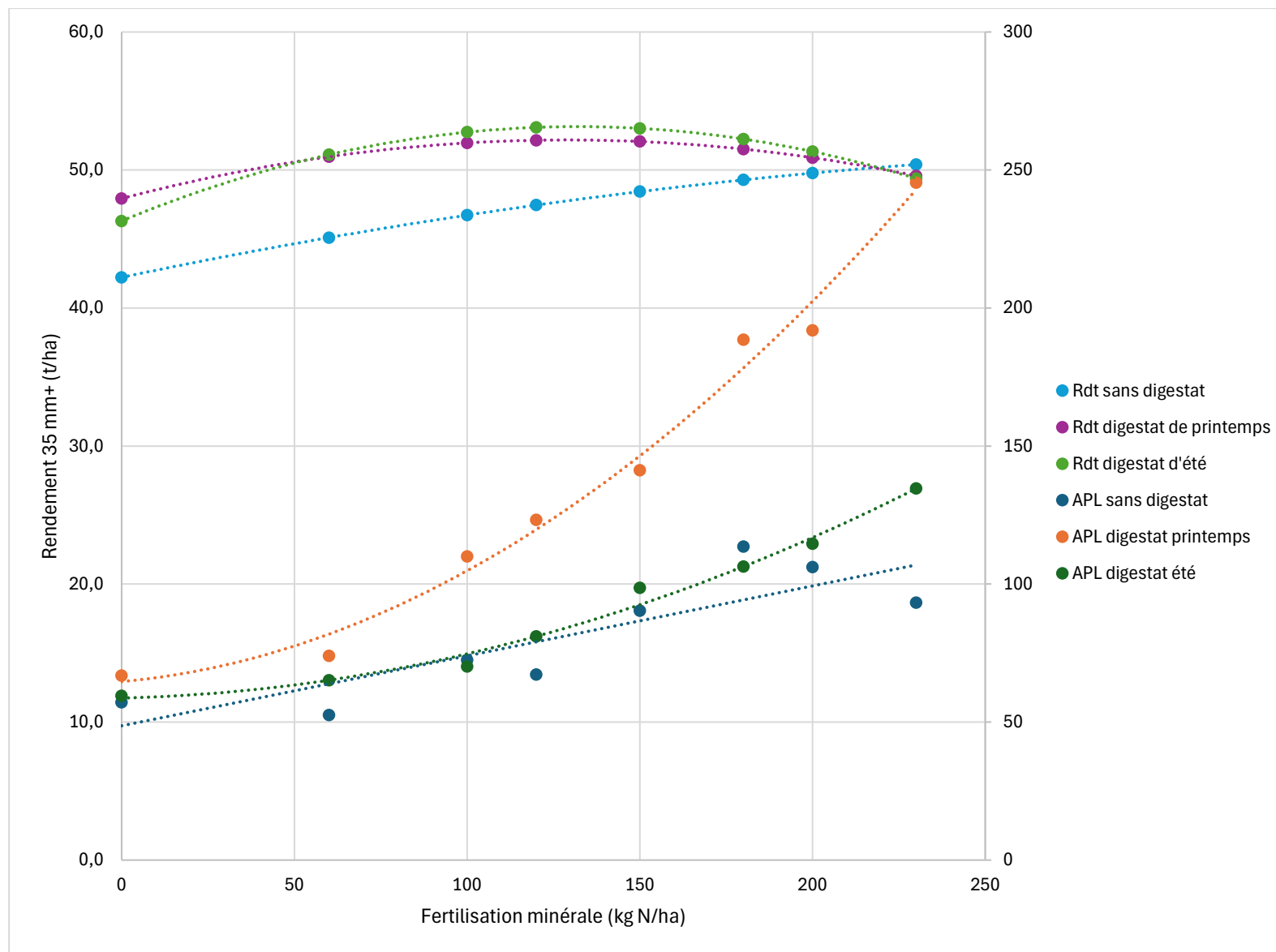


Figure 21. Synthèse des rendements en pommes de terre et des reliquats azotés post-récolte en fonction des apports en engrais minéral (Moyennes 2021-2023)

4 Bibliographie

Albornoz, F. (2016). Crop responses to nitrogen overfertilization : A review. *Scientia Horticulturae*, 205, 79-83. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.04.026>

Chambenoit, C., Laurent, F., Machet, J.-M., & Scheurer, O. (2002). Fertilisation azotée de la pomme de terre : guide pratique. INRA Editions.
<https://books.google.fr/books?id=bk0xlKa72HoC>

Degan, F., Vericel, G., Hannon, C., & Gravouelle, J.-M. (2019). Azote et pomme de terre - Bien évaluer les besoins pour maîtriser les apports. ARVALIS.
https://www.arvalis.fr/sites/default/files/imported_files/pdt_ferti_plaquette_2019_01_21_v8700864572317011956.pdf

Gravouelle, J.-M. (2007). Pomme de terre - Adapter l'itinéraire à l'utilisation culinaire. Perspectives Agricoles. https://www.perspectives-agricoles.com/sites/default/files/imported_files/333_3984390622018093314.pdf

Jenkins, P. D., & Nelson, D. G. (1992). Aspects of nitrogen fertilizer rate on tuber dry-matter content of potato cv. Record. *Potato Research*, 35(2), 127-132.
<https://doi.org/10.1007/bf02357605>

Justes E. & Mary B. & Nicolardot B., 2009. Quantifying and modelling C and N mineralization kinetics of catch crop residues in soil: Parameterization of the residue decomposition module of STICS model for mature and non mature residues. *Plant and soil*, pp. 325:171–185.

Reibel, A. (2018). Valorisation agricole des digestats : Quels impacts sur les cultures, le sol et l'environnement ? La Méthanisation en Provence-Alpes-Côte D'Azur. https://www.geres.eu/wp-content/uploads/2019/10/ARE1805.201.ENV_.VALOMOI.Etude_Digestats_VF.pdf

Taiz, & Zeiger. (2003). Plant physiology. 3rd edn. *Annals Of Botany*, 91(6).
<https://doi.org/10.1093/aob/mcg079>

De Clerck T., 2024. Panorama de la Biométhanisation en Wallonie, ÉDITION 2024.
https://www.valbiom.be/sites/default/files/tool/file/lay-panorama-biometh-2024-ecran-v3_0.pdf

Vos, J. (1999). Split nitrogen application in potato : effects on accumulation of nitrogen and dry matter in the crop and on the soil nitrogen budget. *Journal Of Agricultural Science*, 133(3), 263-274. <https://doi.org/10.1017/s0021859699006966>

5 Annexes

5.1 Extrait BD Requasud

Tableau 13. Valeurs moyennes des teneurs en N, P, K et CaO d'un digestat de biométhanisation en Wallonie (Source : Requasud, 2021)

Catégorie	MS %	Nt % MF	NH4 %MF	P2O5 mg/kg MF	K2O mg/kg MF	CaO mg/kg MF
Biodigestat complet	6,8	0,49	0,26	886	4132	2573
Biodigestat phase liquide	4,9	0,47	0,27	920	2815	2158
Biodigestat phase solide	24,7	0,57	0,12	1951	4837	8344
Biodigestat phase solide séchée	89	2,21	0,05	14412	35406	31302

5.2 Reliquats azotés – synthèse pluriannuelle

Response Log(APL)

Effect Summary

Source	Logworth	PValue
Ferti N	19,495	0,00000
Traitement	13,419	0,00000
Traitement*Ferti N	0,338	0,45890

Summary of Fit

RSquare	0,794387
RSquare Adj	0,764456
Root Mean Square Error	0,286299
Mean of Response	4,465541
Observations (or Sum Wgts)	182

REML Variance Component Estimates

Random Effect	Var Ratio	Var Component	Std Error	95% Lower	95% Upper	Wald p-Value	Pct of Total
Essai/Site	2,7203267	0,222977	0,1839615	-0,137581	0,5835349	0,2255	71,420
Bloc	0,0886065	0,0072628	0,0089947	-0,010366	0,0248921	0,4194	2,326
Residual		0,081967	0,0094236	0,0662316	0,1040938		26,254
Total		0,3122068	0,1843691	0,1276501	1,59189		100,000

-2 LogLikelihood = 148,87035675

Note: Total is the sum of the positive variance components.

Total including negative estimates = 0,3122068

Fixed Effect Tests

Source	Nparm	DF	DFDen	F Ratio	Prob > F
Traitement	2	2	152,9	38,0732	<,0001 *
Ferti N	7	7	151,5	21,8524	<,0001 *
Traitement*Ferti N	14	14	151,4	0,9974	0,4589

Effect Details

Traitement

LSMeans Differences Tukey HSD

Differences are on transformed Y's

$\alpha=0,050$ $Q=2,36679$

Level	Least Sq Mean
Digestat printemps A	102,95462
Digestat été B	78,37462
Sans digestat B	67,48300

Levels not connected by same letter are significantly different.

Ferti N

LSMeans Differences Tukey HSD

Differences are on transformed Y's

$\alpha=0,050$ $Q=3,07375$

Level	Least Sq Mean
230 A	112,11848
180 A	110,14791
200 A	107,21318
150 A B	89,39996
120 B C	75,20211
100 B C D	69,62656
60 C D	58,36986
0 D	54,65239

Levels not connected by same letter are significantly different.

Traitement*Ferti N

Essai/Site

Bloc