



Azote et pomme de terre
Bien évaluer les besoins
pour maîtriser les apports

Au champ, les excès d'azote augmentent la durée du cycle végétatif de la pomme de terre, et donc un décalage de maturité qui empêche la formation correcte de la peau et rend les tubercules plus fragiles pendant les opérations de récolte, transport et stockage. Par ailleurs, des disponibilités d'azote trop importantes augmentent le risque de vitrosité, repousses, difformité, cœur creux, verdissement et teneur en nitrate des tubercules. Pendant le stockage et la transformation, les excès d'azote favorisent les risques de noircissement après cuisson, brunissement à la friture et pertes en conservation. Au contraire, les carences azotées provoquent un raccourcissement du cycle végétatif et donc une diminution du rendement et du calibre des tubercules, ainsi qu'une augmentation de la teneur en matière sèche.

De nouvelles références ont permis de réévaluer les besoins en azote des pommes de terre en lien avec les exigences des divers débouchés et les contextes pédoclimatiques. Les quantités apportées et l'efficacité des engrais sont ainsi davantage maîtrisées. En règle générale, la modification des apports selon le débouché, la longueur du cycle et le milieu permet d'améliorer les performances économiques et environnementales des producteurs.

Document rédigé par :
Francesca DEGAN, Grégory VERICEL, Cyril HANNON, Jean-Michel GRAVOUEILLE
(ARVALIS - Institut du végétal)

Contexte

La fertilisation azotée de la pomme de terre est un des leviers majeurs pour optimiser le rendement et la qualité des tubercules. Par ailleurs, les pertes d'azote par lessivage ou volatilisation ont des impacts néfastes sur la qualité de l'air et de l'eau ainsi que sur la production de gaz à effet de serre.

Le raisonnement de la fertilisation azotée se bâtit sur deux piliers : l'estimation des besoins des plantes et le calcul des apports. Les besoins correspondent aux effets de l'azote sur la production, suivant les processus d'absorption, d'accumulation et de redistribution de l'azote. Les fournitures d'azote concernent les formes d'azote disponibles dans le sol et les apports exogènes.

Estimer les besoins

Devenir de l'azote dans la plante

La plante utilise l'azote pour la croissance de ses appareils végétatifs aérien et souterrain. Par conséquent, le besoin en azote est proportionnel à la biomasse totale, selon la longueur du cycle végétatif et hors autres facteurs limitants (ex. : l'eau, les ravageurs souterrains, ...). La disponibilité en azote conditionne la partie foliaire pour les indicateurs longueurs des tiges et surface foliaire. En cas de carences azotées, la plante diminue sa capacité de photosynthèse et donc d'accumulation potentielle de biomasse souterraine (racines et surtout tubercules). Au contraire, un excès de disponibilité en azote a comme principaux effets une augmentation de la durée du cycle, de la surface foliaire et du nombre de ramifications par tige.

L'azote impacte également le développement racinaire et par conséquent le potentiel d'exploration du sol et donc d'absorption de l'azote. Les racines se développent principalement selon l'état de la plante et les caractéristiques physiques et chimiques du sol, telles que la texture, la structure et l'état hydrique. A titre d'exemple, le taux d'exploitation potentiel de l'azote est seulement d'environ 20 % pour les horizons entre 60 et 90 cm de profondeur d'un sol limoneux dont la structure est dégradée.

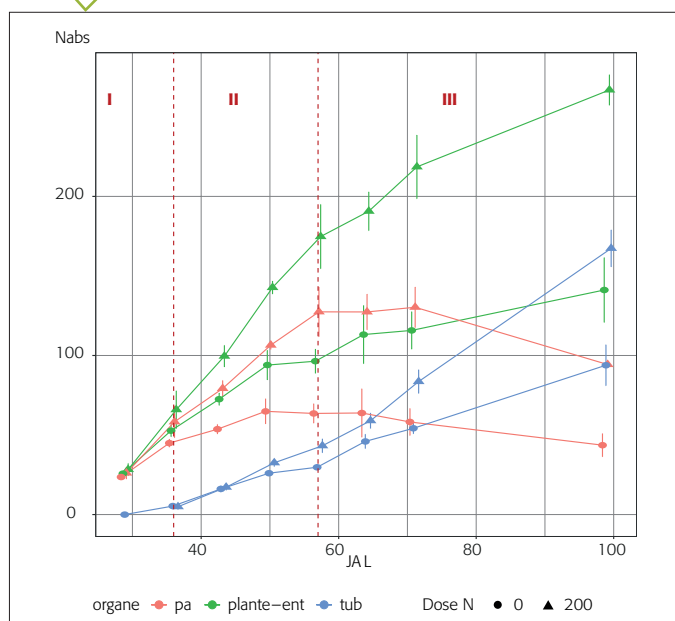
La dynamique d'absorption et d'accumulation de l'azote dans la plante est donc une fonction de la biomasse des différents organes au cours de la croissance. Cette dynamique peut être segmentée en trois phases :

- De la levée jusqu'à l'initiation de la tubérisation : l'azote absorbé est directement corrélé à la croissance des parties aériennes,
- Tubérisation : une fraction croissante de la biomasse produite et donc de l'azote absorbé est allouée aux tubercules,

La variété et les objectifs de production (débouchés) déterminent les besoins de la culture. En pomme de terre, les objectifs de production impactés par la nutrition azotée sont principalement le rendement total, les classes de calibre, la teneur en matière sèche et en nitrate des tubercules. Ces dernières années, des cas de sous fertilisation ont amené certaines régions à réévaluer les besoins en azote des pommes de terre pour mieux prendre en compte les nouvelles variétés, leur productivité et les conditions climatiques plus variables et moins prévisibles.

- À partir du niveau maximal de biomasse atteint par les parties aériennes jusqu'au défanage : la biomasse nouvellement produite et l'azote absorbé sont alloués exclusivement aux tubercules.

Figure 1 : Accumulation de l'azote en fonction des organes (Arvalis, Essai Gueudreville 1996),
avec I levée, II tubérisation, III sénescence (défanage) – pa = Parties aériennes, plante-ent = plante entière, tub = tubercules.





La dynamique d'absorption de l'azote est corrélée positivement avec la croissance de la biomasse des parties aériennes. Ainsi, la fraction la plus importante d'azote est absorbée entre la première et la deuxième phase du cycle. Ensuite, des transferts d'azote ont lieu entre les parties aériennes et les tubercules : la teneur en azote des parties aériennes diminue alors que celle des tubercules augmente, sans être accompagnée d'une hausse de l'absorption de l'azote par les racines. La remobilisation de l'azote des parties aériennes vers les tubercules concerne surtout l'azote des limbes (Biemond & Vos, 1992 ; Millard & Mackerron, 1986).

Appréciation de l'état de nutrition azotée de la plante

La teneur en azote de la biomasse, proche de son maximum, est donc un bon indicateur du statut nutritionnel de la plante. Au-delà d'un certain seuil, variable selon la variété, la biomasse des organes aériens des plantes ne croît plus alors que la plante continue à absorber de l'azote. Ce seuil correspond au point de

rupture de la relation entre la biomasse des parties aériennes et leur teneur en azote, mesurées à la même date pour des plantes ayant reçu des doses croissantes d'azote. L'ensemble de ces seuils pour des niveaux de biomasse croissants permet de tracer la courbe de teneur critique en azote (Figure 2). Les teneurs critiques correspondent aux teneurs minimales en azote des organes aériens pour lesquelles leur biomasse est maximale (Lemaire, 1997).

La courbe de la teneur critique permet de calculer un indicateur de diagnostic d'état nutritionnel de la plante. Pour un niveau de biomasse donnée, le rapport entre la teneur critique en azote (Nc) et la teneur mesurée (Nm) du peuplement observé rend compte de l'état nutritionnel de ce dernier :

$$\text{Indice de Nutrition azotée (INN)} = \text{Nm} (\%) / \text{Nc} (\%)$$

L'INN est donc utilisé pour comparer les teneurs mesurées à un référentiel et estimer les besoins en azote pour un niveau de biomasse donné. Plus l'INN est proche de 1, plus on assure une production de biomasse maximale avec le minimum d'azote.

Les principaux critères de production affectés par une variation du niveau de nutrition azotée sont essentiellement le rendement et la qualité.

Figure 2 : Courbe de teneur critique en azote de la pomme de terre (Duchenne, Machet, & Martin, 1997) avec les données de l'essai ITCF à Gueudreville (45), 1996.

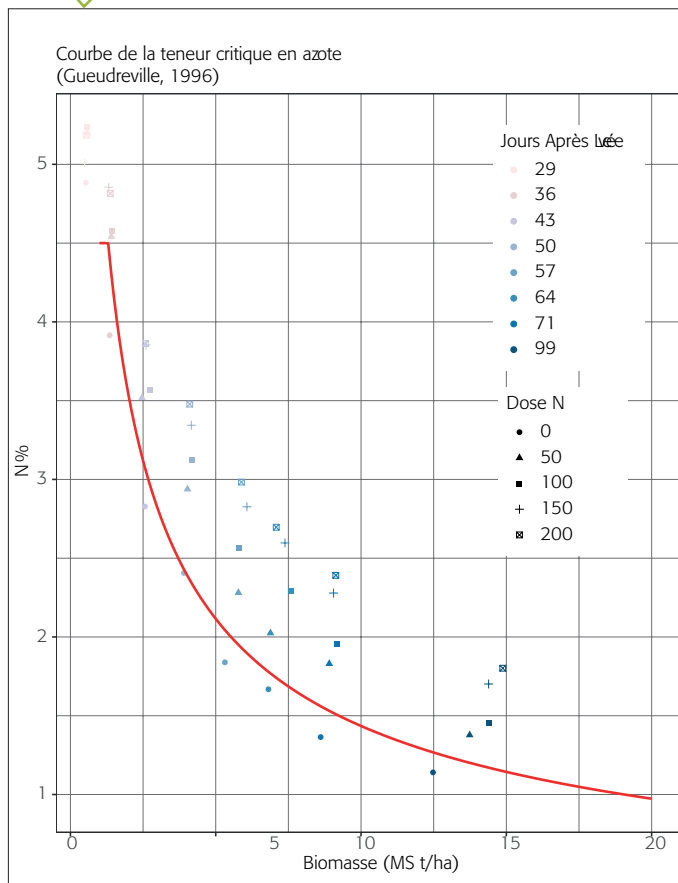
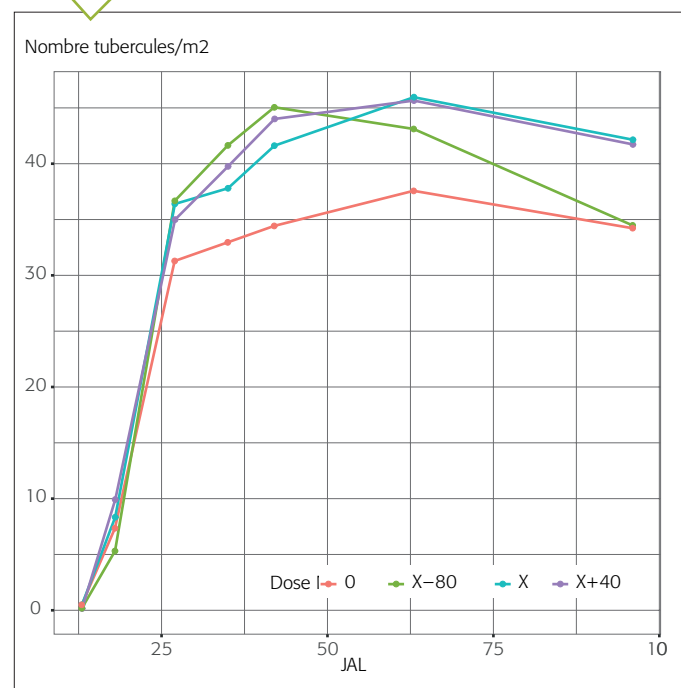


Figure 3 : Évolution du nombre moyen de tubercules >= 15 mm. La nutrition azotée a un impact sur le nombre de tubercules viables puis sur leur grossissement. JAL : Jours Après Levée (variété Amandine, programme Qualtech à Boigneville (91), 2005).





Effets de l'azote sur le rendement

Les indicateurs utilisés pour exprimer la quantité de pommes de terre produites sont le rendement total (t/ha), le nombre de tubercules viables (ayant un calibre moyen supérieur ou égal à 15 mm), la proportion de gros calibre (> 50 mm). Tous ces indicateurs sont corrélés à la nutrition azotée.

La Figure 3 montre la relation entre la nutrition azotée et le nombre de tubercules viables au cours du cycle.

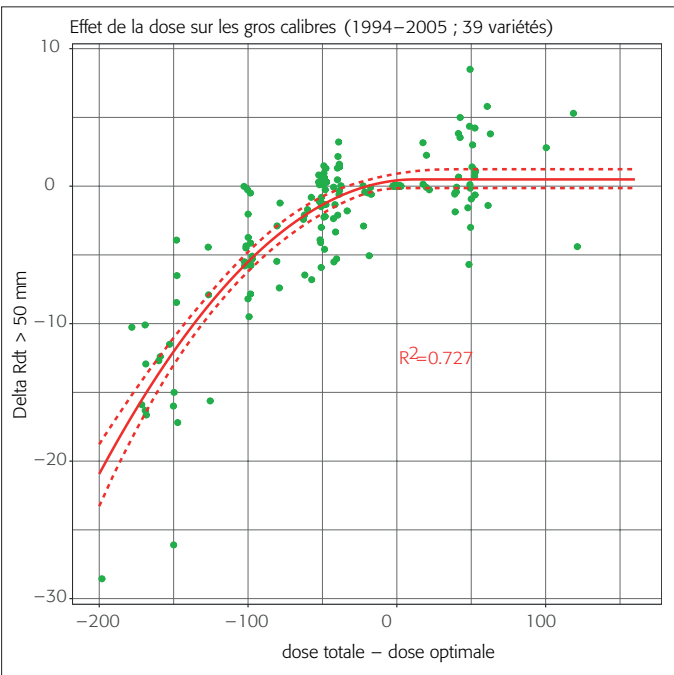
En règle générale, la dose d'azote optimale maximisant le rendement total est aussi la dose maximisant le rendement en calibres supérieurs à 50 mm (Figure 4).

La corrélation entre dose d'azote et rendement est positive, avec un maximum de rendement autour de la dose optimale, valeur au-delà de laquelle le rendement n'augmente plus. En effet, en cas de surfertilisation azotée, le cycle de culture s'allonge en favorisant la croissance foliaire au détriment de la production de tubercules. Ainsi, la teneur en azote des organes aériens et des tubercules augmente, mais la biomasse totale est constante. Les parties aériennes continuent leur développement alors que les quantités d'azote et de sucres remobilisées vers les tubercules n'augmentent pas.

Effets de l'azote sur la qualité

Les critères de qualité affectés par la fertilisation azotée sont principalement les teneurs en matière sèche et en nitrate. La matière sèche, constituée essentiellement d'amidon, impacte les caractéristiques culinaires suivantes : farinosité, consistance de la chair et tenue à la cuisson. Le marché du frais recherche généralement des teneurs en matière sèche modérées, comprises entre 17 et 20 % pour diminuer la farinosité et favoriser la tenue à la cuisson. L'utilisation industrielle de la pomme de terre, en revanche, nécessite des teneurs plus élevées, toujours supérieures à 20 %, pour augmenter le rendement en produits finis, la croustillance des frites, la consistance des purées et diminuer la rétention d'huile. Plus particulièrement, pour la filière de la pomme de terre féculière, la teneur en amidon

Figure 4 : Effet de l'écart à la dose optimale sur les classes de calibre (rendement pour la classe > 50 mm).



La dose optimale permettant d'obtenir le rendement optimal ou 95 % du rendement maximal a été calculée a posteriori. Les valeurs positives de l'écart à la dose optimale correspondent à une surfertilisation et celles négatives témoignent d'un déficit d'azote. (modifiée d'après Chambenoit, Machet, Laurent, & Scheurer, 2002)

impacte le revenu du producteur. Selon la variété, une teneur en matières sèches supérieure à 21 % augmente la sensibilité au noircissement interne («taches cendrées»), l'obtention de purées farineuses et frites trop sèches. Par conséquent, les seuils de ces deux indicateurs diffèrent selon les débouchés (Tableau 1).

Tableau 1 Matière première recherchée selon l'emploi culinaire ou le débouché industriel (source Arvalis).

Produits	Calibre (mm)	Forme	Matière sèche (%)	Sucres réducteurs (%)	Divers
Frites	> 50	Oblongue à allongée	20-25 (21-23)	< 0.4-0.6 (< 0.25)	Absence de noircissement après cuisson
Flocons	> 35		20-25	< 0.6	Délitement facile et absence de noircissement après cuisson
Chips	35 - 60	Oblongue courte à ronde	20-25 (23-25)	< 0.2-0.3 (<0.1)	
Appertisées, stérilisées	< 40 et selon produits		17-21 (18-20)	<0.6	Absence de noircissement après cuisson



Figure 5 : Les carences azotées favorisent le taux de matière sèche (modifiée Chambenoit et al., 2002).

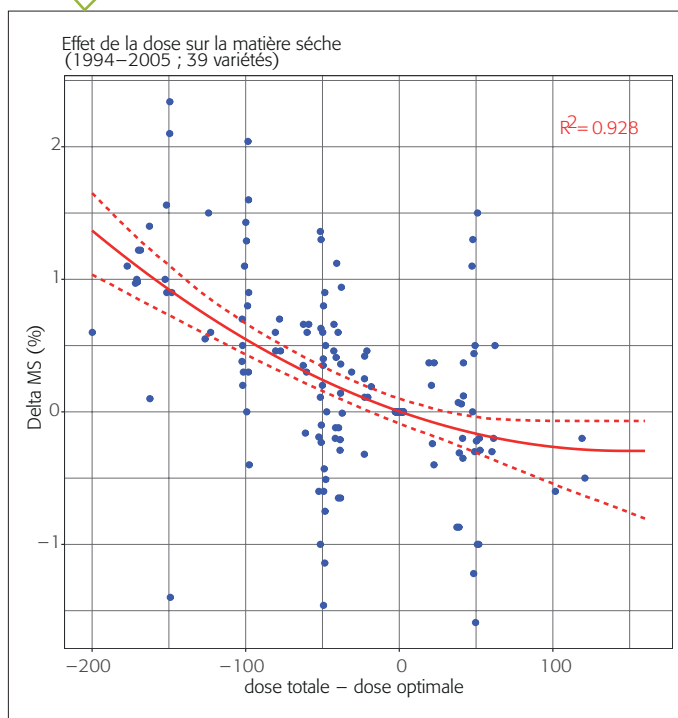
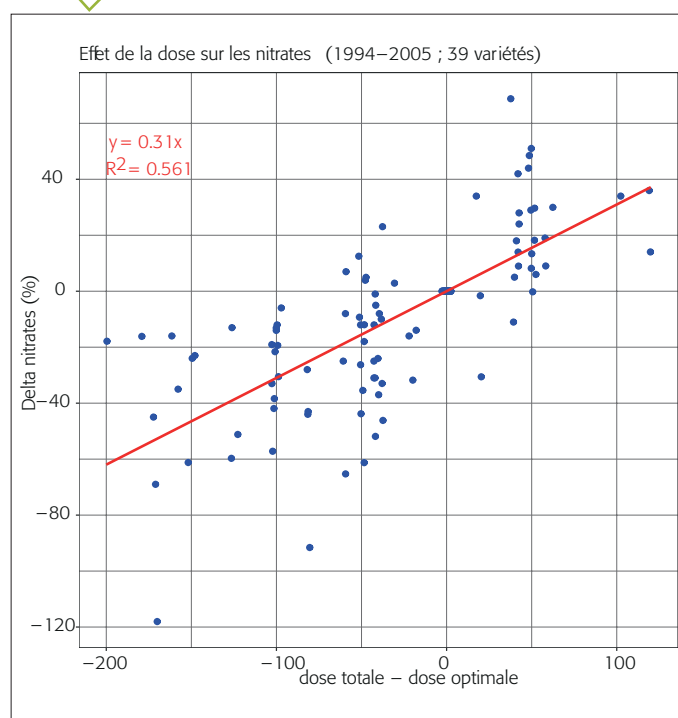


Figure 6 : L'azote induit un enrichissement des tubercules en nitrates (modifiée Chambenoit et al., 2002).



Au cours de la croissance, la teneur en matière sèche augmente avec la biomasse des tubercules et atteint son maximum au moment du jaunissement des fanes. Les carences en azote entraînent une augmentation de la teneur en matière sèche (Figure 5).

La teneur en nitrate des produits destinés à l'alimentation humaine fait l'objet de recommandations pour protéger des risques sanitaires liés à l'ingestion des nitrates. La norme AFNOR NF-V25-111, concernant les itinéraires techniques de production, impose que la teneur en nitrates des tubercules entiers, lavés, non pelés soit inférieure ou égale à 200 mg/kg.

La teneur en nitrate est très dépendante de la variété, des conditions d'absorption de l'azote et est corrélée positivement avec les doses d'azote (Figure 6).

Les teneurs en matière sèche et en nitrate dépendent également d'autres facteurs, tels que le climat de l'année, la variété et l'alimentation hydrique. Par ailleurs, l'appréciation des effets de la fertilisation azotée sur les critères de qualité et de rendement dépend essentiellement de la destination du produit fini (consommation pour le marché du frais ou transformation industrielle - Tableau 2).

Tableau 2 : Effets de l'azote sur le rendement et la qualité (source : Jean Michel GRAVOUEILLE et François LAURENT, Arvalis).

Critères		Effet
Production	Rendement total	+
	Proportion de gros calibre	+
	Durée du cycle	+
Qualité	% MS tubercules	-
	Teneur N03 tubercules	+
	Proportion de déchets	+
	Endommagements (fractures)	Variable
	Noircissement interne	Variable
	Tenue à la cuisson	+ (variable)
	Farinosité de la chair	--
	Noircissement après cuisson	+ (0) (si K faible)
	Brunissement à la friture	+
Pertes en conservation	+	

Beaucoup d'interactions avec la conduite culturale, la variété, le milieu, l'irrigation...

+ : augmentation - : diminution 0 : sans effet

Effet positif Effet négatif en cas de sur fertilisation Effet variable (selon le contexte de production)



Besoins par bassin de production et par filière

Le calcul des besoins

Le calcul des besoins selon la variété et le contexte pédoclimatique s'appuie sur deux indicateurs : l'indice de nutrition azoté (INN) et le rendement exprimé en pourcentage du rendement maximal obtenu dans l'essai (indice de rendement). La relation entre l'INN et l'indice de rendement explicite le rôle de l'azote absorbé dans l'élaboration du rendement des tubercules.

L'objectif d'INN est déterminé à partir des résultats expérimentaux, dans différents milieux et pour chaque débouché, de manière à atteindre 98 % du rendement optimal (Figure 7). Par exemple, la synthèse de plusieurs essais sur des variétés de consommation, démontre que pour assurer 98 % du rendement maximal l'INN doit être supérieur ou égal à 1,35.

Par ailleurs, la gestion de la nutrition azotée permet le pilotage des caractéristiques qualitatives des tubercules, dont les valeurs recherchées sont différentes selon les débouchés.

La révision des besoins

Le référentiel des besoins en azote de la pomme de terre utilisé jusqu'à présent avait été élaboré à partir des données agronomiques et climatiques de la période 1974 à 1998. Le modèle agro-physiologique CRITIC estimant, pour un niveau de satisfaction des besoins en azote donné, la production de biomasse en fonction de la durée du cycle de culture, de la température et du rayonnement a été construit à partir de données expérimentales (Chambenoit et al., 2002). Il permet, in fine, d'estimer les besoins en azote de la pomme de terre pour un objectif d'INN donné.

L'évolution du climat enregistrée ces dernières années, marquée par l'augmentation de la température moyenne et de la fréquence des épisodes extrêmes, remettait en cause les résultats de simulations obtenus à l'aide du modèle CRITIC en se basant sur des données climatiques historiques. En parallèle, l'évolution de la gamme variétale et les différences d'efficacité d'utilisation de l'azote observées selon les variétés remettaient également en question les critères d'évaluation des besoins (Cohan et al., 2018; Love, Stark, & Salaiz, 2005; Maltas, Dupuis, & Sinaj, 2018; Sattelmacher, Klotz, & Marschner, 1990; Sharifi & Zebarth, 2006; Zebarth, Tai, Tarn, de Jong, & Milburn, 2004).

Figure 7 : Effet de l'indice de nutrition azotée (INN) sur l'indice de rendement pour le calibre compris entre 50 et 100 mm. L'INN est mesuré au défanage

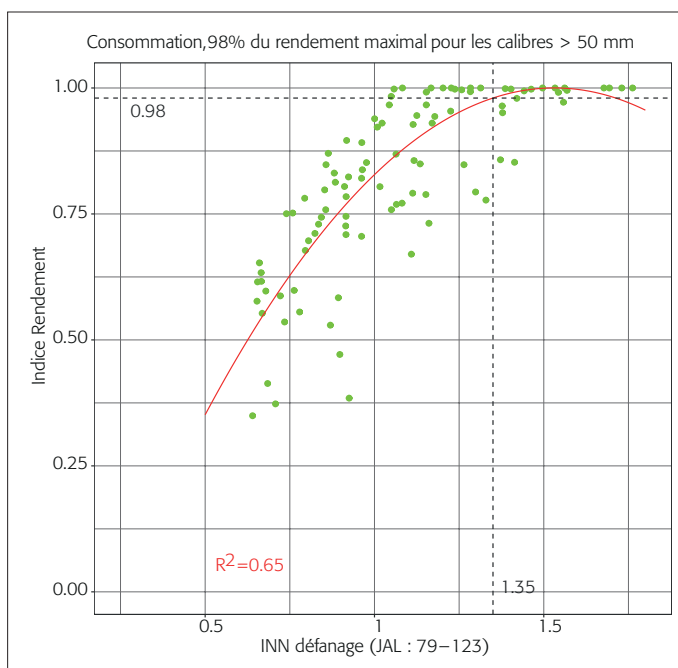


Tableau 3 : Objectifs d'INN par débouché

Débouché	Objectif de production	Nouvel objectif d'INN (pour 98 % du rendement maximal)	Ancien objectif d'INN (pour 95 % du rendement maximal)
Consommation	98 % du rendement maximal pour les calibres > 50 mm	1.35	1.2
Fécule	98 % du rendement maximal (tous calibres)	1.3	1.2
Chair ferme	98 % du rendement maximal pour les calibres de 35 à 50 mm	1.05	1

Des objectifs d'INN ont été fixés pour les différents débouchés de manière à atteindre 98 % du rendement maximal (Tableau 3) à partir de l'analyse de courbes de réponse à l'azote d'essais conduits de 1990 à 2005.

Ensuite, des nouvelles simulations pour différents contextes climatiques et en tenant compte de ces différents objectifs d'INN par débouchés ont été réalisées à l'aide du modèle agro-physiologique CRITIC afin de réévaluer les besoins en azote. Ceci a engendré une augmentation de ces besoins comprise entre 10 et 35 kg N/ha, sous l'effet principal du changement de la période climatique (Tableau 4).



Tableau 4 : Besoins en fonction des bassins de production et des débouchés.

BASSIN 1

		Pomme de terre de Consommation - date défanage								
		01/07-10/07	11/07-20/07	21/07-31/07	01/08-10/08	11/08-20/08	21/08-31/08	01/09-10/09	11/09-20/09	21/09-30/09
date plantation	21/03-31/03	200	225	235	245	250	260	265	265	265
	01/04-10/04	200	220	230	240	250	255	260	260	265
	11/04-20/04	195	215	230	240	245	255	260	260	265
	21/04-30/04	180	205	220	230	240	250	255	260	260
	01/05-10/05	165	185	210	220	235	240	250	255	255
	11/05-20/05	150	170	200	215	225	230	240	250	250
	21/05-31/05	115	150	180	200	210	225	235	240	245
01/06-10/06	45	120	155	180	195	215	225	230	240	

		Pomme de terre Chair ferme - date défanage								
		01/07-10/07	11/07-20/07	21/07-31/07	01/08-10/08	11/08-20/08	21/08-31/08	01/09-10/09	11/09-20/09	21/09-30/09
date plantation	21/03-31/03	155	175	185	190	195	200	205	205	205
	01/04-10/04	155	170	180	190	195	200	205	205	205
	11/04-20/04	150	165	180	185	190	200	200	205	205
	21/04-30/04	140	160	170	180	185	195	195	200	205
	01/05-10/05	125	145	165	175	180	190	195	195	200
	11/05-20/05	115	135	155	165	175	180	185	195	195
	21/05-31/05	90	115	140	155	165	175	180	190	190
01/06-10/06	35	95	120	140	155	165	175	180	185	

		Pomme de terre Grenaille - date défanage								
		20/06-30/06	01/07-10/07	11/07-20/07	21/07-31/07	01/08-10/08	11/08-20/08	21/08-31/08	01/09-10/09	11/09-20/09
date plantation	21/03-31/03	105	110	125	130	140	140	145	150	150
	01/04-10/04	100	110	120	130	135	140	145	145	145
	11/04-20/04	100	105	120	125	130	135	140	145	150
	21/04-30/04	95	100	115	120	130	135	140	140	145
	01/05-10/05	75	90	105	115	125	130	135	140	140
	11/05-20/05	60	85	95	110	120	125	130	135	140
	21/05-31/05	25	60	80	100	110	115	125	130	135
01/06-10/06	0	20	60	85	100	110	115	125	130	

		Pomme de terre Industrie et Féculé - date défanage								
		11/08-20/08	21/08-31/08	01/09-10/09	11/09-20/09	21/09-30/09	01/10-10/10	11/10-20/10	21/10-31/10	
date plantation	01/04-10/04	265	270	275	280	285	285	290	290	
	11/04-20/04	260	265	270	275	280	285	285	290	
	21/04-30/04	255	260	265	275	275	280	285	285	
	01/05-10/05	245	255	260	265	275	275	280	280	
	11/05-20/05	235	245	255	260	265	270	270	275	
	21/05-31/05	220	235	245	255	260	265	265	270	
	01/06-10/06	205	220	235	240	250	255	255	260	
11/06-20/06	190	205	220	235	240	245	250	255		



BASSIN 2

		Pomme de terre de Consommation - date défanage								
		01/07-10/07	11/07-20/07	21/07-31/07	01/08-10/08	11/08-20/08	21/08-31/08	01/09-10/09	11/09-20/09	21/09-30/09
date plantation	21/03-31/03	200	220	230	245	250	260	260	265	270
	01/04-10/04	200	215	230	240	250	255	260	265	270
	11/04-20/04	195	205	225	235	245	255	260	265	265
	21/04-30/04	175	195	210	225	240	245	250	260	265
	01/05-10/05	165	185	200	220	230	245	250	255	255
	11/05-20/05	140	165	195	210	220	235	245	245	250
	21/05-31/05	115	150	175	195	210	225	235	240	245
01/06-10/06	45	125	155	180	200	210	220	230	235	

		Pomme de terre Chair ferme - date défanage								
		01/07-10/07	11/07-20/07	21/07-31/07	01/08-10/08	11/08-20/08	21/08-31/08	01/09-10/09	11/09-20/09	21/09-30/09
date plantation	21/03-31/03	155	170	180	190	195	200	205	205	210
	01/04-10/04	155	170	180	190	195	200	200	205	210
	11/04-20/04	155	160	175	185	190	195	200	205	205
	21/04-30/04	140	155	165	175	185	190	195	200	205
	01/05-10/05	125	145	155	170	180	190	195	195	200
	11/05-20/05	110	130	155	165	170	180	190	190	195
	21/05-31/05	90	115	135	150	165	175	180	185	190
	01/06-10/06	35	100	120	140	155	160	170	180	185

		Pomme de terre Grenaille - date défanage								
		20/06-30/06	01/07-10/07	11/07-20/07	21/07-31/07	01/08-10/08	11/08-20/08	21/08-31/08	01/09-10/09	11/09-20/09
date plantation	21/03-31/03	105	110	120	130	135	140	145	150	150
	01/04-10/04	100	110	120	125	135	140	145	145	150
	11/04-20/04	95	110	115	120	130	135	140	145	150
	21/04-30/04	85	95	110	115	125	130	135	140	145
	01/05-10/05	75	90	100	110	120	130	135	140	140
	11/05-20/05	55	75	90	105	115	120	130	135	135
	21/05-31/05	20	60	80	95	105	115	125	130	135
	01/06-10/06	0	15	65	85	100	110	115	125	130

		Pomme de terre Industrie et Féculé - date défanage								
		11/08-20/08	21/08-31/08	01/09-10/09	11/09-20/09	21/09-30/09	01/10-10/10	11/10-20/10	21/10-31/10	
date plantation	01/04-10/04	260	270	275	280	285	285	290	290	
	11/04-20/04	255	265	270	275	280	285	285	290	
	21/04-30/04	250	255	265	270	275	280	280	285	
	01/05-10/05	240	255	260	265	270	275	275	280	
	11/05-20/05	230	245	255	260	265	270	270	275	
	21/05-31/05	220	235	245	250	260	265	265	270	
	01/06-10/06	205	215	230	240	250	250	255	260	
	11/06-20/06	185	205	220	230	235	240	245	250	



Tableau 4 : Besoins en fonction des bassins de production et des débouchés (suite)

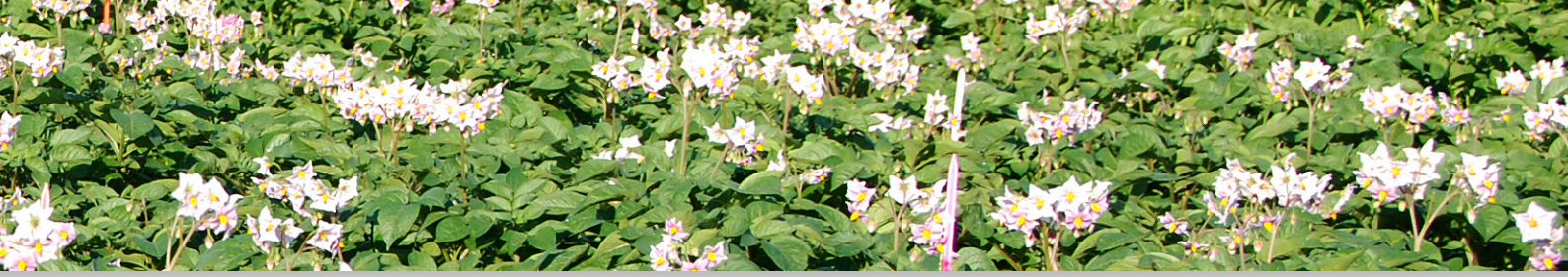
BASSIN 3

		Pomme de terre de Consommation - date défanage								
		01/07-10/07	11/07-20/07	21/07-31/07	01/08-10/08	11/08-20/08	21/08-31/08	01/09-10/09	11/09-20/09	21/09-30/09
date plantation	21/03-31/03	215	230	245	250	260	260	265	270	275
	01/04-10/04	205	225	235	250	255	265	265	270	275
	11/04-20/04	200	215	235	245	255	260	265	265	270
	21/04-30-04	195	210	225	240	245	250	260	265	270
	01/05-10/05	175	195	215	235	240	250	255	260	265
	11/05-20/05	150	180	200	215	230	240	245	255	260
	21/05-31/05	125	160	185	210	220	230	240	245	250
	01/06-10/06	60	125	160	190	210	215	230	235	240

		Pomme de terre Chair ferme - date défanage								
		01/07-10/07	11/07-20/07	21/07-31/07	01/08-10/08	11/08-20/08	21/08-31/08	01/09-10/09	11/09-20/09	21/09-30/09
date plantation	21/03-31/03	165	180	190	195	200	200	205	210	215
	01/04-10/04	160	175	185	195	200	205	210	210	215
	11/04-20/04	155	170	185	190	195	200	205	205	210
	21/04-30-04	150	165	175	185	190	195	200	205	210
	01/05-10/05	140	150	165	180	185	195	200	200	205
	11/05-20/05	120	140	155	165	175	185	190	200	200
	21/05-31/05	100	125	145	165	170	180	185	190	195
	01/06-10/06	45	95	125	150	160	170	175	185	190

		Pomme de terre Grenaille - date défanage								
		20/06-30/06	01/07-10/07	11/07-20/07	21/07-31/07	01/08-10/08	11/08-20/08	21/08-31/08	01/09-10/09	11/09-20/09
date plantation	21/03-31/03	110	120	125	135	140	145	145	150	155
	01/04-10/04	105	115	125	130	140	145	150	150	155
	11/04-20/04	100	110	120	130	135	140	145	150	150
	21/04-30-04	95	105	115	125	135	135	140	145	150
	01/05-10/05	85	100	115	115	130	135	140	145	145
	11/05-20/05	65	85	100	110	120	125	135	140	145
	21/05-31/05	30	65	90	100	115	120	130	135	135
	01/06-10/06	5	25	70	85	105	115	120	125	130

		Pomme de terre Industrie et Féculé - date défanage							
		11/08-20/08	21/08-31/08	01/09-10/09	11/09-20/09	21/09-30/09	01/10-10/10	11/10-20/10	21/10-31/10
date plantation	01/04-10/04	270	275	280	285	285	290	290	295
	11/04-20/04	265	275	280	285	290	290	290	295
	21/04-30-04	260	270	270	280	285	285	290	290
	01/05-10/05	250	260	270	275	280	280	285	285
	11/05-20/05	240	250	260	265	270	275	280	285
	21/05-31/05	225	245	250	260	265	270	275	275
	01/06-10/06	210	225	240	245	255	260	265	265
	11/06-20/06	195	210	220	235	250	250	255	260



BASSIN 4

		Pomme de terre de Consommation - date défanage								
		01/07-10/07	11/07-20/07	21/07-31/07	01/08-10/08	11/08-20/08	21/08-31/08	01/09-10/09	11/09-20/09	21/09-30/09
date plantation	21/03-31/03	230	245	255	265	265	270	275	280	280
	01/04-10/04	225	240	250	260	265	270	275	275	280
	11/04-20/04	215	225	240	255	260	265	270	270	280
	21/04-30/04	205	225	240	250	255	265	265	275	275
	01/05-10/05	195	215	230	240	250	255	260	265	270
	11/05-20/05	155	185	210	225	240	245	255	260	265
	21/05-31/05	140	170	185	210	220	235	240	250	260
	01/06-10/06	50	125	160	185	200	220	225	240	245

		Pomme de terre Chair ferme - date défanage								
		01/07-10/07	11/07-20/07	21/07-31/07	01/08-10/08	11/08-20/08	21/08-31/08	01/09-10/09	11/09-20/09	21/09-30/09
date plantation	21/03-31/03	180	190	200	205	210	210	215	215	220
	01/04-10/04	175	185	195	200	205	210	210	215	215
	11/04-20/04	165	175	190	195	200	205	210	210	215
	21/04-30/04	160	175	185	195	200	205	205	215	215
	01/05-10/05	155	170	180	185	195	200	200	205	210
	11/05-20/05	120	145	160	175	185	190	200	200	205
	21/05-31/05	110	130	145	160	170	185	190	195	200
	01/06-10/06	40	95	125	145	155	170	175	185	190

		Pomme de terre Industrie - date défanage								
		11/08-20/08	21/08-31/08	01/09-10/09	11/09-20/09	21/09-30/09	01/10-10/10	11/10-20/10	21/10-31/10	
date plantation	01/04-10/04	280	285	290	295	295	300	300	300	
	11/04-20/04	275	280	285	290	295	295	295	300	
	21/04-30/04	270	275	280	285	290	295	295	300	
	01/05-10/05	260	270	275	280	285	290	290	295	
	11/05-20/05	250	260	265	275	280	280	285	290	
	21/05-31/05	230	250	255	265	270	275	280	280	
	01/06-10/06	210	230	240	245	255	260	270	270	
	11/06-20/06	195	215	225	235	245	255	260	260	



Figure 8 : Carte des bassins pour l'actualisation des besoins.

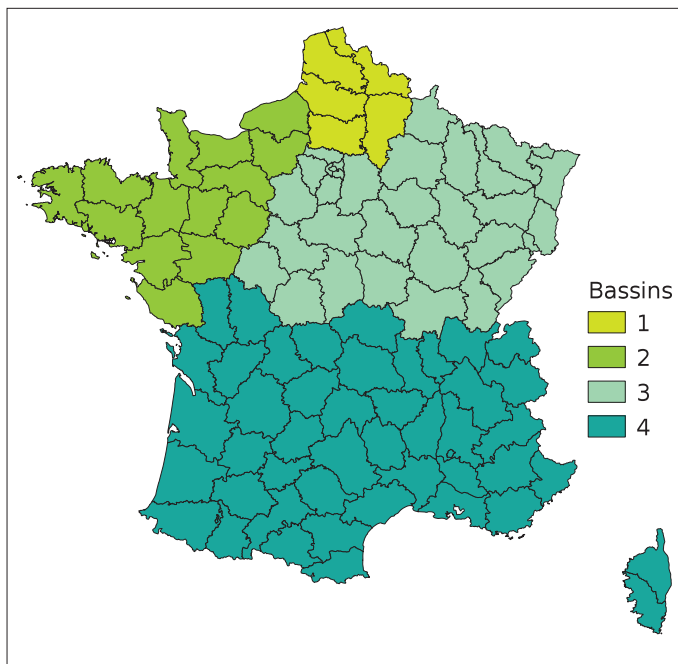
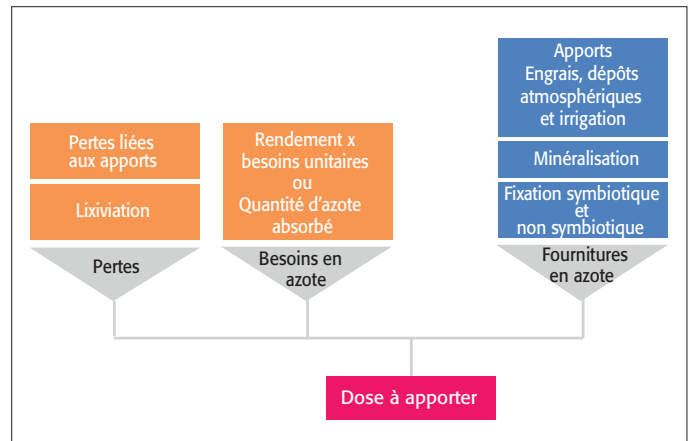


Figure 9 : Le raisonnement de la fertilisation s'appuie sur les besoins déterminés en fonction des débouchés et de la durée du cycle de croissance.



les fournitures du sol par la minéralisation et les pertes persistent toujours dans le calcul d'une dose prévisionnelle, quelle que soit la méthode ou l'outil employé notamment en raison de variabilité climatique. Le raisonnement des modalités d'apport des engrais permet d'augmenter leur efficacité tandis que différents outils de pilotage permettent d'ajuster la dose et en cours de campagne.

Calculer la dose à épandre

Le raisonnement de la fertilisation s'appuie sur la méthode du bilan prévisionnel de l'azote pour calculer la dose totale d'azote à apporter à la culture (COMIFER, 2013; Hébert, 1969). L'échelle de temps de calcul est le cycle de culture, avec l'ouverture à la plantation et la fermeture à la fin de l'absorption de l'azote (défanage ou récolte en vert). La méthode vise à satisfaire les besoins en prenant en compte les fournitures et les pertes en azote (Figure 9).

Les fournitures proviennent de la minéralisation de l'azote des matières organiques (matières organiques du sol, résidus de cultures de rente et de cultures intermédiaires, apports organiques avant ou pendant le cycle végétation et retournements de prairies) et de la fixation symbiotique et non symbiotique par les bactéries du sol. Les retombées atmosphériques et les apports par l'eau d'irrigation peuvent représenter d'autres sources d'azote. Les pertes d'azote sont liées aux processus de lixiviation, de volatilisation consécutive aux apports d'engrais et de dénitrification. Les pertes par volatilisation liées à l'apport d'engrais sont prises en compte grâce au Coefficient Apparent d'Utilisation de l'azote (CAU). Cet indicateur de l'efficacité de l'engrais correspond au rapport de l'écart d'absorption d'azote entre une culture fertilisée et son témoin non fertilisé sur la dose totale apportée.

La dose prévisionnelle, selon la méthode du bilan, peut être calculée grâce à des outils adaptés aux contextes pédoclimatiques et aux arrêtés réglementaires. Néanmoins, des incertitudes sur les besoins en azote,

Modalités d'apports

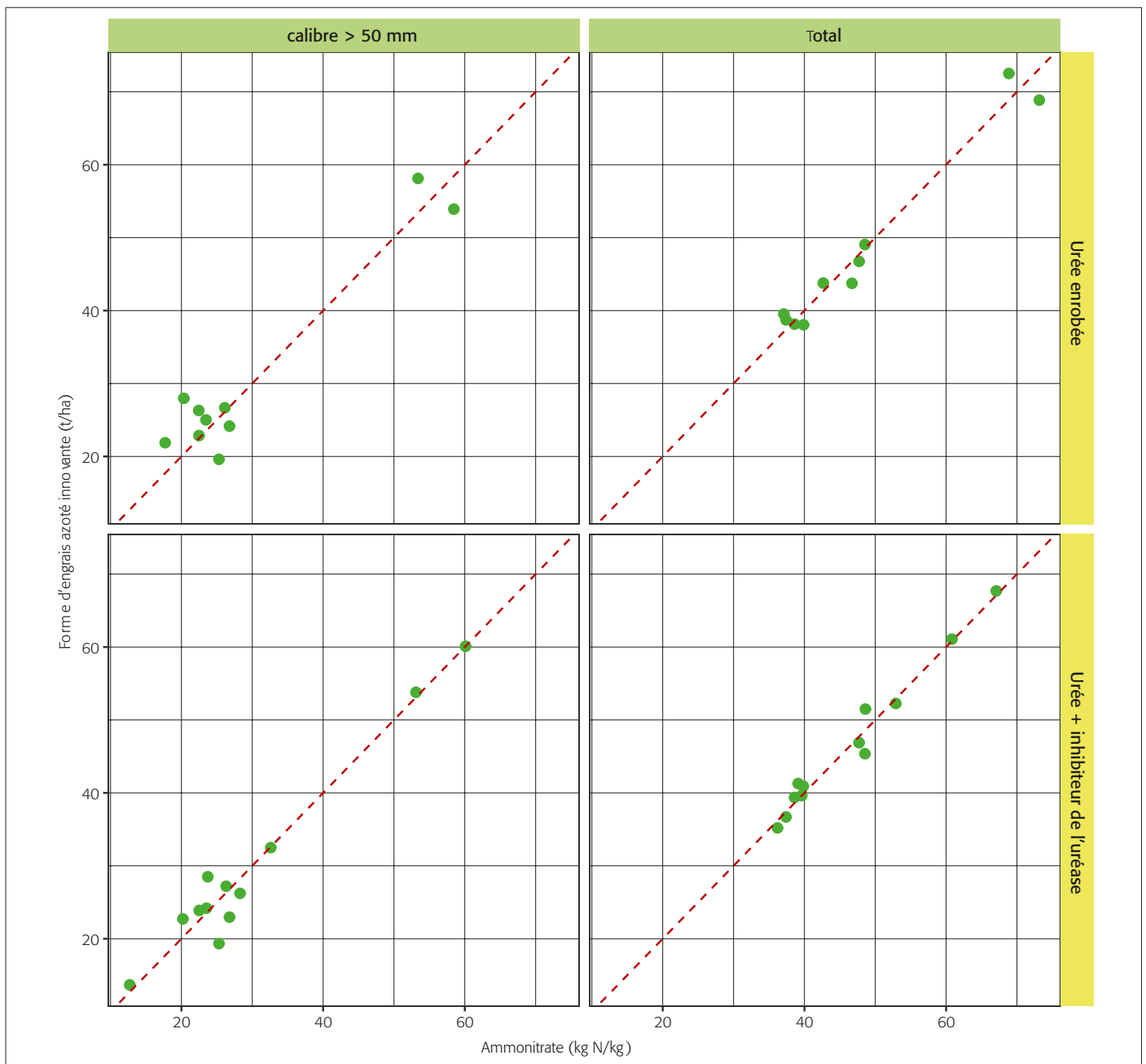
Forme d'engrais

L'ammonitrate et la solution azotée sont les formes d'engrais les plus répandues dans les zones de production de pommes de terre. Récemment, d'autres formes d'engrais sont apparues sur les marchés, dont les urées additionnées d'inhibiteurs d'uréase ou les urées enrobées. Les inhibiteurs d'uréase sont des additifs ralentissant l'action de l'uréase, l'enzyme hydrolysant l'urée en ion ammonium (Hendrickson & Douglass, 1993). Les urées enrobées sont imprégnées d'une couche d'huile se dilatant sous l'effet de la chaleur et mettant ainsi progressivement à disposition de la plante l'azote uréique. L'intérêt de ces nouvelles formes est une diminution des pertes par volatilisation au moment de l'apport pour les premières et une libération de l'engrais plus étalée dans le temps pour les secondes.

Plusieurs réseaux d'essais sont conduits depuis le début des années 2000 pour comparer l'efficacité des différentes formes d'engrais, principalement en région Centre et en Picardie sur des sols limono-argileux. Les résultats montrent que l'ammonitrate, la solution azotée et l'urée sont comparables si les apports réalisés après plantation sont suivis d'un buttage, réduisant fortement les pertes par volatilisation. De plus, pour certains essais, l'irrigation permet une meilleure absorption de l'azote et donc une meilleure efficacité de toutes les formes



Figure 10 : Comparaison du rendement total et pour les calibres > 50 mm (t/ha) obtenus par une urée enrobée et une urée avec inhibiteur de l'uréase avec ceux de l'ammonitrate à doses totales d'azote équivalentes (essais Arvalis de 2014 à 2016).



d'engrais. Plus récemment, en sols de limons profonds de Picardie, d'autres réseaux d'essais ont été mis en place pour évaluer l'efficacité des inhibiteurs d'uréase et des urées enrobées. Les résultats montrent une efficacité comparable entre l'ammonitrate et ces nouvelles formes d'urée (Figure 10).

L'absence de différences de performances sur pomme de terre entre les différentes formes d'engrais peut s'expliquer par des conditions

de valorisation des apports généralement favorables (limitation de la volatilisation grâce à l'enfouissement de l'azote, l'irrigation, etc.) dans le réseau d'essais. Cependant, en situations non irriguées et/ou sans enfouissement de l'azote, l'ammonitrate et les urées avec inhibiteurs d'uréase peuvent afficher de meilleurs résultats que la solution azotée et l'urée classique. Par ailleurs, les considérations d'ordre économique ou logistique (stockage, épandage, etc.) sont également des facteurs à prendre en compte dans le choix des formes d'engrais.

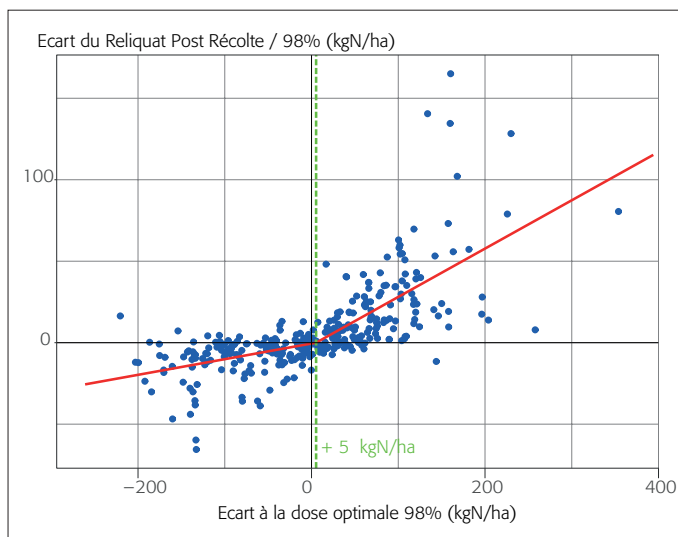


Pilotage et fractionnement

Les incertitudes du calcul de la dose prévisionnelle concernent, d'abord, l'incertitude sur la valeur des besoins, le potentiel de rendement de la parcelle, les fournitures d'azote du sol et le coefficient d'utilisation de l'azote de l'engrais. Des ajustements en cours de campagne sont possibles grâce aux méthodes de pilotage couplées à un fractionnement en plusieurs apports de la dose totale estimée avant plantation. Le fractionnement se justifie par la dynamique d'absorption de l'azote de la plante. En théorie, apporter de l'azote au moment où la plante présente la vitesse de croissance la plus importante permet d'optimiser le coefficient apparent d'utilisation (CAU) de l'engrais. En outre, les pertes par lixiviation et par volatilisation peuvent être diminuées en apportant de l'azote au moment où la capacité des racines à explorer le volume du sol est maximale. En pratique, un report de la dose totale de la levée jusqu'à 60 jours après la levée permet d'améliorer le CAU (Vos, 1999). Cependant, l'effet sur le rendement n'est pas significatif dans la plupart des cas. Par contre, l'amélioration de l'efficacité de l'engrais s'explique par la diminution des pertes par lixiviation et /ou volatilisation. Pour autant, un apport d'au moins 50 kg N/ha à la plantation reste nécessaire pour assurer de taux de croissance en début de cycle favorisant la formation rapide du couvert végétal. Selon la sensibilité des sols à la lixiviation, le fractionnement a donc des effets plus ou moins marqués sur le CAU.

Le pilotage sur pomme de terre repose sur une stratégie de fractionnement en deux apports avec mise en réserve lors du premier apport d'une partie de la dose d'azote totale prévisionnelle. La décision d'apporter ou non cette dose mise en réserve se base ensuite sur le diagnostic de l'état nutritionnel de la plante en cours de végétation.

Figure 11 : Évolution du reliquat post-récolte en fonction de l'écart à la dose optimale. La dose optimale a été calculée pour atteindre 98 % du rendement optimal.



Un outil opérationnel actuellement disponible pour établir ce diagnostic nutritionnel est le YARA-N-TESTER® (YARA-ARVALIS), mesurant la teneur en chlorophylle du feuillage. Les avantages sont l'observation des parcelles sur le terrain et le choix de fréquence des prélèvements. En revanche les prélèvements sont contraignants en termes de temps et l'hétérogénéité des parcelles est difficilement estimée.

Actuellement la proxy- et la télé-détection avec des caméras multispectrales embarquées sur des drones ou des satellites donnent accès à de nouvelles mesures sur l'état nutritionnel des plantes en cours de campagne. Les variables estimées sont la surface foliaire et des indices de végétation liés à la teneur en chlorophylle. La combinaison de ces différents indicateurs permet d'apprécier le statut azoté de la culture en cours de campagne et offre des perspectives intéressantes pour le développement de nouveaux outils de pilotage. Les avantages de ces technologies sont l'exhaustivité de la couverture spatiale, la rapidité et la fréquence d'acquisition des données.

Relever les défis environnementaux

Une faible efficacité des engrais azotés peut être la conséquence de pertes par volatilisation et par lixiviation, responsables d'impacts environnementaux négatifs sur le climat, la qualité de l'air et de l'eau.

L'azote perdu par volatilisation se présente sous forme de gaz ammoniac (NH_3) et d'oxydes d'azote (NO_x). Outre les pertes d'azote pour la culture, l'ammoniac est un gaz polluant précurseur de particules fines tandis que les oxydes d'azote sont des gaz à effet de serre. Les pertes par volatilisation ammoniacale sont réduites grâce à l'enfouissement des engrais au moment de l'apport, aux formes d'engrais moins sensibles à la volatilisation et aux conditions d'épandage en absence de vent, par temps frais et avant une pluie. Les émissions d'oxydes d'azote se produisent au cours de la transformation de l'azote ammoniacal et nitrique par certains micro-organismes du sol. Elles peuvent être minimisées en ajustant les apports par rapport aux besoins et évitant les conditions d'anoxie du sol (structure du sol favorable à l'infiltration de l'eau).

La lixiviation du nitrate peut être maîtrisée grâce à une bonne estimation des besoins, et à des pratiques adaptées au contexte pédoclimatique (choix des formes d'engrais, fractionnement et pilotage des apports). Par exemple, la révision des besoins des pommes de terre devrait permettre de mieux exprimer le potentiel de rendement par zone climatique et par débouché, sans augmenter les reliquats post-récolte (Figure 10). En situation de sous-fertilisation (écart à la dose optimale négatif), une augmentation de la dose N s'accompagne d'une faible augmentation des reliquats post-récolte. En revanche, en situation de surfertilisation (écart positif), une augmentation de la dose entraîne une forte augmentation des reliquats. La rupture de pente s'opère pour un écart à la dose optimale de 5 kg N/ha en prenant comme rendement optimal 98 % du rendement max.



Références

- . Biemond, H., & Vos, J. (1992). Effects of Nitrogen on the Development and Growth of the Potato Plant. 2. The Partitioning of Dry Matter, Nitrogen and Nitrate. *Annals of Botany*, 70(1), 37-45. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a088437>
- . Chambenoit, C., Machet, J. M., Laurent, F., & Scheurer, D. (2002). Fertilisation azotée de la pomme de terre: Guide pratique. (Alternatech, ITCF, & ITPT, Eds.) (2002nd ed.). Quae. Retrieved from <https://books.google.fr/books?id=bkDxIKa72HoC>
- . Cohan, J. P., Hannon, C., Houilliez, B., Gravouille, J. M., Geille, A., Lampaert, E., & Laurent, F. (2018). Effects of Potato Cultivar on the Components of Nitrogen Use Efficiency. *Potato Research*, 61(3), 231-246. <https://doi.org/10.1007/s11540-018-9371-6>
- . COMIFER. (2013). Calcul de la fertilization azote. Guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales. Cultures annuelles et prairie. Retrieved from http://www.comifer.asso.fr/images/stories/publications/brochures/BROCHURE_AZOTE_20130705w_eb.pdf
- . Duchenne, T., Machet, J. M., & Martin, M. (1997). Potatoes. In G. Lemaire (Ed.), *Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops* (pp. 119-130). Berlin, Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-60684-7_7
- . Hébert, J. (1969). La fumure azotée du blé. *Bulletin Technique d'Information*, 244, 755-766.
- . Hendrickson, L. L., & Douglass, E. A. (1993). Metabolism of the urease inhibitor n-(n-butyl)thiophosphoric triamide (nbpt) in soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 25(11), 1613-1618. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(93\)90017-6](https://doi.org/10.1016/0038-0717(93)90017-6)
- . Lemaire, G. (1997). *Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops*. (G. Lemaire, Ed.). Berlin, Heidelberg: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-60684-7>
- . Love, S. L., Stark, J. C., & Salaiz, T. (2005). Response of four potato cultivars to rate and timing of nitrogen fertilizer. *American Journal of Potato Research*, 82(1), 21-30. <https://doi.org/10.1007/BF02894916>
- . Maltas, A., Dupuis, B., & Sinaj, S. (2018). Yield and Quality Response of Two Potato Cultivars to Nitrogen Fertilization. *Potato Research*, 61(2), 97-114. <https://doi.org/10.1007/s11540-018-9361-8>
- . Millard, P., & Mackerron, D. K. L. (1986). The effects of nitrogen application on growth and nitrogen distribution within the potato canopy. *Annals of Applied Biology*, 109(2), 427-437. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1986.tb05334.x>
- . Sattelmacher, B., Klotz, F., & Marschner, H. (1990). Influence of the nitrogen level on root growth and morphology of two potato varieties differing in nitrogen acquisition. *Plant and Soil*, 123(2), 131-137. <https://doi.org/10.1007/BF00011258>
- . Sharifi, M., & Zebarth, B. J. (2006). Nitrate influx kinetic parameters of five potato cultivars during vegetative growth. *Plant and Soil*, 288(1-2), 91-99. <https://doi.org/10.1007/s11104-006-9092-5>
- . 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. *The Journal of Agricultural Science*, 133(3), 263-274.
- . Zebarth, B. J., Tai, G., Tarn, R., de Jong, H., & Milburn, P. H. (2004). Nitrogen use efficiency characteristics of commercial potato cultivars. *Canadian Journal of Plant Science*, 84(2), 589-598. <https://doi.org/10.4141/P03-050>



ARVALIS - Institut du végétal
3, rue Joseph et Marie Hackin
75116 PARIS
Tel 01 44 31 10 00
www.arvalisinstitutduvegetal.fr

Membre de :



Avec la participation financière du Compte d'Affectation Spéciale pour le Développement Agricole et Rural (CASDAR), géré par le ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, et des filières pommes de terre (CNIPT et GIPT)