

Introduction

L'azote (N) est un élément essentiel à la croissance et au développement des plantes, influençant directement le rendement et la qualité des cultures, notamment la pomme de terre. Toutefois, cette culture présente une efficacité d'utilisation de l'azote (Nitrogen Use Efficiency, NUE) relativement faible en comparaison à d'autres espèces cultivées, en raison d'un système racinaire peu profond, d'une faible densité racinaire et d'une période limitée d'absorption de l'azote.

Dans un contexte de durabilité agricole, l'amélioration de l'efficacité d'utilisation de l'azote constitue un enjeu majeur afin de concilier performance agronomique et réduction des pertes environnementales (lessivage des nitrates, émissions de N₂O). Cet enjeu est particulièrement critique en agriculture biologique, où les apports en azote sont limités et dépendent principalement de la minéralisation de la matière organique, des rotations culturales et des amendements organiques (Möller et al., 2007).

L'efficacité d'utilisation de l'azote (NUE) est un indicateur intégré résultant de processus physiologiques et environnementaux complexes (Ravi et al., 2008). Elle est classiquement décomposée en deux composantes principales (Moll et al., 1982) : le NUpE (Nitrogen Uptake Efficiency) et le NUtE (Nitrogen Utilization Efficiency). Ainsi :

$$NUE = NUpE \times NUtE \text{ Équation 1}$$

Cependant, différentes approches existent selon la prise en compte des sources d'azote (fertilisation seule ou sol + minéralisation) et des indicateurs de production (biomasse totale ou rendement en tubercules) (Errebhi et al., 1998 ; Zebarth et al., 2004).

Par ailleurs, l'indice de nutrition azotée (Nitrogen Nutrition Index, NNI) constitue un indicateur clé du statut azoté de la culture, basé sur la relation entre biomasse et concentration critique en azote (Lemaire et Gastal, 1997). Le NNI permet d'interpréter la performance de la plante en relation avec la disponibilité en azote et constitue un outil central pour relier gestion de l'azote, croissance et pertes environnementales (Sadras et Lemaire, 2014).

Des indicateurs complémentaires sont également utilisés afin de mieux caractériser les pertes et la réponse agronomique, notamment l'efficacité de récupération de l'azote (NRE) et l'efficacité agronomique (AE).

L'objectif de ce document est de proposer un protocole permettant de quantifier l'efficacité d'utilisation de l'azote (NUE) chez différents génotypes de pomme de terre, afin d'identifier et sélectionner les variétés présentant les meilleures performances d'absorption et d'utilisation de l'azote.

1. Conduite des essais

1.1. Parcelles expérimentales et dispositif

L'analyse de l'efficacité azotée est réalisée dans le cadre d'un essai en plein champ reposant sur un plan expérimental avec répétitions (3 à 4). Conformément aux recommandations de De Haan et al. (2014), un plan en blocs complets randomisés avec quatre répétitions est privilégié pour les essais incluant une évaluation du rendement. Ce dispositif permet de réduire l'erreur expérimentale en neutralisant les principales sources d'hétérogénéité du champ, telles que la fertilité du sol ou la pente.

Dans ce type de plan, tous les traitements (clones ou variétés avancées) sont répartis dans des blocs de taille égale, chaque bloc contenant une répétition complète de l'ensemble des génotypes. Lorsque la variabilité du champ est prévisible (pente, gradient de texture ou de fertilité), les blocs sont disposés sous forme de bandes longues et étroites orientées selon ce gradient. En l'absence de variabilité identifiable, les blocs sont conçus de manière aussi carrée que possible afin de minimiser les biais.

Chaque parcelle est délimitée par des repères visuels (plantes rouges ou blanches selon la variété), facilitant l'identification des tubercules lors de la récolte. Si cette méthode n'est pas applicable, des espacements supplémentaires peuvent être ajoutés entre les parcelles pour assurer une séparation nette et faciliter la circulation.

Chaque parcelle élémentaire est divisée en deux zones fonctionnelles :

- une zone dédiée aux lectures optiques et aux prélèvements destructifs en cours de saison ;
- une zone réservée à l'évaluation du rendement final.

La division peut être réalisée dans le sens de la longueur ou de la largeur, selon la configuration du champ et le nombre de buttes disponibles.

1.2. Fertilisation azotée en agriculture biologique

Dans le cadre de cet essai conduit en agriculture biologique, un niveau unique de fertilisation azotée est appliqué à l'ensemble des parcelles expérimentales. L'objectif de ce dispositif n'est pas d'étudier la réponse de la culture à des doses croissantes d'azote, mais de comparer les génotypes dans une condition azotée identique et représentative des pratiques biologiques régionales.

Dans les essais de comparaison variétale visant à évaluer l'efficacité d'utilisation de l'azote (NUE), un niveau de fertilisation identique entre génotypes est fréquemment utilisé afin de limiter les interactions entre effet dose et effet variétal. Cette approche permet de mieux caractériser les différences intrinsèques entre variétés concernant :

- la capacité d'absorption de l'azote disponible (NUpE),
- l'efficacité de conversion de l'azote absorbé en biomasse et en rendement (NUtE),
- ainsi que l'efficacité globale d'utilisation de l'azote (NUE).

Cette approche est cohérente avec les travaux conduits en agriculture biologique sur la sélection variétale et l'efficacité azotée chez la pomme de terre (Lammerts van Bueren et al., 2011 ; Tiemens-Hulscher et al., 2014 ; Zebarth et al., 2004 ; Bohman et al., 2023). L'azote est apporté sous forme d'engrais organiques commercialisables et autorisés en agriculture biologique,

sélectionnés pour leur homogénéité et leur dynamique de minéralisation relativement prévisible. Ces fertilisants présentent généralement une libération d'azote plus homogène et reproductible que les fumiers bruts ou certains composts très hétérogènes. Leur utilisation permet ainsi d'améliorer l'homogénéité de disponibilité en azote entre parcelles et de renforcer la robustesse de l'évaluation des paramètres d'efficacité azotée des géotypes étudiés.

2. Caractérisation des conditions du milieu

La caractérisation du milieu constitue une étape essentielle pour interpréter correctement les performances d'efficacité azotée. Les conditions du sol, de l'eau et du climat influencent directement l'absorption de l'azote, la croissance de la plante et la dynamique de minéralisation. Les paramètres suivants sont donc suivis tout au long du cycle cultural.

2.1. Azote minéral du sol

Le stock d'azote minéral du sol est déterminé avant la plantation et réévalué à différents stades clés du cycle cultural (levée, tubérisation, fermeture du rang, pré-défanage). Les prélèvements sont réalisés par horizons (0–30 cm, 30–60 cm, 60–90 cm), ce qui permet de caractériser la distribution verticale de l'azote disponible. La profondeur d'échantillonnage peut être ajustée en fonction du stade phénologique et de l'objectif de la mesure. Pour un bilan pré-fertilisation, une profondeur d'échantillonnage de 0 à 90 cm est généralement suffisante pour estimer le stock d'azote minéral et déterminer la dose d'azote conseil en début de saison. Pour l'évaluation des reliquats post-récolte, il est recommandé d'échantillonner jusqu'à 90 cm, afin de quantifier l'azote potentiellement lixiviable présent sous la principale zone d'exploration racinaire.

Les analyses sont effectuées selon des méthodes standardisées, telles que l'extraction au KCl, ou d'autres méthodes normées selon les laboratoires.

2.2. Temporalité des analyses

Les analyses de sol sont réalisées à trois moments complémentaires :

- Pré-plantation : estimation du stock initial d'azote disponible pour la culture.
- En cours de végétation (stades clés : levée, fermeture du couvert, tubérisation, pré-défanage) : suivi de la dynamique d'azote disponible.
- Post-récolte : évaluation des reliquats d'azote minéral et des pertes potentielles.

Cette approche permet d'améliorer l'estimation de l'azote réellement disponible pour la plante et d'affiner les indicateurs d'efficacité, notamment NUpE et NUE.

2.3. Humidité du sol

L'état d'humidité du sol est suivi en cours de saison à l'aide de sondes tensiométriques Watermark (Irrometer Company, Californie), consistant en des capsules poreuses. Les sondes sont placées à une profondeur de 25 cm à partir du sommet de la butte et distribuées de manière uniforme dans les parcelles d'expérimentations. Les sondes permettent de détecter les valeurs de tensions en eau du sol, exprimées en kPa, comparées à des valeurs seuils de confort hydrique ou d'insuffisance en eau. Le sol est considéré à la capacité au champ pour des valeurs entre 10 et 30 kPa. Jusqu'à 100 kPa, l'eau est considérée comme facilement disponible pour les plantes.

2.4. Conditions climatiques

Les conditions climatiques locales sont enregistrées à l'aide d'une station météo installée directement sur le site expérimental ou, à défaut, à partir de la station de référence la plus proche. Les variables suivies incluent notamment la température de l'air, les précipitations, le rayonnement,...

Ces données permettent de replacer les observations agronomiques dans leur contexte environnemental et d'interpréter les variations de croissance, de minéralisation et d'absorption de l'azote.

3. Evaluation de l'efficience azotée

L'évaluation de l'efficience azotée vise à quantifier la capacité des génotypes à absorber l'azote disponible et à le convertir en rendement, dans un contexte où l'azote est apporté sous forme organique et libéré progressivement. Le cadre conceptuel retenu définit la Nitrogen Use Efficiency (NUE) comme le produit de l'efficacité d'absorption de l'azote (NUpE) et de l'efficacité d'utilisation de l'azote absorbé (NUtE), selon le modèle proposé par Bock (1984) et largement utilisé dans les travaux sur la pomme de terre (Fageria et al., 2008 ; Tiwari et al., 2018). Les études de Zebarth et al. (2004) ont montré que les cultivars commerciaux diffèrent fortement dans ces deux composantes, indépendamment des conditions d'apport en azote. De même, une étude française conduite sur cinq ans dans les régions de Beauce, Picardie et Nord-Pas-de-Calais a démontré que les variétés 'Agata', 'Bintje', 'Innovator', 'Lady Claire' et 'Spirit' présentent des besoins en azote différents pour atteindre leur rendement optimal, confirmant l'importance d'une évaluation variétale approfondie même en agriculture biologique.

3.1. Suivi de la couverture du sol

La couverture du sol est évaluée (par exemple deux fois par semaine) à partir de l'émergence et jusqu'à la fermeture du couvert. Le suivi est réalisé sur une bande de 75 cm de large et environ 90 cm de long. Deux méthodes complémentaires peuvent être utilisées selon les conditions de terrain : l'analyse d'images via application mobile ou l'utilisation d'une grille d'observation.

Dans la première méthode, deux photographies verticales (« downward-facing ») sont prises au-dessus du sillon, en mode sombre, à hauteur standardisée, en centrant l'image entre les deux buttes. Ces images sont analysées avec l'application Canopeo, qui identifie les pixels verts et calcule la proportion de surface végétale vivante couvrant le sol. Cette approche permet une quantification rapide, reproductible et objective de la couverture foliaire, et s'avère particulièrement adaptée aux suivis fréquents en conditions de plein champ.



Figure 1: Image de Canopéo

Lorsque les conditions lumineuses ou matérielles ne permettent pas l'utilisation de Canopeo, une grille d'analyse de 75 cm × 90 cm composée de 100 cellules rectangulaires est utilisée. Chaque cellule contenant plus de 20 % de feuillage est comptabilisée comme 1 % de couverture foliaire. Cette méthode, bien que plus manuelle, permet une estimation robuste de la couverture du sol et constitue une alternative fiable aux mesures numériques.

Le suivi de la couverture du sol permet de caractériser la vitesse d'installation du couvert, un déterminant majeur de la demande précoce en azote et de la capacité d'interception lumineuse. Les travaux de Tiemens-Hulscher et al. (2014) ont montré que les géotypes les plus efficaces en agriculture biologique sont ceux qui développent rapidement un couvert dense, atteignent un indice foliaire élevé en début de cycle et maintiennent ce couvert plus longtemps. Cette dynamique influence directement l'efficacité d'absorption de l'azote (NUpE), car une interception lumineuse précoce stimule la croissance et l'absorption d'azote, et elle influence également l'efficacité d'utilisation de l'azote (NuTE), car un couvert fonctionnel prolongé favorise la conversion de l'azote absorbé en biomasse et en rendement. Le suivi régulier de la couverture constitue ainsi un indicateur précoce et sensible des différences variétales d'efficacité azotée.

3.2. Mesures optiques

Les mesures optiques constituent un volet essentiel de l'évaluation de l'efficacité azotée, car elles permettent de caractériser simultanément la structure du couvert, son fonctionnement photosynthétique et le statut azoté des plantes. Ces observations sont réalisées régulièrement entre la fermeture du couvert et le début de la sénescence afin de suivre la dynamique de croissance et l'évolution de l'état physiologique de la culture au cours du cycle cultural. Pour chaque parcelle élémentaire, un minimum de plusieurs mesures est nécessaire afin de limiter l'erreur expérimentale et de prendre en compte l'hétérogénéité intra-parcellaire. Les valeurs retenues pour les analyses correspondent à la moyenne des mesures réalisées au sein de chaque parcelle élémentaire, puis à la moyenne des répétitions du dispositif expérimental, constituées de trois ou quatre parcelles répétées.

Des photographies hémisphériques du couvert sont acquises à hauteur standardisée au moyen d'un appareil équipé d'un objectif fisheye, puis analysées avec le logiciel CAN-EYE afin d'estimer différents paramètres structuraux du couvert, notamment le Leaf Area Index (LAI), le Plant Area Index (PAI) et la fraction de couverture végétale. Le LAI correspond à la surface foliaire développée par unité de surface de sol et constitue un indicateur majeur de la capacité d'interception lumineuse et du potentiel photosynthétique du couvert. Comme le rappellent Sharma et Bali (2020), le LAI est fortement corrélé à la productivité végétale, bien que cette relation dépende également de facteurs tels que la quantité de lumière interceptée, l'architecture du couvert, le coefficient d'extinction lumineuse et l'efficacité d'utilisation de l'azote. Chez la pomme de terre, un développement rapide d'un couvert présentant un LAI élevé en début de cycle est généralement associé à une interception plus efficace du rayonnement et à une meilleure absorption de l'azote disponible.

En complément, des mesures d'indicateurs foliaires sont réalisées à l'aide d'un chlorophyllomètre portatif de type SPAD, tel que le Minolta SPAD-502 ou un appareil équivalent. Les mesures sont effectuées sur des folioles pleinement développées et représentatives de la partie médiane du couvert. Les chlorophyllomètres fournissent une estimation indirecte de la

teneur en chlorophylle des feuilles, laquelle est étroitement liée à leur concentration en azote. De nombreuses études ont démontré leur pertinence pour le diagnostic azoté, notamment celles de Markwell et al. (1995), Uddling et al. (2007) et Richardson et al. (2002), qui montrent que les chlorophyllomètres portatifs constituent une méthode rapide, non destructive et fiable pour estimer la teneur en azote foliaire. Ces mesures permettent d'identifier précocement d'éventuelles carences azotées et d'alimenter le calcul d'indicateurs intégrateurs tels que le Nitrogen Nutrition Index (NNI).

Des mesures spectrales complémentaires peuvent également réalisées à l'aide de capteurs de type GreenSeeker, N-Sensor ou dispositifs équivalents permettant le calcul de différents indices de végétations tel que le Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Le NDVI constitue un indice spectral couramment utilisé pour estimer la biomasse verte, la vigueur végétative et l'état physiologique du couvert. Les travaux de Tucker (1979), Gitelson (2004) et Haboudane et al. (2004) ont montré sa forte corrélation avec la biomasse aérienne et le développement foliaire, bien qu'un phénomène de saturation puisse apparaître pour des couverts très denses présentant des valeurs élevées de LAI. Dans le cas de la pomme de terre, cet indice permet de suivre efficacement la dynamique de croissance du couvert et d'établir des relations entre développement végétatif, absorption d'azote et production de biomasse.

Les outils présentés ci-dessus ne constituent toutefois pas une liste exhaustive des méthodes mobilisables pour le suivi du statut physiologique et azoté des cultures. D'autres approches de phénotypage et de télédétection peuvent être intégrées selon les conditions expérimentales et le matériel disponible. Parmi celles-ci figurent notamment la fluorescence chlorophyllienne (Maxwell & Johnson, 2000, Ben Abadllah et al, 2020), l'imagerie multispectrale ou hyperspectrale (Thenkabail et al., 2012), les capteurs embarqués sur drones (Hunt et al., 2010), ou encore les systèmes de télédétection proximale embarqués sur tracteur (Mulla, 2013). Ces technologies permettent d'accéder à des informations complémentaires relatives à l'activité photosynthétique, à la température foliaire, au stress hydrique ou à l'hétérogénéité spatiale du couvert. Leur combinaison peut améliorer la précision de l'estimation des paramètres structuraux et physiologiques et contribuer à une caractérisation plus fine de l'efficience d'utilisation de l'azote.

L'intégration conjointe des indicateurs structuraux et physiologiques tels que le LAI, le PAI, le SPAD, le NDVI et le NNI permet ainsi de décrire de manière intégrée la dynamique du couvert végétal, son fonctionnement photosynthétique et son statut nutritionnel azoté. Cette approche constitue un levier important pour analyser les différences variétales d'efficience azotée en agriculture biologique et pour relier les caractéristiques du couvert aux performances agronomiques observées.

3.3. Prélèvement d'échantillons de plantes entières et analyses

Les prélèvements destructifs sont réalisés à quatre stades clés du cycle : développement végétatif, tubérisation, pré-sénescence et récolte. À chaque date, six plantes par parcelle élémentaire sont prélevées afin d'obtenir un échantillon représentatif tout en limitant l'impact sur la parcelle. Lorsque le dispositif expérimental le permet, des prélèvements additionnels peuvent être effectués particulièrement entre 25 et 50 JAE. Cette période correspond à une phase critique de la croissance végétative, durant laquelle la demande en azote augmente rapidement ; ces prélèvements intermédiaires permettent ainsi de suivre plus finement l'évolution du statut azoté des cultures et d'alimenter le calcul du NNI en cours de saison. Les plantes sont séparées

en trois compartiments (feuilles+tiges, racines, tubercules), lavées, puis pesées en frais. Elles sont ensuite séchées à 80 °C pendant 48 heures afin de déterminer la matière sèche. Les échantillons secs sont broyés. La détermination de l'azote total peut ensuite être réalisée selon plusieurs méthodes de référence, incluant la spectrométrie proche infrarouge (NIRS, FOSS NIRSystems 6500, Silver Spring, MD, USA), la combustion de Dumas (LECO, St Joseph, MI, USA) et la méthode de Kjeldahl.

Ces prélèvements de plantes permettent d'estimer la biomasse aérienne et souterraine, la teneur en azote des différents organes et la quantité totale d'azote absorbée par la plante.

3.3.1. Teneur en azote (%N)

La teneur en azote correspond à la concentration d'azote dans la matière sèche de l'organe analysé. Elle est exprimée en pourcentage de matière sèche (% MS) :

$$\%N = \frac{\text{Masse d'azote dans l'échantillon}}{\text{Masse de matière sèche}} \times 100 \quad \text{Équation 2}$$

Cette variable est utilisée pour évaluer le statut azoté de la culture et constitue la base du calcul de l'indice de nutrition azotée (NNI). Toutefois, la teneur en azote seule ne permet pas d'estimer directement la quantité totale d'azote absorbée par hectare.

3.3.2. Quantité d'azote absorbé par organe (kg N ha⁻¹)

La quantité d'azote absorbé par chaque organe est obtenue en combinant la teneur en azote et la biomasse sèche produite :

$$N_i \text{ (kg N ha}^{-1}\text{)} = \left(\frac{\%N_i}{100} \right) \times MS_i \quad \text{Équation 3}$$

où :

- $\%N_i$ = teneur en azote de l'organe i ,
- MS_i = matière sèche de l'organe i exprimée en kg MS ha⁻¹.

Cette approche permet d'estimer l'azote réellement accumulé dans chaque compartiment de la plante.

3.3.3. Calcul de la concentration moyenne pondérée en azote de la plante

La concentration moyenne en azote de la culture doit tenir compte de la contribution relative de chaque organe à la biomasse totale. Elle est calculée comme une moyenne pondérée :

$$\%N_{\text{moy}} = \frac{\sum_i (\%N_i \times MS_i)}{\sum_i MS_i} \quad \text{Équation 4}$$

où i représente les différents organes analysés.

Chez la pomme de terre, les organes généralement considérés sont :

- les feuilles et tiges,

- les tubercules.

Les racines sont généralement exclues des calculs du NNI et des courbes critiques de dilution azotée, car :

- leur contribution à la biomasse totale est relativement faible,
- leur échantillonnage est difficile et peu reproductible,
- les modèles de dilution critique développés pour la pomme de terre reposent principalement sur la biomasse aérienne et les tubercules.

Cette approche permet de représenter plus fidèlement l'état nutritionnel réel de la culture.

3.3.4. Calcul de l'azote total absorbé par la culture

L'azote total absorbé par la culture (N_{abs}) est obtenu en additionnant l'azote accumulé dans l'ensemble des organes considérés :

$$N_{abs} = \sum_i N_i \text{ Équation 5}$$

Cette variable représente l'azote total prélevé par la culture et constitue un indicateur central dans l'évaluation de l'efficacité d'utilisation de l'azote.

3.4. Détermination du rendement final

Une évaluation agronomique du rendement est réalisée (voir protocole n°3).

3.5. Détermination des paramètres d'efficacité azotée mesurés à partir des prélèvements de plantes

3.5.1. Efficacité d'absorption de l'azote

L'efficacité d'absorption de l'azote (Nitrogen Uptake Efficiency, NUpE) décrit la capacité de la culture à prélever l'azote disponible dans le système sol-plante. Elle constitue la première composante du NUE et reflète principalement :

- l'efficacité du système racinaire,
- la vitesse d'installation du couvert,
- la synchronisation entre disponibilité de l'azote et demande de la plante,
- ainsi que la capacité du génotype à valoriser l'azote minéralisé.

La NUpE est calculée selon :

$$NUpE = \frac{N_{abs}}{N_{dispo}} \text{ Équation 6}$$

où :

- N_{abs} = azote total absorbé par la culture (kg N ha⁻¹),
- N_{dispo} = azote disponible dans le système (kg N ha⁻¹).

L'azote disponible comprend :

- l'azote minéral initial du sol,
- l'azote minéralisé pendant la saison culturale,
- ainsi que l'azote apporté par les fertilisants organiques ou minéraux.

La NUpE est exprimée :

- soit comme un rapport sans unité,
- soit en kg N absorbé par kg N disponible.

Cette définition est particulièrement adaptée aux systèmes biologiques ou à faibles intrants, où la minéralisation du sol représente une source majeure d'azote. Elle est cohérente avec les recommandations de Zebarth et al. (2004), Gastal et al. (2015) et Bohman et al. (2023).

Une NUpE élevée traduit généralement une bonne capacité d'absorption de l'azote. Toutefois, dans certaines situations, elle peut également refléter une forte compétition pour un azote limitant. Son interprétation doit donc être réalisée conjointement avec le NNI et le rendement.

Certaines études utilisent des définitions simplifiées basées uniquement sur l'azote fertilisant appliqué (Errebhi et al., 1999), ou estiment la minéralisation par différence entre un témoin non fertilisé et un traitement fertilisé (Errebhi et al., 1998 ; Zvomuya et al., 2002). Ces approches sont cependant moins adaptées aux systèmes biologiques.

3.5.2. Efficience d'utilisation de l'azote absorbé

L'efficience d'utilisation de l'azote (NUE) décrit la capacité de la plante à convertir l'azote absorbé en biomasse ou en rendement. Elle reflète l'efficience physiologique du génotype, incluant la photosynthèse, la translocation des assimilats, la partition vers les tubercules et la durée de fonctionnement du couvert. La NUE est exprimée en kg de rendement par kg d'azote absorbé, ou en $t\ ha^{-1}\ kg^{-1}\ N\ ha^{-1}$. Elle est calculée selon :

$$NUE = \frac{Y}{N_{abs}} \text{ Équation 7}$$

où Y représente le rendement en tubercules ($t\ ha^{-1}$ en frais ou en matière sèche). Deux approches existent dans la littérature : une NUE basée sur la biomasse totale (Swain et al., 2014 ; Zebarth et al., 2004) et une NUE basée sur le rendement commercialisable. Dans ce protocole, la NUE basée sur le rendement est privilégiée, car elle correspond à l'objectif agronomique principal.

3.5.3. Indice de récolte

L'interprétation de la NUE doit tenir compte de l'indice de récolte (Harvest Index, HI) qui décrit la capacité de la plante à allouer la biomasse produite vers les organes récoltés, en particulier les tubercules chez la pomme de terre. Il est défini comme :

$$HI = \frac{MS_{tubercules}}{MS_{totale}} \text{ Équation 8}$$

Comme l'ont montré Gastal et al. (2015) et Hawkesford (2012), deux génotypes peuvent présenter une NUtE similaire en biomasse totale mais des indices de récolte différents, conduisant à des rendements très contrastés. Une NUtE élevée traduit une bonne conversion de l'azote en rendement, mais peut également refléter une situation de stress azoté où la plante privilégie la formation de tubercules au détriment de la biomasse aérienne. L'analyse conjointe du NNI est donc indispensable pour éviter les interprétations erronées.

3.5.4. Indice de nutrition azotée

Le NNI permet d'évaluer l'adéquation entre l'azote réellement absorbé par la culture et les besoins nécessaires à une croissance optimale. Il est défini comme le rapport entre la concentration moyenne en azote de la plante (Equation 4) et la concentration critique correspondant à une biomasse donnée.

La concentration moyenne en azote est calculée comme une moyenne pondérée des teneurs en azote des différents organes, généralement la biomasse aérienne et les tubercules selon le stade de développement, les racines n'étant pas incluses dans le calcul en raison de leur faible contribution relative et des difficultés d'échantillonnage.

La concentration critique en azote suit une relation de dilution en fonction de la biomasse selon la forme générale :

$$N_c = a \cdot MS^{-b} \text{ Equation 9}$$

Dans les conditions belges, la courbe de référence pour la variété Bintje (Ben Abdallah et al., 2016) est exprimée par :

$$N_c = 5.37 \cdot MS^{-0.45} \text{ Equation 10}$$

Où MS correspond à la biomasse sèche (parties aériennes et tubercules) de la culture. Cette relation traduit la diminution progressive de la concentration en azote avec l'augmentation de la biomasse, phénomène classique de dilution.

Le NNI permet de diagnostiquer le statut nutritionnel de la culture : un NNI proche de 1 indique un état optimal, un NNI inférieur à 1 traduit une limitation en azote susceptible de réduire la croissance et le rendement, tandis qu'un NNI supérieur à 1 reflète un excès d'azote avec un risque accru de pertes environnementales.

3.5.5. Efficacité globale d'utilisation de l'azote (NUE)

L'efficacité globale d'utilisation de l'azote (Nitrogen Use Efficiency, NUE) combine les deux composantes principales de l'efficacité azotée, à savoir l'efficacité d'absorption de l'azote (NUpE) et l'efficacité d'utilisation de l'azote absorbé (NUtE) (Moll et al., 1982 ; Bock, 1984). Elle s'exprime comme le produit de ces deux termes (calculé par l'équation 1) et représente la quantité de rendement produite par unité d'azote disponible dans le système sol-plante.

La NUE permet d'intégrer simultanément la capacité de la culture à capter l'azote disponible dans le système sol-plante et à le convertir en production économique (Moll et al., 1982 ; Bock, 1984). Une NUE élevée traduit généralement une bonne performance globale du système, mais peut également être observée dans des situations de limitation en azote, notamment lorsque le statut nutritionnel de la plante (NNI) est inférieur à l'optimum, traduisant une efficacité

apparente liée à une forte contrainte de disponibilité en azote (Lemaire & Gastal, 2019 ; Sadras & Lemaire, 2014).

À l'inverse, une NUE modérée associée à un NNI proche de 1 correspond le plus souvent à une situation agronomiquement optimale, caractérisée par un équilibre entre disponibilité en azote, absorption et utilisation par la culture (Lemaire et al., 2008 ; Gastal et al., 2015 ; Bohman et al., 2023). Cette approche intégrée NNI–NUE est largement recommandée pour l'interprétation des performances azotées, afin d'éviter des conclusions biaisées basées sur un seul indicateur.

Une NUE faible peut résulter d'une limitation de l'absorption de l'azote (NUpE), d'une inefficacité dans sa conversion en biomasse ou en rendement (NUtE), ou encore de contraintes environnementales telles que le stress hydrique ou biotique affectant la croissance et la dynamique d'absorption (Fageria et al., 2008 ; Zebbarth et al., 2004 ; Gastal et al., 2015).

3.5.6. Indicateurs complémentaires et conditions d'application

Dans le cadre de ce dispositif expérimental, certains indicateurs classiquement utilisés dans les études d'efficacité azotée ne peuvent pas être calculés. En particulier, l'efficacité de récupération de l'azote (NRE) et l'efficacité agronomique (AE) nécessitent la présence d'au moins deux niveaux de fertilisation ou d'un traitement témoin sans apport d'azote afin de comparer les réponses de la culture.

Or, dans ce protocole, un seul niveau d'apport azoté est appliqué à l'ensemble des variétés dans un objectif de comparaison génotypique en conditions identiques. Par conséquent, ces indicateurs ne sont pas mobilisés dans l'analyse principale.

Cependant, dans un dispositif incluant un traitement témoin non fertilisé, les indicateurs suivants peuvent être calculés :

Indicateur	Formule	Unité	Condition nécessaire
NRE	$(\text{Nabs fertilisé} - \text{Nabs témoin}) / \text{Napporté}$	kg N kg ⁻¹	témoin + fertilisé
AE	$(\text{Rendement fertilisé} - \text{rendement témoin}) / \text{Napporté}$	t kg ⁻¹ N	témoin + fertilisé

Ces indicateurs permettent d'évaluer respectivement la récupération de l'azote apporté par la culture et la réponse agronomique en termes de rendement. Ils complètent utilement les analyses NUpE, NUtE, NUE et NNI lorsque le dispositif expérimental le permet.

4. Analyses statistiques

Pour analyser les données de rendement, un modèle linéaire mixte sera utilisé afin de tenir compte à la fois des effets fixes (notamment l'effet variété) et des effets aléatoires (bloc, répétition, site le cas échéant). Ce type de modèle permet de gérer la structure expérimentale et d'augmenter la robustesse des comparaisons. Lorsque la structure des données le permet, une analyse de la variance (ANOVA) simple ou à deux facteurs pourra également être réalisée. Les comparaisons multiples entre variétés seront effectuées à l'aide de tests post-hoc appropriés (ex. test de Tukey) afin de distinguer les groupes significativement différents.

Les analyses statistiques seront principalement réalisées sous le logiciel **R**, à l'aide des packages lme4 (modèles mixtes), emmeans (comparaisons de moyennes) et ggplot2 (visualisation). Dans les cas plus simples, ou pour un traitement rapide des données, Excel pourra être utilisé à titre complémentaire. Le seuil de signification retenu pour les tests statistiques est $\alpha = 0,05$. Les résultats seront interprétés en tenant compte de cette limite, avec une attention particulière portée à la cohérence des résultats entre répétitions et sites.

5. Bibliographie

- Möller, K., J. Habermeyer, V. Zinkernagel & H. Reents, 2007. Impact and interaction of nitrogen and Phytophthora infestans as yield-limiting and yield reducing factors in organic potato (*Solanum tuberosum* L.) crops. Potato Research 49: 281-301.
- Finckh, M.R., E. Schulte-Gelderman & C. Bruns, 2006. Challenges to organic potato farming: disease and nutrient management. Potato Research 49: 27-42.
- Van Delden, A., 2001. Yield and growth of potato and wheat under organic N-management. Agronomy Journal 93: 1370-1385.