

OPTIMISATION DE LA FERTILISATION AZOTÉE A L'ECHELLE DES SYSTEMES DE CULTURE DANS UN CONTEXTE ECONOMIQUE TENDU

Aristide Olou¹, Luc Champolivier², Francesca Degan¹, Vincent Lecomte², François Taulemesse¹,
Grégory Véricel¹, Valérie Leveau¹

¹ ARVALIS - Institut du végétal, 3 rue Joseph et Marie Hackin 75016 PARIS

² TERRES INOVIA, 11 Rue de Monceau 75008 PARIS

Résumé :

La volatilité du prix des engrais, les risques de pénurie, comme les préoccupations environnementales et l'évolution de la réglementation, nécessitent une gestion toujours plus poussée de la fertilisation azotée. La recherche de l'efficacité technique reste le point clé, mais l'efficacité économique doit prendre sa place. Aujourd'hui, la gestion de la fertilisation se raisonne essentiellement culture par culture, mais la question est posée d'une optimisation annuelle au niveau du système de culture ou de l'exploitation. Cet article propose une méthodologie dont l'objectif est de déterminer, à l'échelle d'un système de culture à assolement constant, la quantité d'azote à apporter sur chaque culture pour viser un optimum technico-économique global. Elle est basée sur la construction de courbes de réponse à l'azote des cultures de l'assolement et sur l'optimisation de la marge brute « azote » totale du système sous contraintes de disponibilité d'azote. Une application est proposée au travers de simulations portant sur un système de culture non irrigué en Champagne Berrichonne. Les résultats obtenus confirment que les optimums techniques et économiques sont confondus quand les prix de ventes des cultures sont suffisamment rémunérateurs, sous l'hypothèse d'une absence de contraintes de disponibilité. A l'inverse, en contexte économique tendu avec des prix de vente des cultures peu rémunérateurs, il importe de viser l'optimum technico-économique qui implique, dans la plupart des cas, de réduire les doses d'azote par rapport aux optimums techniques dans des proportions variables. Les réductions de dose d'azote en contexte économique tendu peuvent toutefois être limitées par la prise en compte de la rémunération de la teneur en protéines des céréales à paille et de la teneur en huile des oléagineux afin que les objectifs quantitatifs et qualitatifs de la production soient atteints.

Mots clés : fertilisation azotée, pénurie, système de culture, courbe de réponse, optimum technico-économique

1. Introduction

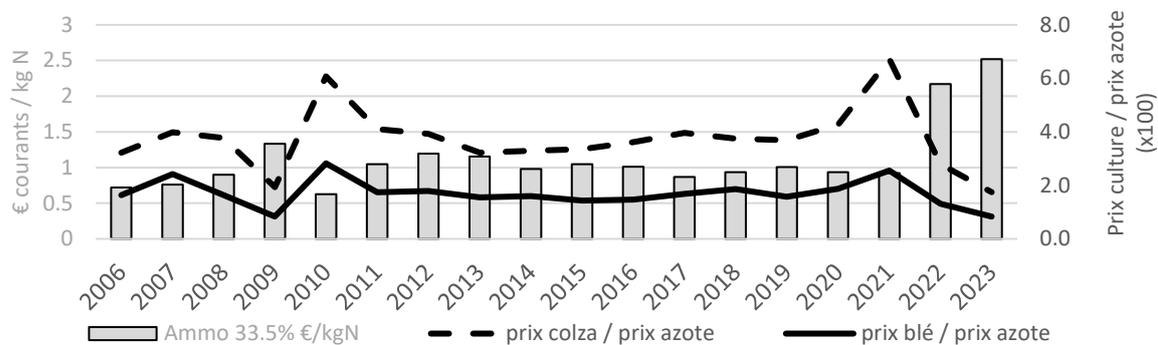
1.1. Contexte

Les conditions de marché de ces dernières années, avec des prix d'achat des engrais relativement faibles et des prix de vente des cultures rémunérateurs, permettaient aux agriculteurs de raisonner la fertilisation azotée de leurs cultures à l'optimum technique sans pénaliser les résultats économiques. Des événements récurrents peuvent bouleverser cet équilibre. Durant la campagne 2008-2009, les prix des engrais avaient augmenté en raison du prix du gaz naturel, de la hausse de la demande mondiale et des capacités de production limitées (Cohan et al., 2009) : l'ammonitrate (33.5%) s'achetait autour de 1.3 €/kg N rendu agriculteur alors que la moyenne 2004-2008 était de 0.7 €/kg N. Dans le même temps, le blé tendre (resp. le colza) s'échangeait en moyenne à 112 €/t (resp. à 258 €/t). Plus récemment, l'envolée du cours du gaz naturel à partir de l'automne 2021 renforcée par le conflit russo-ukrainien a conduit à de fortes hausses du prix des engrais azotés. En effet, les prix ont été multipliés par 3 voire 4 au pic de la crise pour atteindre des niveaux records (Carel et Leveau, 2022). Durant la campagne 2023, le prix moyen d'achat de l'azote est situé dans une fourchette entre 2.0 et 2.5 €/kg N, selon les stratégies d'achat des agriculteurs (Olou et al., 2023).

Si les cours des cultures ont également augmenté sur la même période, le ratio prix culture/prix d'azote n'a pas toujours été à l'avantage du producteur (voir *figure 1*). Une forte variabilité des prix d'achat des engrais et de commercialisation a également été observée entre les producteurs. Pour la récolte 2023, un

ciseau des prix (cours engrais restant élevé et baisse du prix des cultures) aura un impact sur les marges. Ajuster au plus près le poste de fertilisation azotée qui représente une part non négligeable des charges des exploitations agricoles en grandes cultures (Carel et Leveau, 2022) est donc un point indispensable.

Figure 1 : Evolution du prix de l'ammonitrate 33.5% rendu agriculteur et des ratios prix de culture en €/t sur prix de l'azote en kg N (x100)



Sources : Observatoire de prix Arvalis, Terre net, Ipampa

Le graphique présente l'évolution du prix de l'ammonitrate en €/kg de N rendu agriculteur de 2006 à 2023 ainsi que les ratios prix de blé sur prix de l'azote et prix de colza sur prix de l'azote. Par exemple, en 2022, l'azote s'est acheté en moyenne à 2.2 €/kg N et le blé tendre s'est vendu en moyenne à 285 €/t (ratio prix de blé sur prix de l'azote à 1.3). En 2023, le ratio devrait être sous la barre de 1 avec l'azote qui s'est acheté en moyenne à 2.5 €/kg N pendant que le prix du blé a baissé.

Au-delà des hausses de prix, des risques de pénurie sont apparus du fait de tensions sur les approvisionnements (Agra Presse, 2022). De même, la quête d'une agriculture plus respectueuse de l'environnement en Europe pousse les politiques à adopter de mesures visant à réduire le recours aux produits de synthèse. Par exemple, la stratégie « farm to fork » portée par la Commission Européenne dans le cadre du Green Deal a pour objectif la réduction de l'usage des engrais de 20% à l'horizon 2030 (Commission Européenne, 2020).

Ces nouveaux contextes imposent de prendre davantage en compte la dimension économique dans la gestion de la fertilisation azotée, aussi bien à l'échelle des cultures que des systèmes de culture.

1.2. Objectifs

L'objectif de cet article est de proposer une méthodologie exploratoire qui permet de déterminer, à assolement constant, la quantité d'azote à apporter sur chaque culture pour viser un optimum technico-économique global à l'échelle d'un système de culture. Elle offre également la possibilité d'intégrer une contrainte de disponibilité de l'azote ainsi que la rémunération de la qualité (protéines des céréales à paille et teneur en huile des oléagineux) dans le processus d'optimisation. Un exemple d'application est proposé portant sur un système de culture en Champagne Berrichonne.

2. Méthodologie

2.1. Construction des courbes de réponse à l'azote

Les procédures de construction des courbes de réponse à l'azote du rendement et de la qualité sont présentées ci-dessous.

2.1.1. Courbes de réponse « rendement »

La méthodologie de recherche de l'optimum technico-économique à l'échelle du système de culture s'appuie sur des courbes de réponse du rendement à l'azote centrées sur l'optimum technique (97% du rendement maximal). Ces courbes sont construites pour les principales grandes cultures à partir de données issues de nombreux essais des instituts techniques (Arvalis et Terres Inovia). Pour une culture donnée, la construction d'une courbe de réponse du rendement suit les étapes suivantes :

- 1) Dans l'optique de travailler sur des fermes types ou des fermes réelles, les rendements des essais en microparcelles sont minorés de 15% (prise en compte des effets de bordure et des passages de roues dans des parcelles « agriculteurs »)
- 2) Pour chaque essai, on ajuste la courbe de réponse du rendement à la dose d'azote apportée en écartant les situations où l'ajustement n'est pas satisfaisant (soit échec d'ajustement selon un modèle quadratique ou quadratique plateau, soit ajustement avec une valeur de rendement optimal extrapolée c'est-à-dire au-delà des rendements mesurés dans l'essai) afin de définir le rendement optimal de l'essai et la dose d'azote correspondante.
- 3) La courbe de réponse à l'azote est alors centrée sur l'optimum technique : on obtient une courbe de réponse à l'azote où rendement et dose d'azote sont exprimés en écart à l'optimum technique obtenu dans l'essai. On ajuste ensuite une courbe de réponse moyenne de l'ensemble des essais.

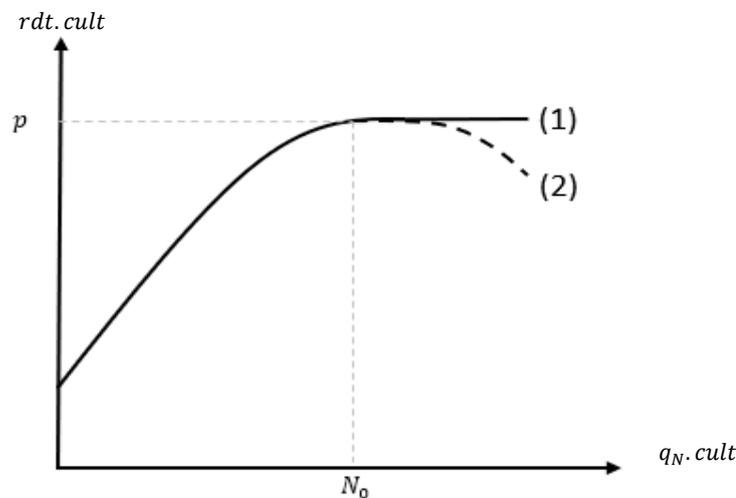
Les courbes de réponse à l'azote du rendement sont ajustées selon un formalisme quadratique plateau ou quadratique simple telle que l'apport additionnel d'azote a plus d'impact pour des doses d'azote faibles qu'à des doses proches de la dose optimale (voir *figure 2*). Au-delà de l'optimum, l'apport d'azote supplémentaire n'a plus d'impact sur le rendement (quadratique plateau : voir *équation 1*) et peut même entraîner, dans certains cas, des pertes de rendement (quadratique simple : voir *équation 2*).

$$rdt.cult(q_N.cult) = \begin{cases} p - b * (N_0 - q_N.cult)^2, & q_N.cult < N_0 \\ p, & q_N.cult \geq N_0 \end{cases} \quad (1)$$

$$rdt.cult(q_N.cult) = p - b * (N_0 - q_N.cult)^2 \quad (2)$$

avec $rdt.cult(q_N.cult)$ le rendement de la culture qui dépend de la dose d'azote ; p , b et N_0 les paramètres de la courbe ; N_0 la quantité d'azote permettant d'atteindre le rendement maximal

Figure 2 : Illustration des courbes de réponse du rendement selon les formalismes quadratique plateau (1) et quadratique simple (2)



2.1.2. Courbes de réponse « qualité »

Des courbes de réponse de la protéine à l'azote sont construites pour les céréales à paille simultanément à la construction des courbes de réponse du rendement avec la même méthode. L'impact de l'azote sur la teneur en protéines (tp) est une fonction linéaire et croissante (*équation 3*).

$$tp = c + d * q_N.cult ; \text{ avec } c \text{ et } d \text{ les paramètres de la courbe} \quad (3)$$

Concernant les oléagineux, il est admis que la croissance du taux d'huile est linéaire et inversement corrélée à celle du rendement. Ainsi, une hausse de la dose d'azote apportée peut entraîner une baisse du taux d'huile. Selon Terres Inovia, on gagne (resp. perd) 0.012 point de teneur en huile chaque fois qu'on baisse (resp. augmente) la dose d'azote d'un kilo pour le colza et le tournesol.

2.1.3. Segmentation des courbes de réponse

Afin de réduire la variabilité autour des courbes de réponse moyennes des cultures et pour gagner en précision, une segmentation de ces dernières en deux ou trois classes selon les cultures et les données disponibles est proposée. Le critère de segmentation est la dose d'azote apportée à l'optimum technique parce qu'elle dépend des caractéristiques pédo-climatiques et qu'elle rend compte du potentiel de rendement (des analyses statistiques réalisées sur le blé tendre ont permis de montrer que les doses d'azote à l'optimum technique permettent de mieux prédire les pentes des courbes de réponse). Ainsi, la segmentation permet d'obtenir des classes de courbes présentant les mêmes caractéristiques. Pour chaque classe de courbes de réponse du rendement, une courbe de réponse de la teneur en protéines est associée (uniquement pour les céréales à pailles).

Par ailleurs, pour le blé tendre, une tentative de segmentation en fonction du précédent cultural en plus de la dose d'azote apportée à l'optimum technique s'est heurtée à la disponibilité de données. On dispose tout de même des courbes de réponse du blé tendre en fonction des précédents blé, colza, tournesol et légumineuse qui ont les mêmes caractéristiques quelles que soient les classes de doses d'azote à l'optimum technique. L'ajustement de ces courbes en valeur absolue à partir des données observées à l'optimum technique permet de les différencier.

Le *tableau 1* présente les caractéristiques des courbes de réponse construites à partir des données d'essais :

Tableau 1 : Caractéristiques des courbes de réponse construites à partir des données d'essais

Cultures	Classes de dose	Nombre d'essais	Rendement à l'OT (q/ha)	Dose d'azote à l'OT* (kg N/ha)	p	N ₀	b	Protéine à l'OT* (%)	c	d
Blé tendre	N < 160	159	76.0	126	p.1	N _{0.1}	b.1	11.1	c.1	d.1
	160 < N < 200	141	77.2	179	p.2	N _{0.2}	b.2	11.4	c.2	d.2
	N > 200	147	84.1	230	p.3	N _{0.3}	b.3	11.3	c.3	d.3
Orge H	N < 130	38	69.0	107	p.4	N _{0.4}	b.4	10.8	c.4	d.4
	130 < N < 170	30	69.8	148	p.5	N _{0.5}	b.5	10.7	c.5	d.5
	N > 170	29	78.8	192	p.6	N _{0.6}	b.6	11.2	c.6	d.6
Orge P	N < 100	17	59.1	77	p.7	N _{0.7}	b.7	10.3	c.7	d.7
	N > 100	25	62.3	142	p.8	N _{0.8}	b.8	10.7	c.8	d.8
Colza	N < 130	15	31.8	74	p.9	N _{0.9}	b.9	-	-	-
	130 < N < 160	16	33.0	148	p.10	N _{0.10}	b.10	-	-	-
	N > 160	14	34.1	184	p.11	N _{0.11}	b.11	-	-	-
Tournesol	N < 40	7	28.8	16	p.12	N _{0.12}	b.12	-	-	-
	N > 40	7	30.3	56	p.13	N _{0.13}	b.13	-	-	-

Source : Arvalis, Terres Inovia *OT : optimum technique

2.2. Optimisation technico-économique à l'échelle de la culture

A partir des courbes de réponse à l'azote, les instituts agricoles proposent des matrices permettant de déterminer, pour une culture donnée, de combien il faudrait ajuster en moyenne la dose totale prévisionnelle à l'optimum technique pour viser un optimum technico-économique selon le prix d'achat de l'engrais (*prix. N*) et le prix de vente de la culture (*prix. cult*) (Lieven et al., 2022 ; Véricel et Olou, 2022).

La quantité d'azote à apporter à l'optimum technico-économique pour une culture dont la courbe de réponse à l'azote du rendement suit un formalisme quadratique (*équation 1* ou *équation 2*) est donnée par l'*équation 5*. Elle est obtenue en maximisant la marge brute « azote » *MB. cult* (*équation 4*) de la culture (Pagès et al., 2015) :

$$MB.cult = prix.cult * rdt.cult(q_N.cult) - q_N.cult * prix.N ; \quad (4)$$

$$q_N.cult.optimisé = N_0 - \frac{1}{2\rho b} ; \text{ avec } \rho = \frac{prix.cult}{prix.N} \quad (5)$$

2.3. Optimisation technico-économique à l'échelle d'un système de culture

Une fois les courbes de réponse à l'azote des rendements et des teneurs en qualité construites et segmentées, la recherche de l'optimum technico-économique global suit les étapes suivantes.

2.3.1. Structure du modèle d'optimisation

A l'échelle d'un système de K cultures, la recherche de l'optimum technico-économique consiste à trouver la meilleure répartition de l'azote disponible qui permet de maximiser la marge brute « azote » totale $MB.total$ (équation 6) sous contrainte de la quantité d'azote disponible (équation 8 : au maximum, on ne peut utiliser que la quantité totale disponible) et en fonction des courbes de réponse à l'azote des cultures, de leurs prix de vente, de l'assolement, du prix de l'azote et de la rémunération de la qualité qui dépend de la teneur en protéines des céréales à pailles et de la teneur en huile des oléagineux ainsi que des grilles de bonus-réfaction qui retenues (équation 7). Le problème à résoudre (équation 6 à équation 9) peut être modélisé comme suit :

Maximiser	
$MB.total = \sum_{cult=1}^K [(prix.cult + X) * rdt.cult(q_N.cult) * surf.cult] - \sum_{cult=1}^K [(q_N.cult * prix.N * surf.cult)]$	(6)
avec $X = rem.qualite(qualite(q_N.cult))$	
(7)	
Sous contraintes :	
$\sum_{cult=1}^K q_N.cult * surf.cult \leq Q.disponible$	(8)
avec $surf.cult \geq 0, q_N.cult \geq 0, Q.disponible \geq 0$	
(9)	

2.3.2. Ajustement des courbes de réponse et définitions des scénarios

Pour résoudre le problème précédent, les caractéristiques des cultures du système à l'optimum technique (doses d'azote et rendements notamment) doivent être définies dans un premier temps. Il faut ensuite associer les courbes de réponse aux cultures (en fonction du précédent cultural pour le blé tendre) ; pour les cultures dont les courbes de réponse sont segmentées, la classe de courbes correspondant à la dose appliquée à l'optimum technique est choisie. Les courbes de réponse sont ensuite ajustées en valeur absolue telles qu'elles doivent passer par les optimums de technique renseignés.

Une fois les caractéristiques des cultures connues et que les courbes de réponse sont ajustées, les scénarios de simulations doivent être définis. Ils portent sur : les prix de vente des cultures, le prix d'achat de l'azote, la rémunération ou non de la qualité (ainsi que les grilles de bonus-réfections à appliquer le cas échéant) et la quantité d'azote disponible à l'échelle du système.

Les rémunérations de la qualité (équation 7) sont des fonctions construites en utilisant la méthode de la régression segmentée à partir des grilles de bonus-réfections qui dépendent des teneurs en protéines et huile des cultures ($qualite(q_N.cult)$).

2.3.3. Résolution du problème et résultats de l'optimisation

Les solutions du problème sont obtenues grâce un logiciel de programmation mathématique, compte tenu de sa complexité (optimisation non linéaire avec contraintes). Dans notre cas, nous utilisons le logiciel R (package NLOpt). Les solutions portent sur les quantités d'azote à utiliser par culture présente dans le système pour atteindre l'optimum technico-économique global, les niveaux de rendement, les niveaux de qualité et les marges par culture et à l'échelle du système de culture. Chacune de ces variables sont exprimées en valeur absolue et en écart par rapport à l'optimum technique.

2.4. Exemple d'application et hypothèses retenues

Pour illustrer le fonctionnement de la méthode, nous l'avons appliqué à un système de culture de 207 ha issu d'une ferme type¹ non irriguée en Champagne Berrichonne (type de sol : argilo calcaire moyen).

2.4.1. Caractéristiques du système de culture étudié

Les caractéristiques du système de culture étudié sont renseignées dans le *tableau 2* :

Tableau 2 : Caractéristiques du système de culture de la ferme type Champagne Berrichonne sec étudié

Assolement		Caractéristiques du système			
Cultures	Précédents	Surface 2018-2021 (ha)	Dose N 2018-2021 (kg N/ha)	Rdt 2018-2021 (q/ha)	Taux de protéine ou huile (% aux normes)
Blé Tendre	Colza, tournesol, lentille	78	172	72	11.5
Blé Tendre	Blé	12	192	63.3	11.5
Orge H	-	10	146	65.5	10
Orge P	-	29	150	65.1	10
Colza	-	54.5	176	26.8	43.5
Tournesol	-	13.5	62	24.8	44.7
Lentille	-	10	0	10.5	-
Total (T) ou Moyenne (M)		T = 207	M = 154	-	-

Source : Fermotheque Arvalis

Les moyennes 2018-2021 permettent de rendre compte des pratiques avant la hausse des prix : les changements d'assolement et de pratiques sur la ferme type entre 2017 et 2018 nous obligent à calculer des moyennes 2018-2021 plutôt que les moyennes olympiques 2017-2021. Les fermes types étant performantes, on fait l'hypothèse que les cultures présentes sont conduites à l'optimum technique.

Concernant la quantité d'azote disponible à l'échelle du système, on considère qu'il s'agit de la quantité d'azote qui y est historiquement utilisée. D'après les calculs à partir des doses apportées par culture, on estime que le système dispose de 154 kg N/ha.

2.4.2. Scénarios de simulations

Le tableau ci-dessous présente les scénarios de prix de vente des cultures. Les prix moyens de 2018-2021 puis ceux de 2022 et 2023 sont renseignés.

Tableau 3 : Scénarios de prix de vente des cultures (en €/t)

Cultures	Prix de vente des cultures (€/t)		
	Scénario 0 Moy. 2018-2021	Scénario 1 Prix 2022	Scénario 2 Prix 2023
Blé Tendre	185	285	210
Orge H	165	270	205
Orge P	185	300	260
Colza	435	605	440
Tournesol	400	566	437
Lentille	450	850	850

Source : Observatoire de prix Arvalis

Concernant le prix d'achat des engrais (*tableau 4*), le scénario 0 correspond au prix moyen de l'azote sur la période 2018-2021. Deux scénarios de prix élevé sont ensuite définis pour prendre en compte la hausse des prix des engrais en 2022 et 2023.

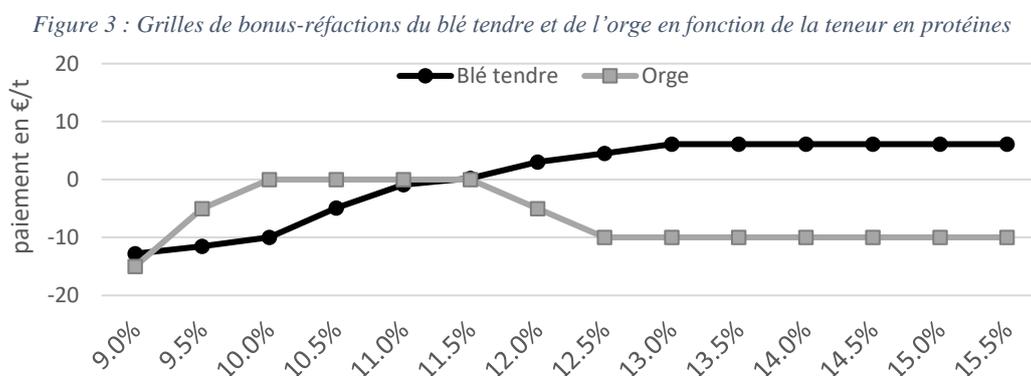
Tableau 4 : Scénarios de prix d'achat de l'azote (en €/kg N)

Scénario 0 (Moy. 2018-2021)	Scénario 1 (Prix élevé)	Scénario 2 (Prix très élevé)
0.78	2.00	2.50

Sources : Observatoire de prix Arvalis, Terre net, Ipampa

¹ Une ferme type est une exploitation fictive définie par expertise, représentative d'un système de production dans un contexte pédoclimatique précis et caractérisée par une cohérence d'assolement, de rotation et d'itinéraires techniques. Elle est par définition performante.

La rémunération ou non de la qualité est également prise en compte dans nos simulations. Dans le cas où elle est prise en compte, elle prend la forme d'une grille de bonus-réductions en fonction de la teneur en protéines pour les céréales à paille. A partir des grilles de bonus-réductions de quelques coopératives françaises sur différentes années, deux grilles moyennes ont été proposées : l'une pour le blé tendre et l'autre pour l'orge (voir *figure 3*).



Sources : données de quelques coopératives agricoles, traitement Arvalis

Concernant la rémunération de la teneur en huile des oléagineux, les producteurs sont en général rémunérés collectivement à partir de la teneur en huile moyenne de l'ensemble de la production chez un collecteur. Cependant, dans le cadre de l'étude, quelques scénarios ont porté sur une rémunération individuelle (ces scénarios ne sont pas présentés dans les résultats). La rémunération de la teneur en huile est donnée par l'équation 11 (source : Terres Inovia) :

$$\text{Rémunération huile} = 1.5\% * \text{Prix de vente culture} * (\text{taux d'huile} - \text{norme commerciale}) \quad (10)$$

Par exemple, dans le cas où la rémunération de la teneur en huile est individuelle, pour un prix du colza à 500 €/t, une teneur en huile de 44% avec une norme commerciale à 40%, la rémunération serait de +30 €/t ; soit $1.5\% * 500 * (44 - 40) = +30$ €/t. A contrario, si la teneur en huile est de 36%, la rémunération serait de -30 €/t ; soit $1.5\% * 500 * (36 - 40) = -30$ €/t.

Concernant la disponibilité de l'azote à l'échelle du système, en plus du scénario 0 où l'azote est disponible en totalité (154 kg N/ha, soit 100%), un scénario où la quantité d'azote disponible est limitée 80% est défini (soit 123 kg N/ha) pour rendre compte des possibles difficultés d'approvisionnement rencontrées dans certaines exploitations.

Tableau 5 : Scénarios de prix d'achat de l'azote (en kg N/ha)

Scénario 0 Moy. 2018-2021	Scénario 1
154 kg N/ha (100%)	123 kg N/ha (80%)

Source : Fermeothèque Arvalis

2.4.3. Contextes économiques identifiés selon les ratios de prix

Le *tableau 6* présente les ratios prix de vente des cultures (blé tendre et colza) sur prix d'achat de l'azote rendu agriculteur. Quatre contextes économiques ont été identifiés à partir du tableau précédent :

- Contexte économique dit « favorable » : Période 2018-2021, avec ratio du blé tendre (resp. colza) à 2.4 (resp. 5.3). Ce contexte est caractérisé par des charges liées à l'azote relativement faibles et des prix des cultures suffisamment rémunérateurs
- Contexte économique dit « plus ou moins favorable » : Prix de vente de 2022 et prix de l'azote à 2.0 €/kg N (ratios de 1.4 et 3.0)
- Contexte économique dit « plus ou moins tendu » : Prix de vente de 2022 et prix de l'azote à 2.5 €/kg N (ratios de 1.1 et 2.4), ainsi que prix de vente de 2023 et prix de l'azote à 2.0 €/kg N (ratios de 1.1 et 2.2)
- Contexte économique dit « tendu » : Prix de vente de 2023 et prix de l'azote à 2.5 €/kg N (ratios de 0.8 et 1.8). Les charges liées à l'azote sont très élevées et les prix de vente peu rémunérateurs.

Tableau 6 : Ratios prix de vente du blé tendre (€/t) et du colza (€/t) sur prix d'achat de l'azote (€/kg N × 100)

		Prix de vente des cultures				
		Moy. 2018-2021 Blé t. : 185 €/t Colza : 415 €/t	Prix 2022 Blé t. : 285 €/t Colza : 605 €/t	Prix 2023 Blé t. : 210 €/t Colza : 440 €/t		
Prix d'achat de l'azote	Moy. 2018-2021 0.78 €/ kg N	2.4 Blé 5.3 Colza	Non calculé		Non calculé	
	Prix élevé 2.0 €/ kg N	Non calculé	1.4 Blé 3.0 Colza	1.1 Blé 2.2 Colza		
	Prix très élevé 2.5 €/kg N	Non calculé	1.1 Blé 2.4 Colza	0.8 Blé 1.8 Colza		

Source : Observatoire de prix Arvalis

Selon les recommandations des instituts à l'échelle de la culture, l'optimum technique peut être visé dans le contexte économique favorable alors que l'optimum technico-économique devrait être recherché en contexte économique tendu. Nous vérifierons à travers les résultats des simulations si ces recommandations sont vérifiées pour le système de culture étudié.

3. Résultats et discussion

Les résultats des simulations portant sur la prise en compte de la rémunération individuelle de la teneur en huile sont quasiment identiques à ceux où elle n'est pas prise en compte. La différence observée est une légère baisse de l'apport d'azote sur les oléagineux qui entraîne une légère baisse des rendements avec une moindre augmentation de la teneur en huile. Ceci est profitable pour les céréales à paille dont les rendements et les teneurs en protéines croissent grâce à des doses d'azote supplémentaires. La marge azote totale dégagée est ainsi améliorée en raison de la rémunération de la qualité des productions. Pour cette raison et pour être plus proche de la réalité, le choix a été fait de ne pas présenter les résultats des simulations dans lesquelles la teneur en huile est rémunérée à l'échelle de la culture.

Les résultats sont présentés à l'échelle des cultures et du système de culture. Les changements observés concernent l'ensemble des cultures à l'exception de la lentille car elle n'est pas fertilisée. Seul le prix de cette dernière évolue selon les contextes économiques.

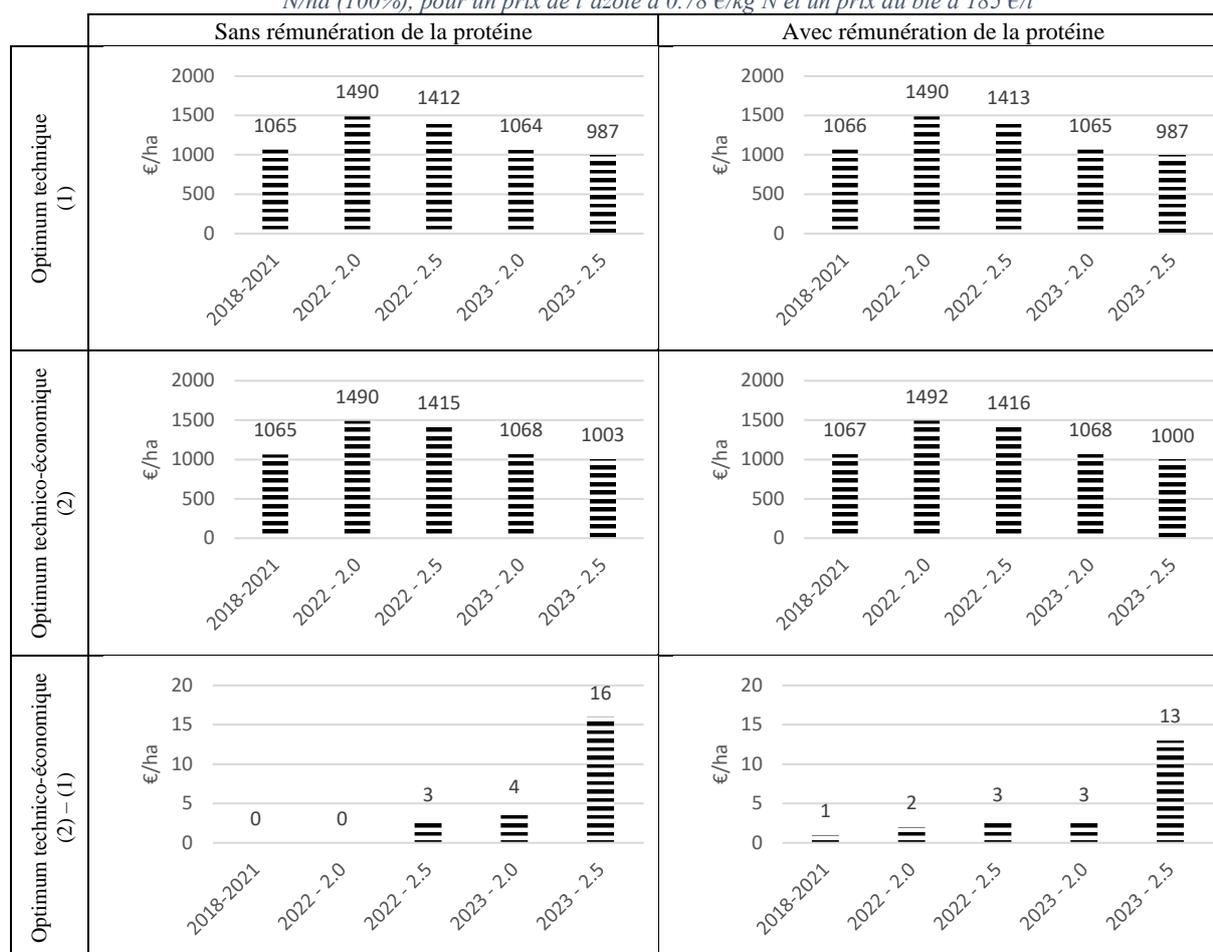
3.1. Résultats de l'optimisation technico-économique

Les deux premiers graphiques de la *figure 4* présente les marges totales du système de culture à l'optimum technique (avant optimisation) selon les contextes économiques avec et sans rémunération de la teneur en protéines des céréales à paille pour une disponibilité de l'azote de 100%. On remarque que le principal facteur de variation de la marge à l'échelle du système de culture est le contexte économique (prix de vente des cultures et prix d'achat de l'azote). En effet, la marge a varié entre 987 et 1970 €/ha selon les contextes économiques. C'est dans chacun de ces contextes que l'optimisation technico-économique globale est réalisée.

Les deux graphiques qui suivent (*figure 4*) présentent les marges totales du système de culture à l'optimum technico-économique (après optimisation) selon les contextes économiques avec et sans rémunération de la teneur en protéines des céréales à paille. On observe qu'en contexte économique favorable (2018-2021), les marges à l'optimum technique et technico-économique sont égales. A l'opposée, en contexte économique tendu (2023-2.5), les marges à l'optimum technico-économique sont supérieures à celles dégagées à l'optimum technique de 13 à 16 €/ha.

Dans la suite, nous montrerons quelques résultats de simulations dans le contexte économique favorable 2018-2021 et détaillerons les résultats dans le contexte économique tendu (2023 - 2.5).

Figure 4 : Répartition de l'azote à l'optimum technico-économique pour une disponibilité de l'azote de 154 kg N/ha (100%), pour un prix de l'azote à 0.78 €/kg N et un prix du blé à 185 €/t



Source : Résultats des simulations par Arvalis

3.1.1. Contexte économique favorable 2018-2021 avec disponibilité de l'azote à 100%

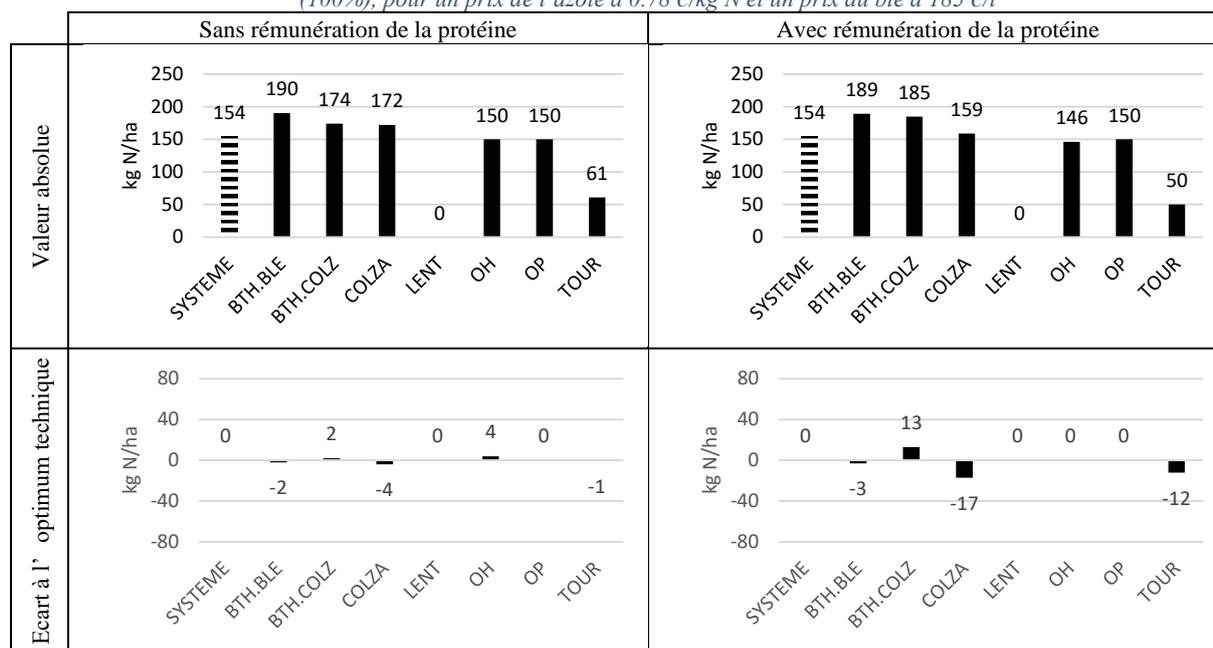
Dans un premier temps, nous avons vérifié que les résultats à l'optimum technico-économique du modèle sur la période 2018-2021 se rapprochent de l'optimum technique à l'échelle du système sur la même période.

La figure 5 montre qu'en absence de rémunération de la protéine et sans contrainte de disponibilité, l'optimum technico-économique à l'échelle du système est proche de l'optimum technique. Pour atteindre cet optimum, il faut utiliser la totalité de l'azote disponible au niveau du système (154 kg N/ha) et les apports à l'échelle des cultures sont également proches de l'optimum technique (les écarts d'apports varient de -4 à +4 kg N/ha selon les cultures).

Dans le cas où la rémunération de la protéine est prise en compte, l'optimum technico-économique est atteint en utilisant aussi la totalité de l'azote disponible (154 kg N/ha) avec une répartition de l'azote entre les cultures qui diffère légèrement de l'optimum technique. On remarque notamment que le modèle recommande de baisser de 12 à 17 kg N/ha les apports d'azote sur les oléagineux pour apporter 13 kg N/ha supplémentaires sur le blé tendre d'oléoprotéagineux. Cette répartition a pour conséquence une légère baisse du rendement des oléagineux et une légère amélioration de leur teneur en huile. De même, le rendement et la teneur en protéines du blé d'oléoprotéagineux sont améliorés alors qu'il n'y a pas de changement sur les orges.

Les changements observés à l'optimum technico-économique en tenant compte de la rémunération de la teneur en protéines n'entraînent pas d'amélioration de la marge azote par rapport à la pratique à l'optimum technique dans le même contexte économique. Il n'y a donc pas de nécessité de changer les pratiques dans ce cas de figure.

Figure 5 : Répartition de l'azote à l'optimum technico-économique pour une disponibilité de l'azote de 154 kg N/ha (100%), pour un prix de l'azote à 0.78 €/kg N et un prix du blé à 185 €/t



Source : Résultats des simulations par Arvalis

3.1.2. Contexte économique tendu 2023 avec disponibilité de l'azote à 100%

Cette partie est consacrée aux résultats de l'optimisation technico-économique dans le contexte économique tendu (prix de vente 2023 et prix d'achat de l'azote à 2.5 €/kg N).

Répartition de l'azote à l'optimum technico-économique

La figure 6 présente la quantité d'azote utilisée à l'échelle du système et sa répartition entre cultures. Les résultats sont présentés pour une disponibilité de l'azote à 100% (154 kg N/ha).

Dans le cas où la rémunération de la protéine n'est pas prise en compte, l'optimum technico économique est atteint en utilisant environ 122 sur 154 kg N/ha. Dans le cas inverse, la quantité utilisée est légèrement plus élevée, soit 128 sur 154 kg N/ha. La baisse observée est la conséquence des réductions de doses d'azote apportées par culture variables en fonction des caractéristiques des courbes de réponse ainsi que des rapports de prix entre les cultures d'une part, puis entre les prix de cultures et le prix de l'azote d'autre part.

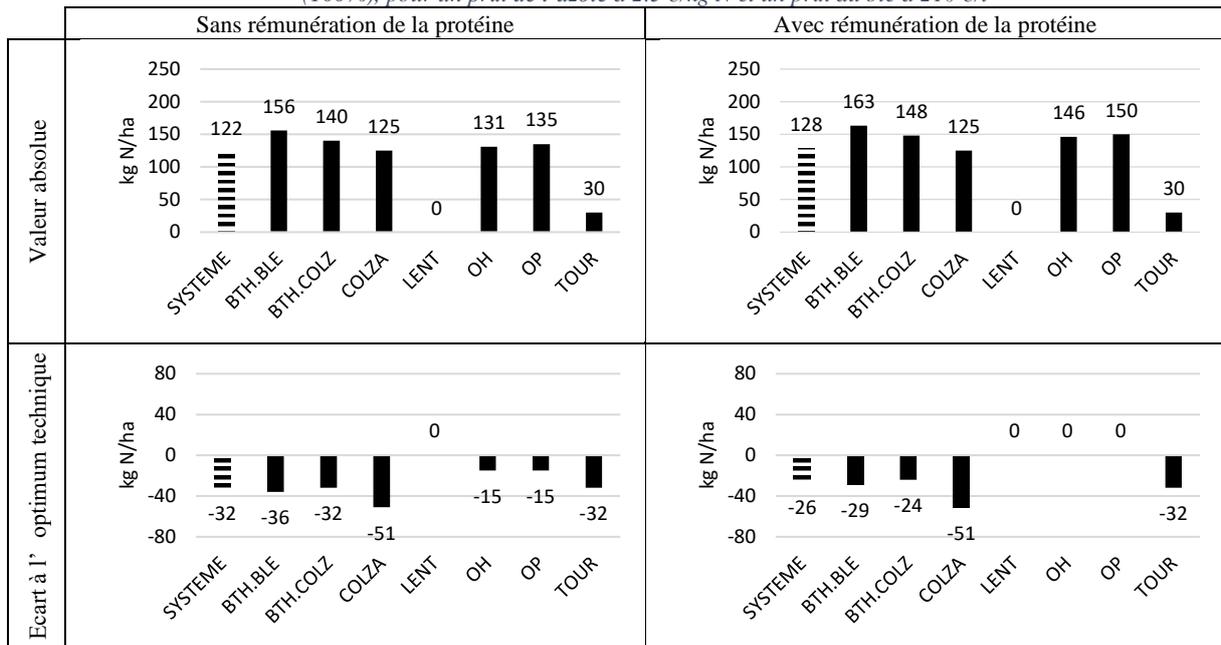
A l'échelle des cultures (hors lentille), en l'absence de rémunération de la teneur en protéines, on remarque que les réductions de doses vont de -15 à -51 kg N/ha par rapport à l'optimum technique selon les cultures. Quand la rémunération de la teneur en protéines est prise en compte, les réductions sont moins importantes : elles sont comprises entre 0 et -51 kg N/ha.

Le maintien des doses d'azote des orges à l'optimum technico-économique dans le cas de la prise en compte de la rémunération de la teneur en protéines s'explique entre autres par la grille de rémunération de la teneur en protéines (une baisse de la teneur en dessous de 10% donnerait lieu à l'application d'une réfaction, voir figure 3) et par le fait que l'orge est une culture qui valorise relativement mieux l'azote (il faut remarquer qu'on baisse moins les apports en absence de rémunération de la teneur en protéines).

Rendements à l'optimum technico-économique

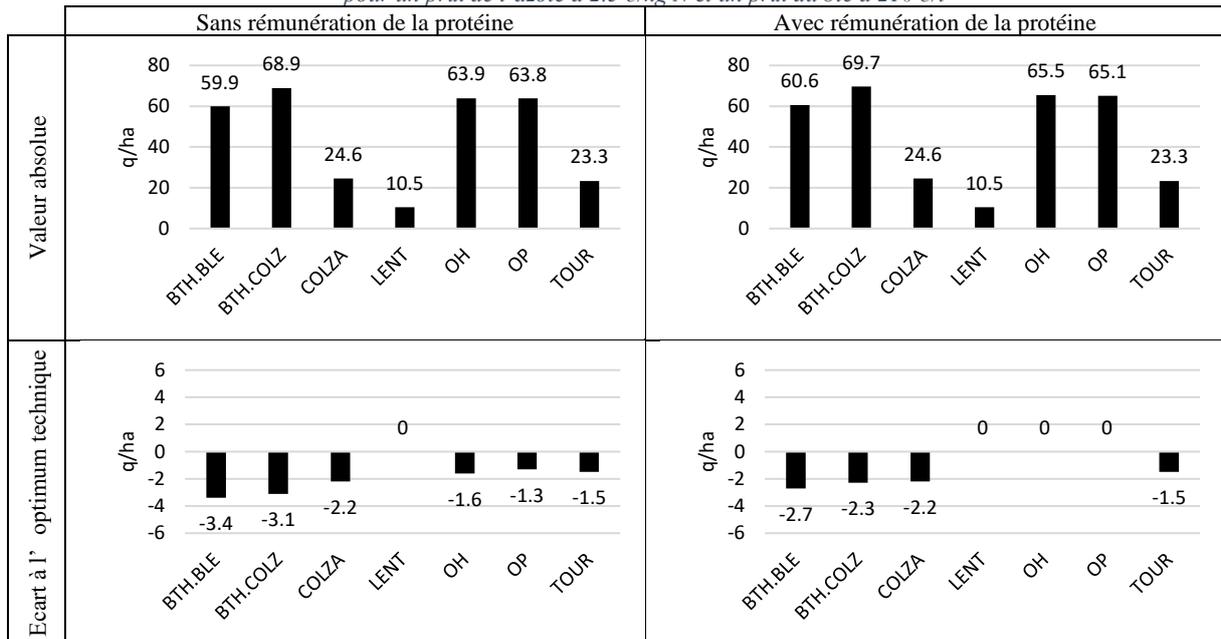
D'après la figure 7, il y a une baisse des rendements par rapport à l'optimum technique en lien avec les baisses de doses observées dans la figure 5. On remarque que, les réductions de rendements sont moins importantes quand la rémunération de la teneur en protéines est prise en compte : en absence de rémunération de la protéine, les céréales perdent entre 1.3 et 3.4 q/ha par rapport à l'optimum technique alors qu'elles perdent au maximum 2.7 q/ha quand la teneur en protéines est rémunérée.

Figure 6 : Répartition de l'azote à l'optimum technico-économique pour une disponibilité de l'azote de 154 kg N/ha (100%), pour un prix de l'azote à 2.5 €/kg N et un prix du blé à 210 €/t



Source : Résultats des simulations par Arvalis

Figure 7 : Rendements à l'optimum technico-économique pour une disponibilité de l'azote de 154 kg N/ha (100%), pour un prix de l'azote à 2.5 €/kg N et un prix du blé à 210 €/t



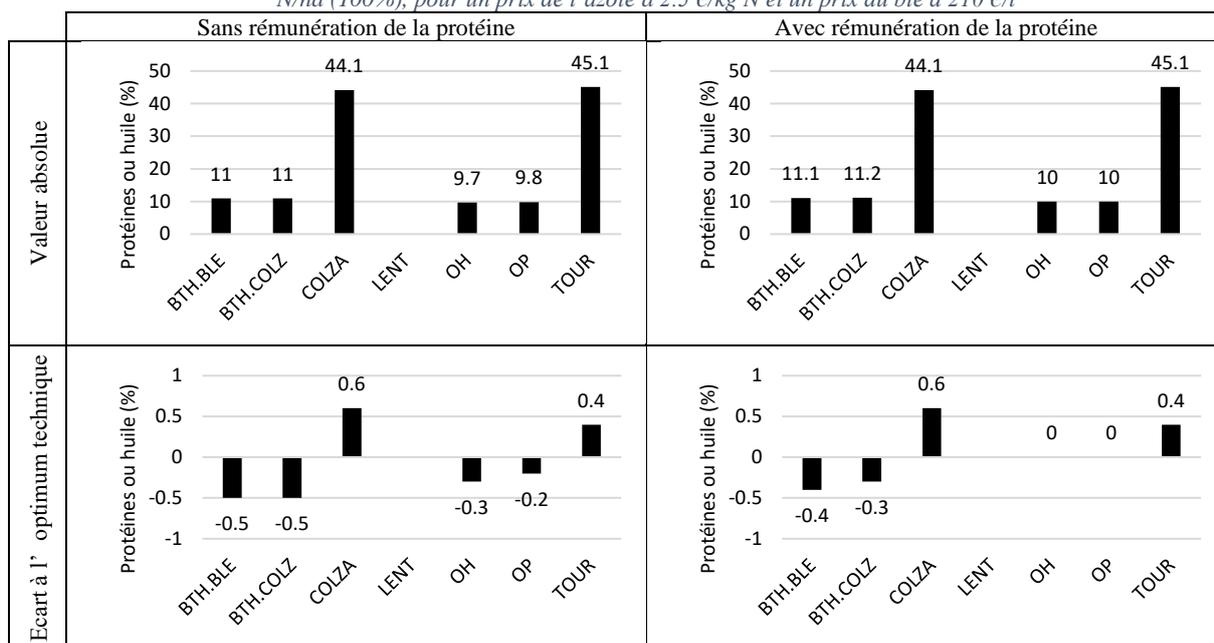
Source : Résultats des simulations par Arvalis

Teneurs en protéines et en huile à l'optimum technico-économique

D'après la figure 8, il y a une baisse de la teneur en protéines des blés (-0.3% à -0.4%) alors que la teneur en huile des oléagineux est en hausse (+0.4% à +0.6%) à l'optimum technico-économique dans le cas où elle est prise en compte. Ceci s'explique par le fait que les apports azotés sont positivement corrélés à la teneur en protéines des céréales et que les oléagineux concentrent de l'huile avec la baisse du rendement.

Dans le cas où la teneur en protéines n'est pas prise en compte dans l'optimisation, elle baisse davantage pour atteindre 11% pour le blé tendre (-0.5%) et 9.7% à 9.8% pour les orges (-0.2% à -0.3%). Avec les niveaux de teneur en protéines atteints dans ce cas, on pourrait éventuellement craindre un déclassement de la production notamment pour les orges.

Figure 8 : Teneurs en protéines/huile à l'optimum technico-économique pour une disponibilité de l'azote de 154 kg N/ha (100%), pour un prix de l'azote à 2.5 €/kg N et un prix du blé à 210 €/t

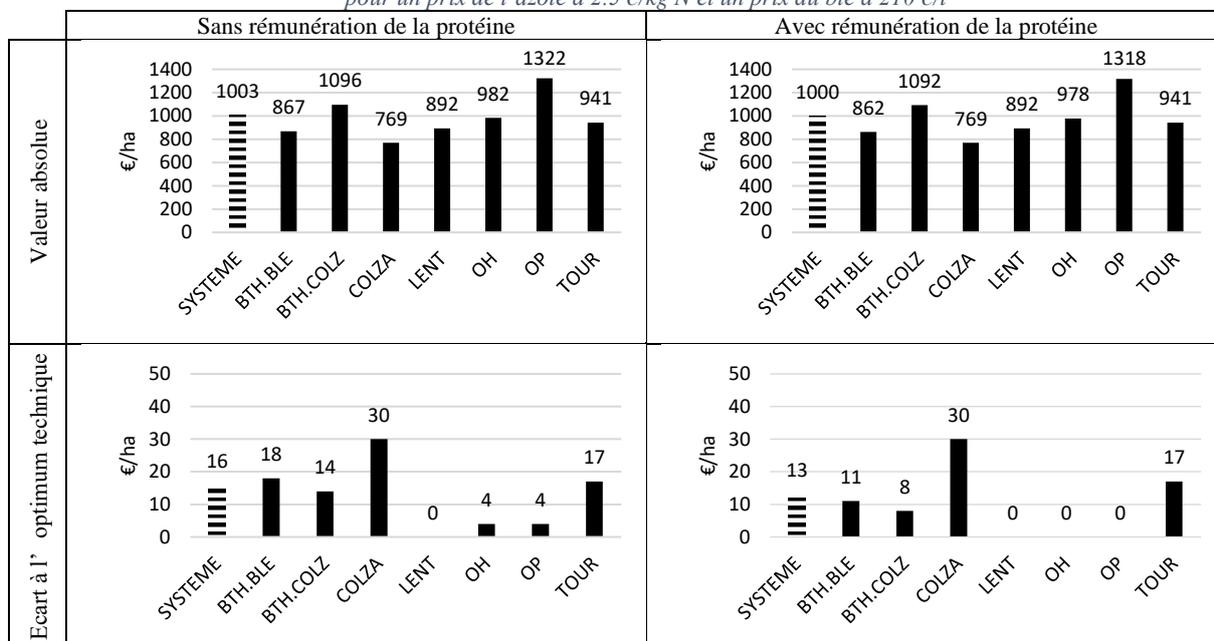


Source : Résultats des simulations par Arvalis

Marge azote à l'optimum technico-économique

Les marges dégagées à l'optimum technico-économique à l'échelle du système et des cultures sont présentées dans la figure 9. On remarque que les marges à l'échelle du système sont supérieures d'environ 13 à 16 €/ha par rapport à l'optimum technique malgré les réductions des doses d'azote qui ont entraîné des baisses des rendements et des niveaux de protéine pour les céréales à paille.

Figure 9 : Marge azote à l'optimum technico-économique pour une disponibilité de l'azote de 154 kg N/ha (100%), pour un prix de l'azote à 2.5 €/kg N et un prix du blé à 210 €/t



Source : Résultats des simulations par Arvalis

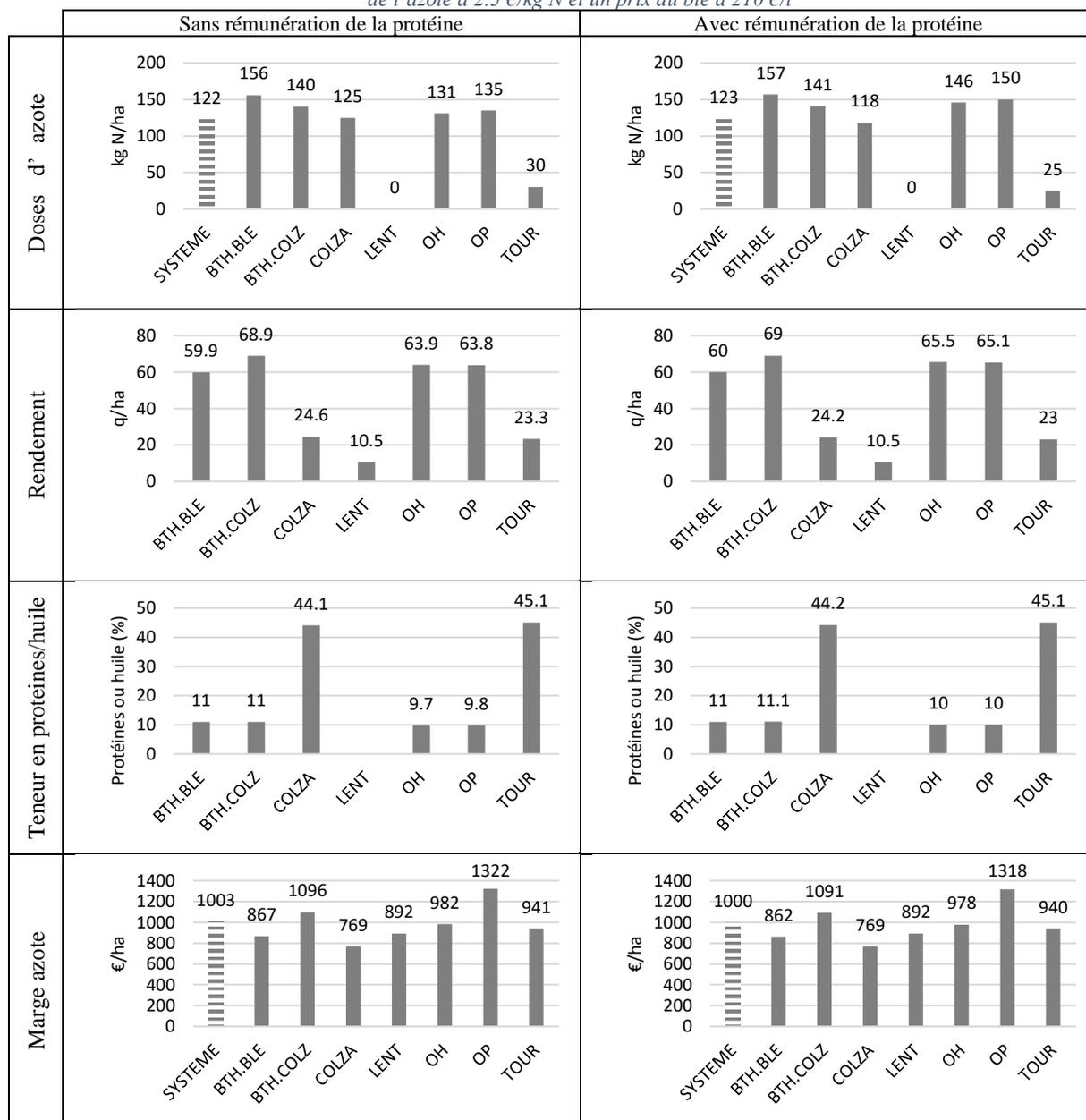
3.1.3. Contexte économique tendu 2023 avec disponibilité de l'azote à 80%

La figure 10 présente les résultats de l'optimisation technico-économique dans le contexte économique tendu 2023 pour une disponibilité de l'azote à 80% (soit 123 kg N/ha). On observe que l'optimum technico-économique est atteint en utilisant la totalité de l'azote disponible. Concernant, la répartition

de l'azote disponible entre les cultures, elle va dans le même sens que les observations faites en absence de contrainte sur la quantité d'azote disponible (voir 3.1.2). De même, les conséquences sur les rendements, les niveaux de qualité et les marges sont du même ordre de grandeur. En effet, dans les simulations précédentes à 100%, l'optimum technico-économique est atteint en utilisant 128 sur 154 kg N/ha (soit 83% \approx 80%).

Le modèle propose ainsi un ajustement des doses d'azote pour améliorer la marge totale à l'échelle du système de culture. Des simulations supplémentaires réalisées ont montré qu'il est relativement plus avantageux de viser l'optimum technico-économique que de réduire les doses d'azote de 20% de façon identique sur chaque culture (voir les résultats en écarts en Annexe).

Figure 10 : Résultats à l'optimum technico-économique pour une disponibilité de 123 kg N/ha (80%), pour un prix de l'azote à 2.5 €/kg N et un prix du blé à 210 €/t



Source : Résultats des simulations par Arvalis

3.2. Limites de la méthodologie et perspectives

La méthodologie proposée est encore perfectible et les résultats issus de sa mise en application peuvent certes orienter la prise de décision mais sont à prendre avec précaution. Les limites suivantes sont à considérer :

Disponibilité des courbes de réponse à l'azote des cultures

Il existe des cultures pour lesquelles les courbes ne sont pas disponibles ou sont en cours de construction (pomme de terre, betterave, etc.). De même, très peu de données sont disponibles sur les associations de cultures (par exemple céréales-protéagineux) et les courbes de réponse ne sont pas construites. Tout ceci qui limite la possibilité d'appliquer la méthodologie à des systèmes de culture diversifiés.

Incertitude liée à la variabilité des courbes de réponse à l'azote

L'incertitude liée à la variabilité des courbes de réponse à l'azote du rendement et de la teneur en protéines/huile n'est pas prise en compte dans la recherche de l'optimum technico-économique bien que les travaux de segmentation des courbes en classes de doses d'azote apportées à l'optimum technique (voir 2.1.3) permettent de réduire cette variabilité.

Des travaux sont en cours afin de mieux prédire les pentes des courbes de réponse (paramètre b des équations 1 et 2) à partir de variables agropédoclimatiques. Les résultats de ces travaux devraient permettre de mieux segmenter les courbes de réponse à l'azote et de déterminer les optimums technico-économiques avec davantage de précision sous réserve d'être capable caractériser finement chaque situation pour pouvoir renseigner ces variables.

Par ailleurs, la segmentation des courbes de réponse à l'azote a été réalisée en se basant sur les doses optimales des essais calculées à posteriori qui, par définition, ne sont pas connues lors du calcul de la dose prévisionnelle à apporter. Une segmentation similaire pourrait être testée en se basant cette fois-ci sur les doses d'azote prévisionnelles des essais.

Incertitude liée à la variabilité de l'optimum technique

L'incertitude liée à la variabilité des optimums techniques, en lien avec la variabilité du climat, n'est pas prise en compte dans la recherche de l'optimum technico-économique global. Aussi faut-il pouvoir définir les optimums techniques des systèmes de culture réels à partir des données historiques si elles sont disponibles.

Définition des scénarios de prix et choix des grilles de rémunération de la qualité

La méthodologie nécessite de définir en amont les prix de vente des cultures et d'achat des engrais. S'agissant des cultures, il est très peu probable de connaître à l'avance quels seront les prix de vente définitifs en fin de la campagne. Cette réalité fait qu'il faut multiplier les scénarios afin de dégager d'éventuelles tendances à partir des simulations. Par ailleurs, dans le cas où la rémunération de la qualité est prise en compte dans la recherche de l'optimum technico-économique global, il faut définir des grilles de bonus/réfections pour les céréales à paille (et des oléagineux), sachant qu'elles peuvent être variables selon les coopératives (source d'incertitude).

Fractionnement des doses

La méthodologie proposée ne prend pas en compte le fractionnement des apports azotés alors qu'il est admis que cette pratique impacte la teneur en protéines des céréales à paille (Lagrange, 2023 ; Le Souder, 2023 ; Marguerie et al., 2023) et la teneur en huile des oléagineux (Le Gall et Girerd, 2022). Dans le modèle proposé, les baisses de doses d'azote à l'optimum technico-économique se font à fractionnement constant : par exemple, une baisse de 10% de la dose d'azote totale sur une culture donnée donnerait lieu à une baisse de chaque apport de 10%. A défaut d'appliquer une baisse proportionnelle sur les différents apports, il est recommandé de préserver les apports qualité.

Modification d'assolement

La modification d'assolement est un levier important pour s'adapter en contexte économique tendu. En effet, les agriculteurs ont tendance à privilégier dans leurs assolements des cultures efficaces en engrais quand le prix de l'engrais azoté augmente fortement (Terre net, 2022). En outre, l'association des cultures peut également permettre de réduire les apports azotés. Par exemple, l'association du colza avec une légumineuse gélive peut induire une réduction de la dose d'azote optimale pouvant aller jusqu'à 30 kg N/ha (Terres Inovia, 2016).

Pour la suite, il est envisagé de développer un modèle permettant d'optimiser l'assolement à l'échelle d'un système de culture pour s'adapter en contexte économique tendu.

4. Conclusion

L'objectif de cet article est de présenter une méthodologie permettant d'optimiser la fertilisation azotée à l'échelle d'un système de culture à assolement constant avec la possibilité d'appliquer une contrainte de disponibilité d'azote.

Les résultats des différentes simulations réalisées sur un système de culture non irrigué en Champagne Berrichonne confirment que les optimums techniques et économiques sont confondus quand le prix de l'azote est faible par rapport aux prix de vente des cultures, sous l'hypothèse d'une absence de contraintes de disponibilité : dans ce cas de figure, des changements de pratiques ne sont pas envisagés. A l'opposé, quand les prix des cultures sont peu rémunérateurs par rapport au prix d'achat de l'azote, il importe de viser l'optimum technico-économique qui implique, dans la plupart des cas, de réduire les doses d'azote par rapport aux optimums techniques dans certains contextes. Ces réductions de doses se présentent dans des proportions variables selon les cultures (prix de vente et efficacité d'utilisation de l'azote) et des ratios prix de vente des cultures sur prix d'achat de l'azote. Ainsi, la conduite à l'optimum technico-économique peut entraîner des pertes de rendement par culture mais la marge par culture et à l'échelle du système de culture se trouvent améliorées.

Par ailleurs, il apparaît que la prise en compte des bonus-réductions en lien avec la teneur en protéines des grains de céréales à pailles est associée à des réductions de dose d'azote moins importantes que lorsque ce critère n'est pas pris en compte. Les grilles de rémunération de la teneur en protéines sont de fait des données qu'il faut considérer dans le raisonnement à l'optimum technico-économique afin de préserver au mieux les objectifs qualitatifs des productions.

Enfin, il est nécessaire d'améliorer la méthodologie sur nombre de points (construire des courbes de réponse pour davantage de cultures, améliorer la segmentation des courbes de réponse, prendre en compte l'incertitude liée à la variabilité autour des courbes de réponse moyennes et à la variabilité des optimums techniques, prendre en compte le fractionnement des apports, etc.), de définir les hypothèses par expertise et d'élargir le champ de recherche à l'optimisation d'assolement.

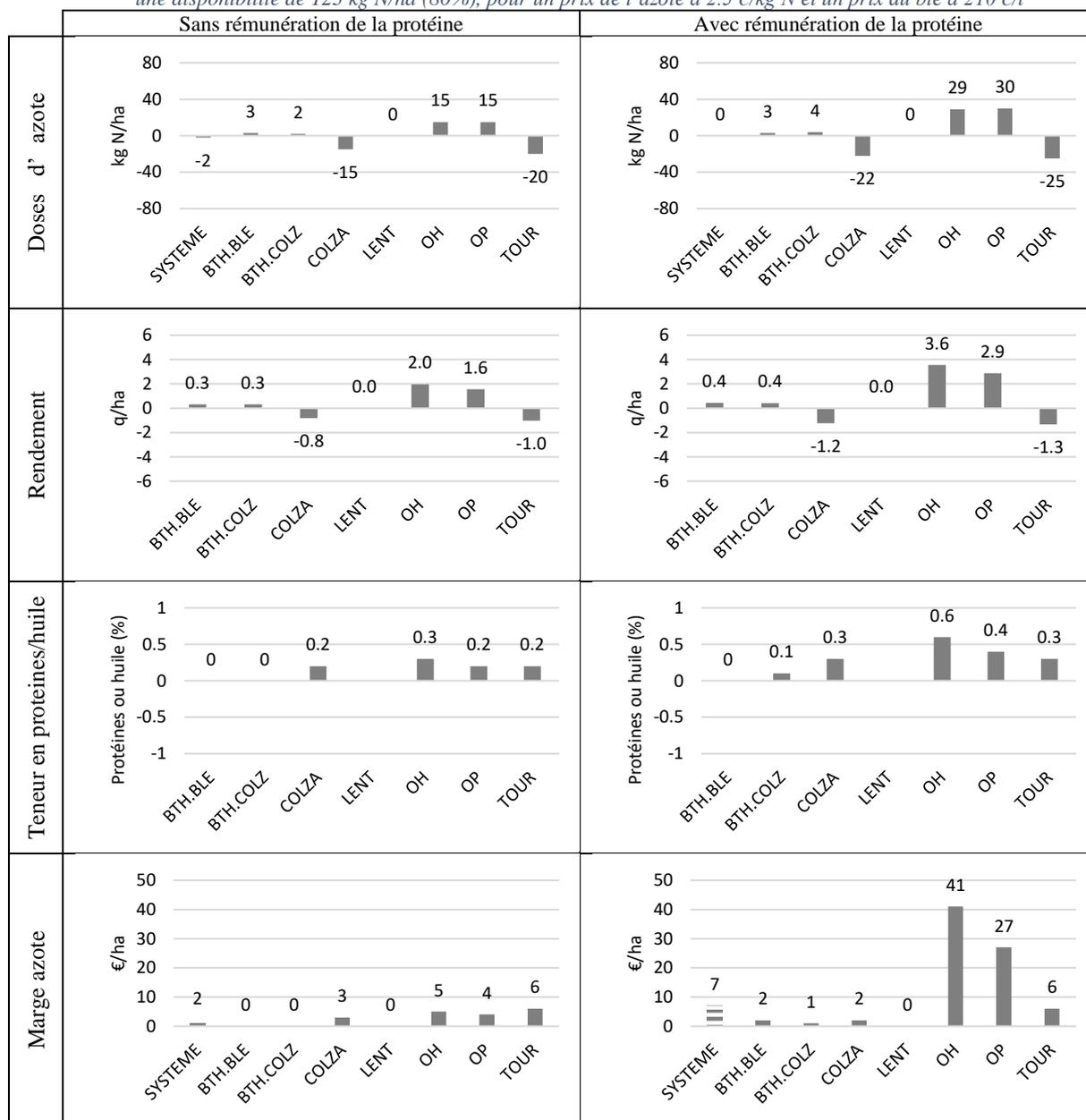
Références bibliographiques

- Agra Presse (2022)** ; Engrais : Yara met en garde contre une pénurie d'azote ; [Article web](#) consulté le 01/10/2023
- Carel Y., Leveau V. (2022)** ; Revenus en grandes cultures 2022 et 2023 : faire ses calculs pour gérer ses risques ; Perspectives agricoles – Numéro 502
- Cohan J.P., Bouthier A., Castillon P., Le Souder C. (2009)** ; Prix des engrais azotés : Quels impacts sur les céréales ? ; Perspectives agricoles – Numéro 352
- Commission Européenne (2020)** ; Une stratégie "De la ferme à la table" pour un système alimentaire équitable, sain et respectueux de l'environnement ; COM(2020) 381 final
- Lagrange H. (2023)** ; Fertilisation azotée sur orges d'hiver : quel intérêt à fractionner en trois apports ? ; Perspectives agricoles – Numéro 507
- Le Gall C., Girerd R. (2022)** ; Protéines issues du colza : comment répondre à la demande des marchés ? ; Perspectives agricoles – Numéro 500
- Le Souder C. (2023)** ; Fertilisation du blé tendre : fractionner l'azote en trois apports ; Arvalis Infos techniques ; [Article web](#) consulté le 28/11/2023
- Lieven J., Champolivier L., Lecomte V. (2022)** ; Fertilisation azotée du colza : pas de remise en cause du raisonnement habituel en 2022 ; Perspectives agricoles – Numéro 496
- Marguerie M., Degan F., Véricel G. (2023)** ; Agriculture de Conservation des sols : faut-il fractionner l'azote sur les blés ? ; Perspectives agricoles – Numéro 509
- Olou A., Godin O., Oudoire G., Leveau V. (2023)** ; Bilan de campagne économique 2023 : Des résultats ternis par l'effet « ciseaux » ; Perspectives agricoles – Numéro 516
- Pagès B., Dubois B., Leveau V., Piraux F. (2015)** ; Fertilisation du blé tendre : quel compromis technico-économique ? ; Comifer - 12èmes rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse
- Terre net (2022)** ; Quelles stratégies face au prix des engrais pour la campagne 2022/23 ? ; [Article web](#) consulté le 24/11/2023
- Terres Inovia (2016)** ; Les points techniques de Terres Inovia : Colza associé à un couvert de légumineuses gélives ; Dépôt légal juin 2016 ; ISBN 978-2-908645-77-4
- Véricel G., Olou A. (2022)** ; Marges nettes des cultures : s'approcher de l'optimum technico-économique ; Perspectives agricoles – Numéro 504

Annexe

Contexte économique tendu (prix des cultures 2023 et prix de l'azote à 2.5 €/kg N) avec une disponibilité de l'azote à 80% : Résultats à l'optimum technico-économique exprimés en écart par rapport à l'« optimum technique - 20% » (dose d'azote à l'optimum technique - 20% pour chaque culture, hors lentille). On remarque globalement qu'il est relativement plus intéressant de viser l'optimum technico-économique plutôt que de réduire les doses apportées de 20% de façon identique pour chaque culture : +2 à +7 €/ha de marge à l'échelle du système de culture.

Figure 11 : Résultats à l'optimum technico-économique en écart par rapport à l'« optimum technique - 20% » pour une disponibilité de 123 kg N/ha (80%), pour un prix de l'azote à 2.5 €/kg N et un prix du blé à 210 €/t



Source : Résultats des simulations par Arvalis