

EYBALIN Damien<sup>(1)</sup>, DEGAN Francesca<sup>(1)</sup>, VERICEL Grégory<sup>(1)</sup>, HANNON Cyril<sup>(2)</sup>, TOURSEL Anaïs<sup>(2)</sup>, DE SOLAN Benoit<sup>(3)</sup>, BEAUCHÊNE Katia<sup>(3)</sup>, FOURNIER Antoine<sup>(3)</sup>, COHAN Jean-Pierre<sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup>ARVALIS – pôle agronomie (France) – [f.degan@arvalis.fr](mailto:f.degan@arvalis.fr); <sup>(2)</sup>ARVALIS – expert régional pomme de terre (France); <sup>(3)</sup>ARVALIS – Adaptation des cultures aux contextes agronomiques, génétiques et phénotypage (France);

AIRBUS, ACOLYANCE, CA 51, CA59-62, CA76, CETA Haut de Somme, EXPANDIS, GITEP, LUNOR, MAC CAIN, ROQUETTE, SETAB, TERREOS et UNEAL

## INTRODUCTION

La fertilisation azotée a de grands impacts sur le rendement et la qualité. Cependant, un excès d'azote génère une plus faible efficacité d'utilisation de l'azote (NUE) et des risques accrus de pertes d'azote qui peuvent avoir un impact sur l'environnement (pollution de l'eau, de l'air et des sols, notamment les émissions de GES). La pomme de terre présente une NUE relativement faible (de l'ordre de 50 à 60 %) par rapport à d'autres cultures, en raison de son système racinaire naturellement peu profond et peu développé. En effet, l'optimisation de l'efficacité d'utilisation de l'azote (NUE) pour la pomme de terre constitue un défi pour les producteurs de pommes de terre, mais également pour la rentabilité et la compétitivité des agriculteurs. Parmi les nombreuses façons d'optimiser la fertilisation azotée, la répartition de l'application de l'azote constitue une approche adaptée pour mieux correspondre aux besoins en azote et à son apport. Ajuster les dates de plantation, la variété de culture et les pratiques de gestion de la fertilisation sont des leviers clés pour faire face à l'adaptation aux changements climatiques. Plusieurs systèmes d'aide à la décision ont été développés pour optimiser les apports d'engrais azotés. Parmi ceux-ci, ceux qui utilisent des technologies de télédétection ont été davantage développés et appliqués ces dernières décennies, notamment pour la culture du blé, mais peu de travaux ont été réalisés pour d'autres cultures, telles que la pomme de terre.

**Objectif du projet : pouvons-nous développer un Système d'Aide à la Décision (OAD) pour la fertilisation azotée dans la culture de la pomme de terre ?**

### Questions de recherche :

**Taux :** Quelle quantité d'azote totale doit être appliquée à la plantation ?

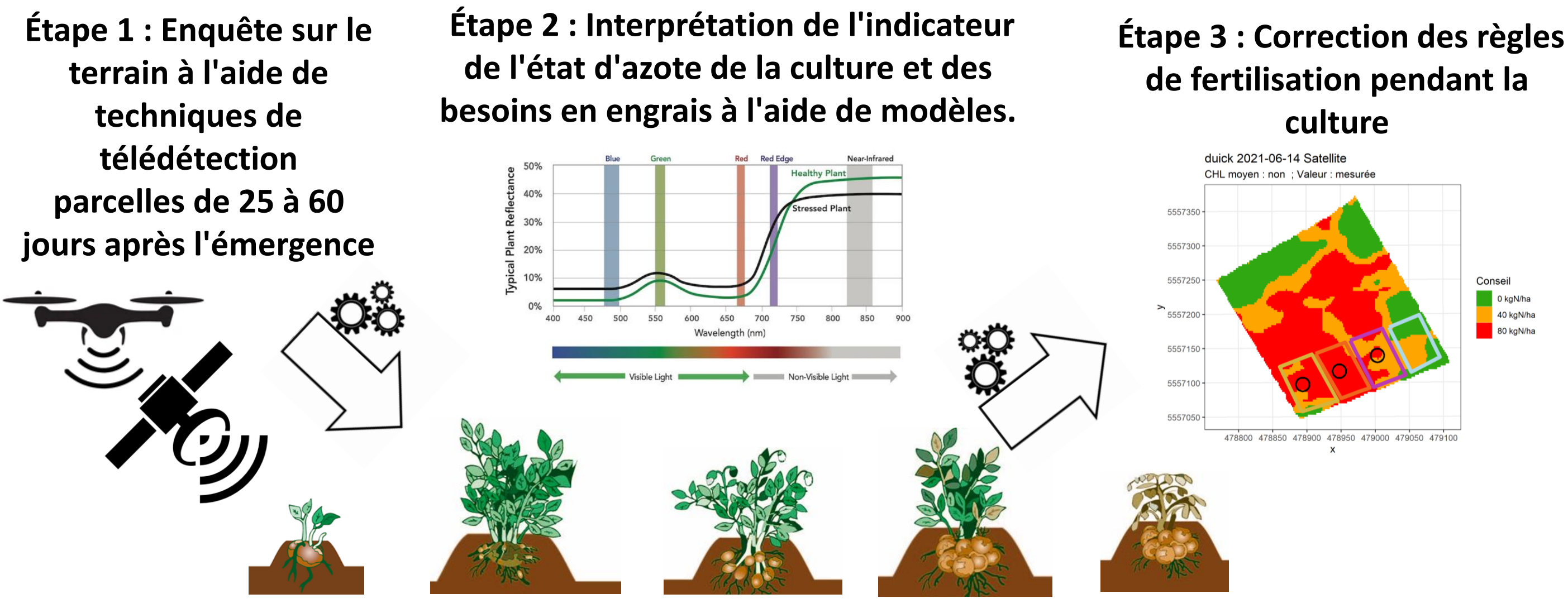
**Répartition :** Quels sont les taux appropriés de fourniture d'azote supplémentaire ?

**Timing :** À quelles étapes du cycle de la culture l'apport d'azote est-il le plus efficace ?

**Diagnostic :** La culture de pommes de terre souffre-t-elle d'une carence en azote ?

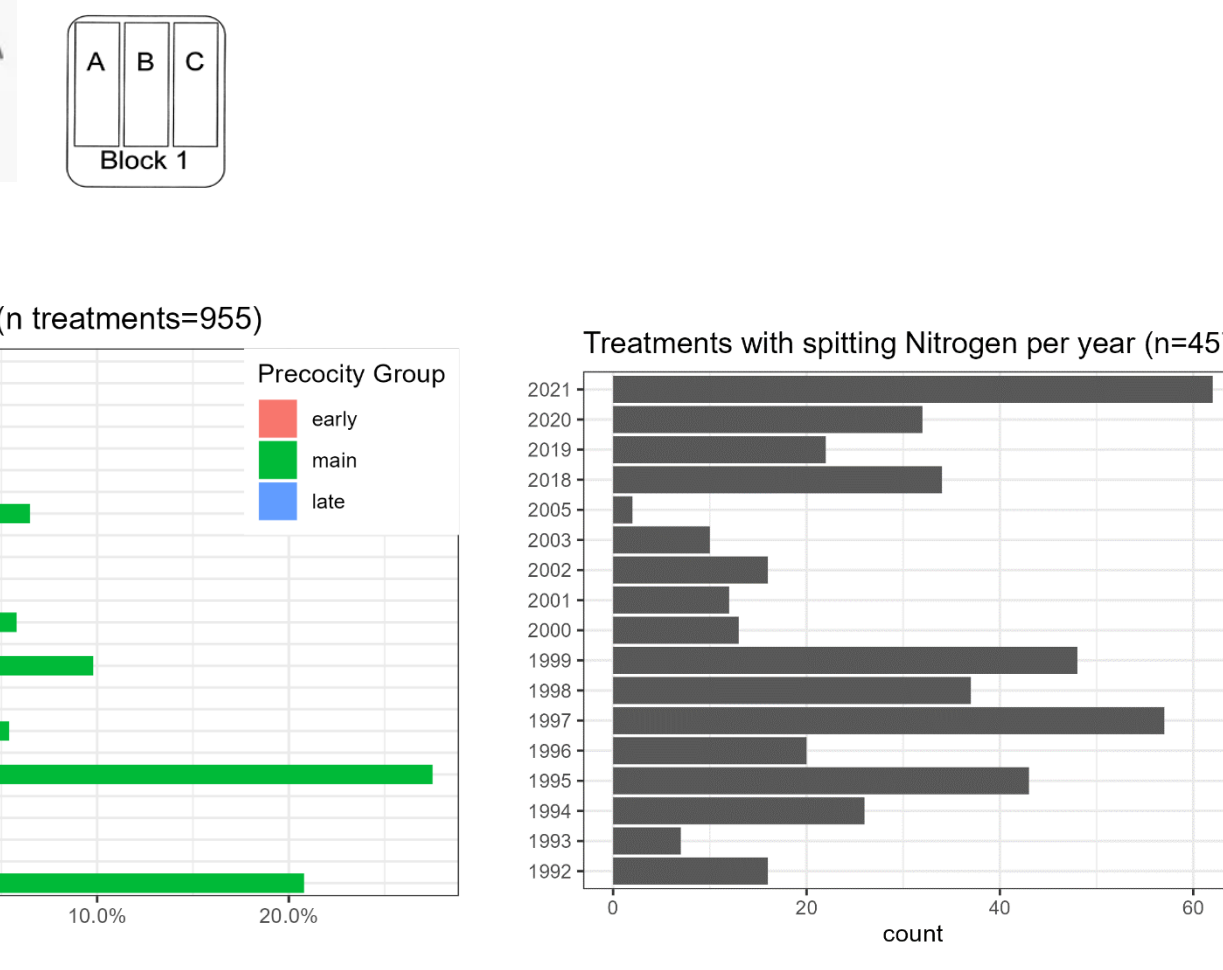
**Pronostic :** Combien d'azote la culture de pommes de terre a-t-elle besoin en termes de fertilisation ?

**Action :** Construire un modèle pour estimer l'apport en azote à la culture de pommes de terre pendant la saison de croissance et fournir des directives aux agriculteurs sur la manière de modifier leurs pratiques de fertilisation.

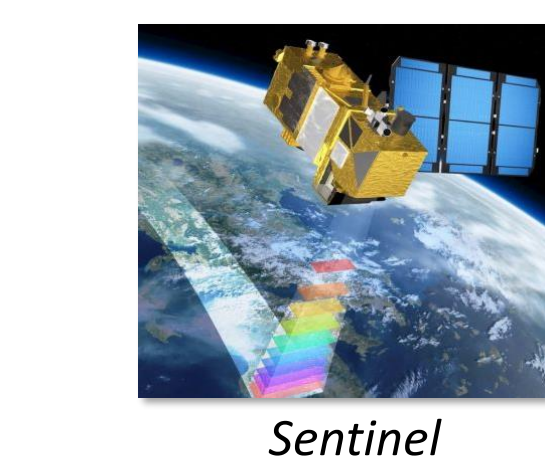


## METHODE Données: 3 réseaux d'essais – ~130 essais de pomme de terre

- Directives de modélisation :** 45 essais en micro-parcelles avec des traitements d'azote fractionnés (1991 à 2021)
- Calibration du modèle :** 50 essais en micro-parcelles avec des images de drone (2016-2021)
- Validation du modèle :** 30 essais sur des bandes de terrain à la ferme pour évaluer les performances du modèle, avec des images de drone et de satellite (2019-2021)



### Traitement des mesures des capteurs et des données agronomiques



Relation entre le taux optimal d'azote et le rendement total optimal en tubercules.

Réponse de l'apport en azote ajustée avec un modèle quadratique-plateau.

**Inversion du modèle de transfert radiatif (RTM) :** Modèle PROSAIL (PROSPECT + SAIL) (Jacquemoud et al., 2009 ; Berger et al., 2018)

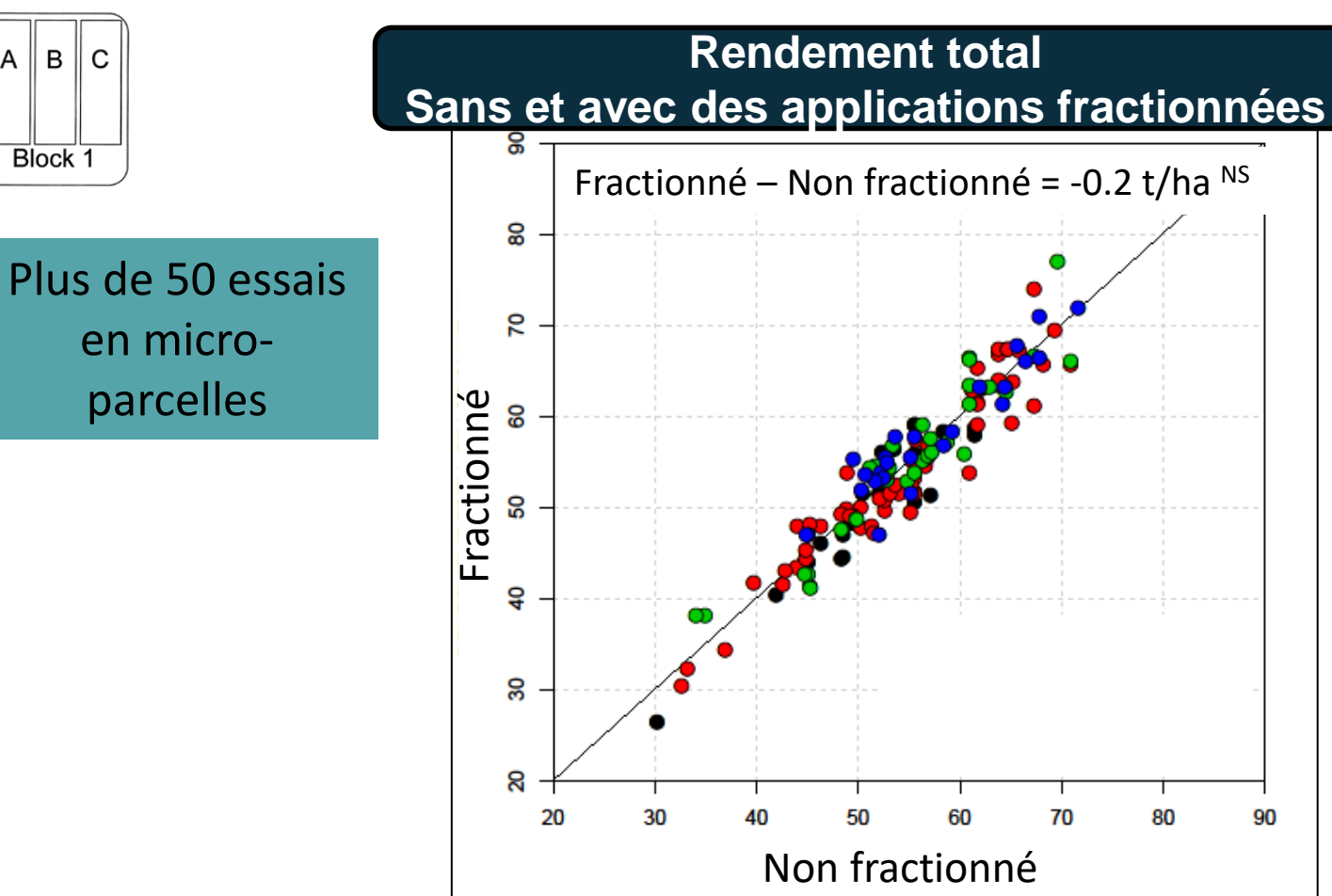
- LAI** = Indice de Surface Foliaire, soit la moitié de la surface totale des éléments verts du couvert par unité de surface horizontale au sol. L'ISF quantifie l'épaisseur du couvert végétal.
- CHL** = Estimation de la concentration en chlorophylle a et b.
- FCOVER** = Fraction de Couverture Végétale correspond à la fraction du sol couverte par de la végétation verte. En pratique, cela quantifie l'étendue spatiale de la végétation.

- Rendement (t/ha) et Rendement commercialisable (t/ha)
- Matière sèche (%)
- Biomasse de la partie aérienne (t/ha)
- Absorption d'azote par la partie aérienne et par le tubercule jusqu'à la destruction de la partie aérienne (kgN/ha)
- Stocks d'azote minéral dans le sol

- Analyses classiques de variance et de covariance
- Ajustement de modèles de courbes de réponse à l'azote pour déterminer les optima pour chaque variable mesurée
- Modèle mixte après une analyse des moyennes par essai
- Ajustement de modèles pour déterminer les meilleurs moments, fréquences et taux d'application
- Trois modèles combinant les indices PROSAIL et l'estimation de l'apport en azote.

## Résultats et Conclusions

### 1&2. RAPPORT et TAUX : Combien d'azote doit être appliqué à la plantation ?



Rendement total	N Tot à plantation	Rendement > 50 mm
-1t/ha*	< 50 % Ntot	0t/ha <sup>NS</sup>
-0.5t/ha <sup>NS</sup>	50%<Ntot<67%	-1.2t/ha***
0.4t/ha <sup>NS</sup>	67%<Ntot<75%	-0.4t/ha <sup>NS</sup>
+0.8t/ha <sup>NS</sup>	>75%	+0.4t/ha <sup>NS</sup>

La première application devrait représenter au moins 50 % de la quantité totale d'engrais azoté. Hensel & Locascio (1987) : pour maximiser les rendements, au moins 67 % devrait être appliqué à la plantation.

### DIAGNOSTIC : La culture de pommes de terre manque-t-elle d'azote ? PRONOSTIC : De combien d'azote la culture de pommes de terre a-t-elle besoin en fertilisation ?

Plus de 50 essais en micro-parcelles

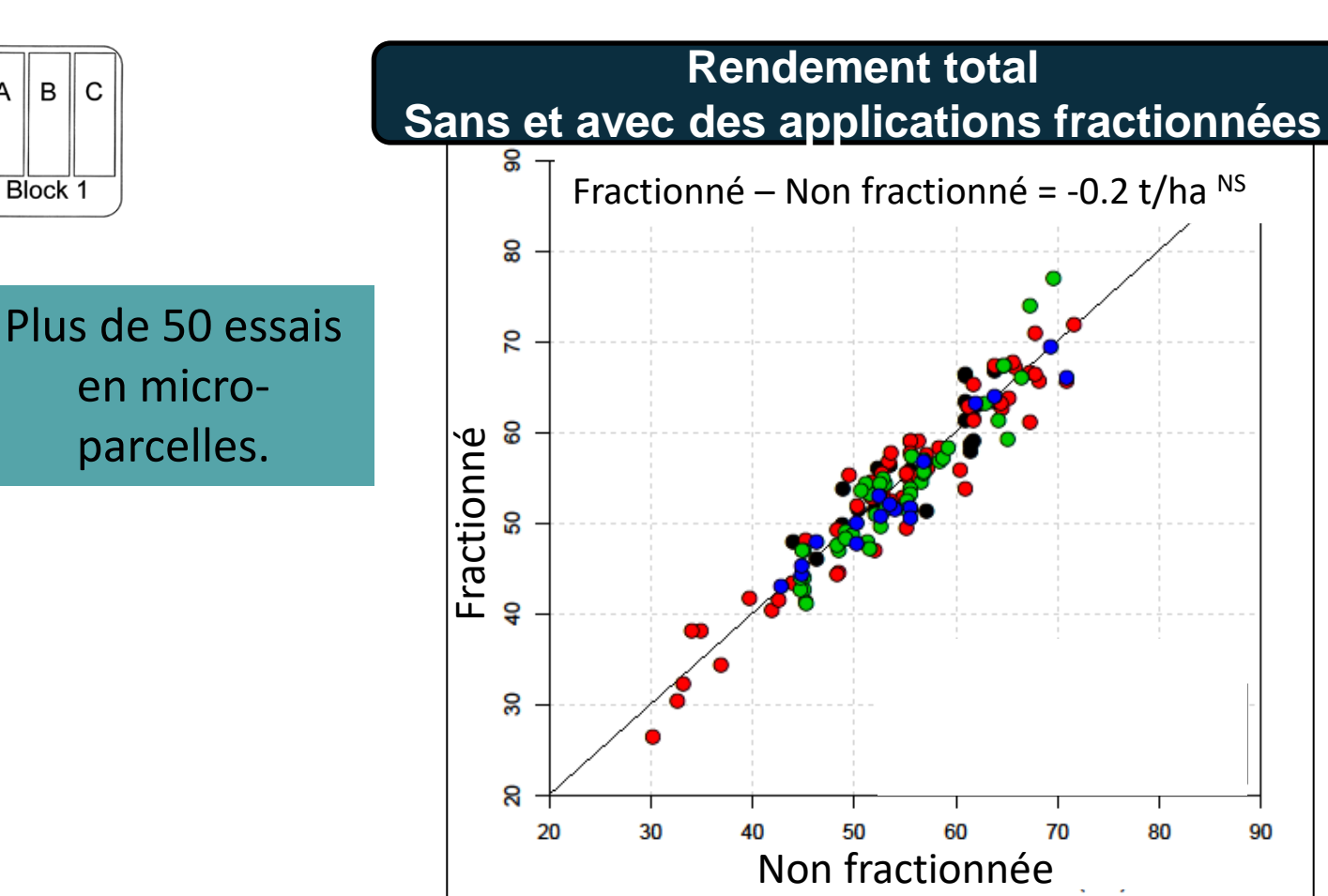
Essais en micro-parcelles sur le terrain de recherche : Micro-parcelles avec répétitions pour contrôler l'hétérogénéité du champ et assurer un suivi rapproché de la plante (2016-2019)

Model results	Yield validati	Nb treatment
0	40	3
0	80	6
40	80	10
<b>11%</b>		
0	0	52
40	40	3
80	80	66
<b>70%</b>		
40	0	5
80	40	9
80	0	18
<b>19%</b>		
<b>100%</b>		

Premiers résultats : Évaluation du modèle

- 11% de sous fertilisation
- 70% de résultats correct
- 19% de surfertilisation

### 3. TIMING : À quelles étapes du cycle de la culture l'apport d'azote est-il le plus efficace ?

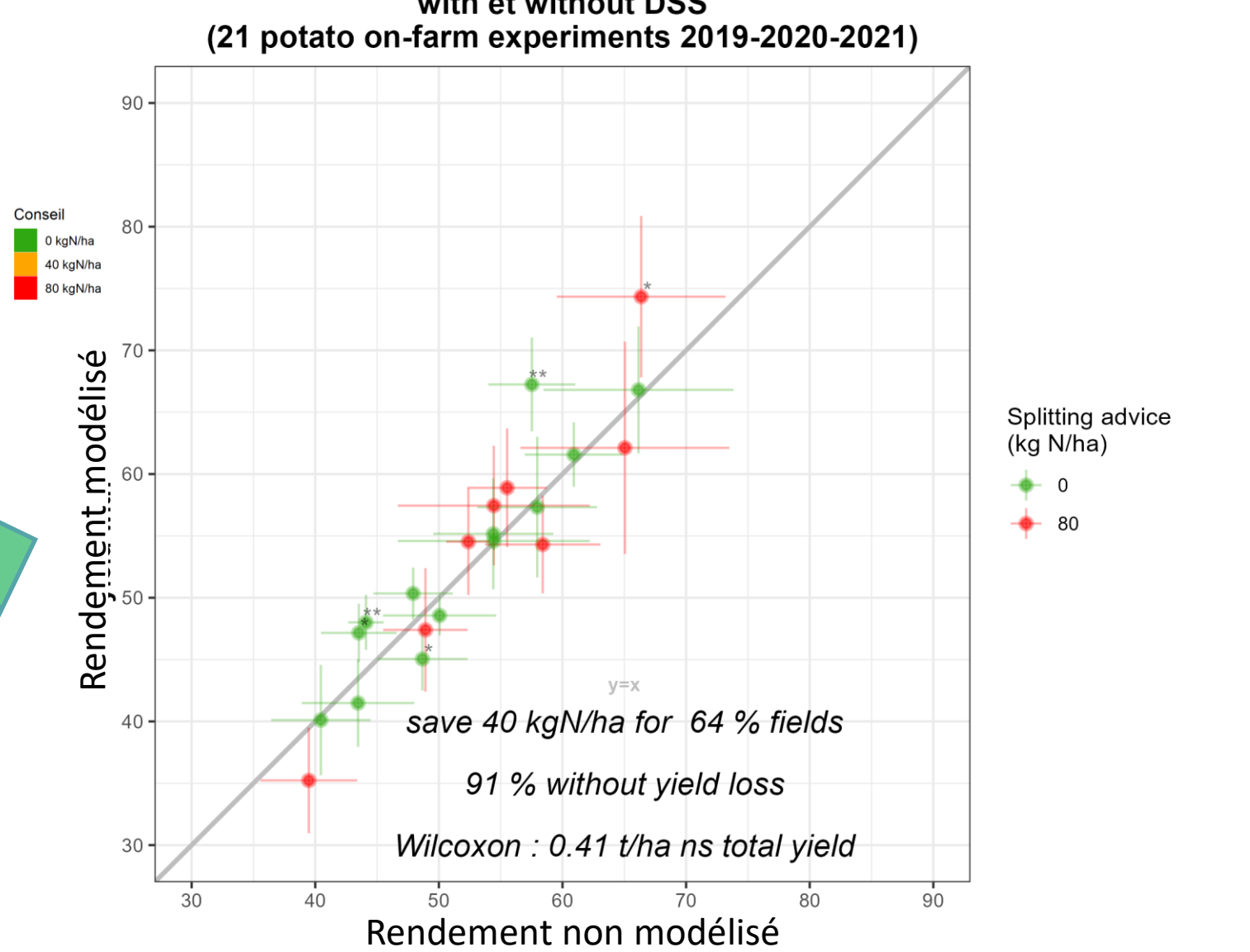
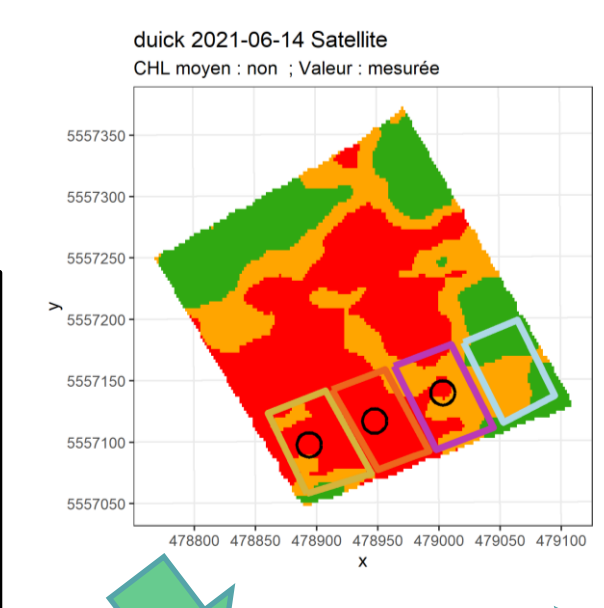


Rendement total	Apport secondaire (Jours après levée)	Rendement > 50 mm
+1t/ha <sup>NS</sup>	< 30 DAE	+2.3t/ha***
-0.1t/ha <sup>NS</sup>	30<DAE<40	-0.8t/ha <sup>NS</sup>
-0.5t/ha <sup>NS</sup>	45<DAE<60	-1.2t/ha***
-1t/ha*	>60	-1.9t/ha***

La meilleure efficacité est observée pour des applications entre 30 jours et jusqu'à 60 jours après l'émergence des plantes. Vos (1999) recommande (au moins) 60 jours après l'émergence.

Plus de 30 OFE

Essais expérimentaux à la ferme : Grandes bandes de terrain pour évaluer la robustesse des indices de végétation et leur corrélation avec les variables agronomiques.



## DISCUSSION et PROCHAINES ÉTAPES

Ces modèles peuvent être intégrés dans les Systèmes d'Aide à la Décision pour la répartition de l'azote dans la culture de pommes de terre.

### Comment pouvons-nous étendre la validité du modèle ?

- Évaluer les degrés-jours (DJ) et le bilan hydrique à partir de la date de plantation (Goffart et al. 2022).
- Prendre en compte l'effet possible du groupe de précocité de la variété.
- Ces résultats, qui proviennent principalement d'essais réalisés dans les régions Hauts-de-France, Champagne-Ardenne et Centre, ne sont valables que dans ce contexte.
- Des références supplémentaires dans d'autres situations seraient nécessaires pour étendre les recommandations à d'autres contextes de sol et de climat.

### Comment pouvons-nous améliorer les performances du modèle ?

- Améliorer la cohérence des conseils en cas d'une forte hétérogénéité des sols des parcelles.
- Explorer la possibilité d'un modèle sans bandes fertilisées.
- Mettre en œuvre le modèle de conseil actuel avec la modélisation de la croissance (modèle de biomasse).

### Comment pouvons-nous améliorer l'évaluation du modèle ?

- Quantifier la réduction des pertes d'azote à l'aide du Système d'Aide à la Décision (DSS).
- Quantifier l'amélioration de l'Utilisation de l'Azote par Unité d'Énergie (NUE) en fonction du groupe de variétés de pommes de terre, du type d'engrais et des conditions pédo-climatiques.

Berger, K., Atzberger, C., Danner, M., D'Urso, G., Mauser, W., Vuolo, F. & Hank, T. 2018. Evaluation of the PROSAIL Model Capabilities for Future Hyperspectral Model Environments: A Review Study. Remote Sensing, 10, 85. Goffart, J. P., Olivier, M., & Frankinet, M. (2008). Potato crop nitrogen status assessment to improve N fertilization management and efficiency: Past-present-future. Potato Research, 51(3-4), 355-383. Goffart, J. P., Abdallah, F., Ben, Curnel, Y., Planchon, Y., Delourme, P., & Goffart, J. P. (2022). In-Season Potato Crop Nitrogen Status Assessment from Satellite and Meteorological Data. Potato Research, 65(3), 729-755. Hensel, D. R., & Locascio, S. J. (1987). Effect of Rates, Form and Application Date of Nitrogen on Growth of Potatoes. Proceedings of Florida State Horticultural Society, 100, 203-205. Jacquemoud, S., Verhoef, W., Baret, F., Bacour, C., Zarco-Tejada, P., Asner, G.P., Francis, C. & Ustin, S.L. 2009. PROSPECT+SAIL models: A review of use for vegetation characterization. Remote Sensing of Environment, 113, 556-566. 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.

**Resources méthodologiques**

Protocol  
Use of crop sensing data in experiments

INNO-VEG Framework for farmer-led research

**PROTOCOLE** : Définition de la phénotypage, types de capteurs utilisés en agriculture, comment calculer et comprendre les indices de végétation ; Conception d'un essai sur le terrain pour des expériences à la ferme. Bonnes pratiques pour la collecte de données des capteurs (y compris l'étalonnage radiométrique, l'importance de la lumière, la géolocalisation, les étapes d'acquisition...)

**CADRE** : Avantages de la recherche dirigée par les agriculteurs, Coûts de la recherche dirigée par les agriculteurs. Le processus : Poser des questions utiles. Considérations pratiques avant de commencer : Champs, Équipement, Attitude, Choix d'un site d'essai approprié, conception de l'essai, Applications des traitements, Suivi de la culture, Utilisation efficace de la cartographie des rendements, Utilisation des données de réflectance spectrale comme indicateur de rendement, Analyse des données de réflectance spectrale.

**inagro** **Delphy** **ARVALIS** **ADAS** **Interreg** **2 Seas Mers Zeeën** **INNO-VEG**



Les essais OFE de 2021 et certaines parties des essais en micro-parcelles de 2019-2020-2021 ont reçu un financement du programme Interreg 2 Mers 2014-2020, cofinancé par le Fonds européen de développement régional dans le cadre du contrat de subvention no 2505-032.