



Phénotyper par capteurs le Couvert végétal de la pomme de terre pour mieux lutter contre le virus Y : Projet CANOPY (2020-2025)

Laurent Glais, Melen Leclerc, Heiner Denzer, Christophe Langrume, Stéphane Jumel, Christophe Dargier, Philippe Laty, Philippe Dolo, Sébastien Vast, Sarah Cardon, et al.

► To cite this version:

Laurent Glais, Melen Leclerc, Heiner Denzer, Christophe Langrume, Stéphane Jumel, et al.. Phénotyper par capteurs le Couvert végétal de la pomme de terre pour mieux lutter contre le virus Y : Projet CANOPY (2020-2025). *Innovations Agronomiques*, 2026, 112, pp.129-147. <10.17180/ciag-2026-vol112-art09>. <hal-05684166>

HAL Id: hal-05684166

<https://hal.inrae.fr/hal-05684166v1>

Submitted on 7 Jul 2026

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons CC BY 4.0 - Attribution - International License



Phénotyper par capteurs le Couvert végétal de la pomme de terre pour mieux lutter contre le virus Y : Projet CANOPY (2020-2025)

Laurent GLAIS¹, Melen LECLERC², Heiner DENZER³, Christophe LANGRUME²,
Stéphane JUMEL², Christophe DARGIER⁴, Philippe LATY⁵, Philippe DOLO⁶, Sébastien VAST⁷,
Sarah CARDON⁸, François VERNEY⁴, David DUPRE⁹, Frédéric BOULARD¹, Loïc DANIEL²,
Maryse URVOY¹, Laura DEMEY¹⁰, Yves LE HINGRAT^{1,8}

¹ inov3PT, Domaine de la Motte, 35653, Le Rheu, France

² IGEPP, INRAE, Institut Agro, Univ Rennes, 35653, Le Rheu, France

³ Pessl Instruments GmbH, Werksweg 107, A-8160 Weiz, Autriche

⁴ FN3PT, 44 Rue du Louvre, 75001 Paris, France

⁵ Comité Centre et Sud, avenue des Droits de l'Homme, 45921 Orléans, France

⁶ Bretagne Plant Innovations, 471 La Gare, 29460 Hanvec, France

⁷ Comité Nord Plants, Rue des Champs Potez, 62217 Achicourt, France

⁸ FN3PT, 43-45 rue de Naples, 75008 Paris, France

⁹ SIPRE, Rue des Champs Potez, 62217 Achicourt, France

¹⁰ inov3PT, Rue des Champs Potez, 62217 Achicourt, France

Correspondance : laurent.glais@inov3pt.fr ; melen.leclerc@inrae.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/10.17180/ciag-2026-vol112-art09>

Résumé

L'huile minérale protège les plants de pommes de terre des infections dues au virus Y (PVY). L'objectif du projet est d'identifier un capteur fixe, permettant de suivre en temps réel le développement du couvert, afin d'adapter les fréquences de pulvérisation de l'huile à la vitesse de croissance foliaire des plantes. Ce suivi a révélé une variabilité importante du développement foliaire selon les années, les sites géographiques et la variété. La confrontation des vérités terrain aux données collectées automatiquement a permis de confirmer une corrélation entre le développement de la canopée et la mesure de la hauteur des plantes ou de leur réflectance. La dynamique de ces variables retransmet bien celle du couvert, en particulier lors de la phase de croissance active. Enfin, un premier travail de modélisation a montré que les données de capteurs peuvent être utilisées pour donner une surface foliaire mais aussi que la variété peut impacter significativement la sortie des modèles.

Mots-clés : PVY, canopée, phénotypage, outil numérique, capteurs, indice de végétation

Abstract: Real-time monitoring of potato canopy cover to better fight against potato virus Y: CANOPY project (2020-2025)

Mineral oil protects potato plants from infections caused by Potato virus Y (PVY). The objective of the project is to identify a fixed sensor capable of monitoring the development of the canopy in real time, to adjust the frequency of oil spraying to the rate of leaf growth in the plants. This monitoring revealed significant variability in leaf development depending on the year, geographic location, and variety. Comparing field observations with automatically collected data confirmed a correlation between canopy development and measurements of plant height or reflectance. The dynamics of these variables



accurately reflect those of the canopy, particularly during the active growth phase. Finally, initial modelling work showed that sensor data can be used to estimate leaf area, but also that the variety can significantly impact model outputs.

Keywords: PVY, canopy, phenotyping, numeric tools, sensors, vegetation index

1. Introduction

L'agriculture d'aujourd'hui est soumise à une pression réglementaire et sociétale forte pour diminuer les intrants en culture vis-à-vis notamment des produits phytosanitaires, tout en conservant un niveau de production élevé de manière à répondre à la croissance de la population mondiale (MAAF, 2015). Face à ces deux demandes, les besoins exprimés des agriculteurs sont donc de développer des stratégies innovantes pour préserver la qualité des semences tout en limitant l'utilisation d'intrants. Dans ce contexte, le projet a pour enjeux d'évaluer la pertinence d'utiliser des outils technologiques et numériques afin de mieux raisonner l'application des huiles minérales et améliorer ainsi la protection des plantes face au virus Y (PVY).

Le PVY est un des problèmes sanitaires majeurs auquel la production de pommes de terre, toutes filières confondues, doit faire face. En effet, depuis près de quarante ans le PVY est devenu le virus le plus répandu en France mais aussi dans tous les pays producteurs de pomme de terre, où il est maintenant responsable de plus de 90 % des infections virales en production de plants (Glais *et al.*, 2017). Sur les 10 dernières années, les données recueillies sur la qualité sanitaire des semences révèlent que le PVY est encore responsable annuellement de l'infection de près de 30 % des lots de semences ; alors que le second virus le plus fréquent en France (virus X, PVX) ne cause que 3 % des infections (données FN3PT). La conséquence directe de ces attaques virales pour la filière plant peut être un déclasserement des lots de semences, voire un refus à la certification si le taux de virus est supérieur aux normes en vigueur. En effet, le PVY est listé comme un organisme nuisible réglementé non de quarantaine en accord avec la directive 2020/177/UE. L'application en droit français de cette directive stipule que jusqu'à 5 % de virus, un lot peut être commercialisé ; au-dessus, il est refusé. Pour la filière de consommation, il a été estimé qu'à l'échelle de la plante si celle-ci était infectée par le PVY à la plantation, une perte de rendement jusqu'à 80 % pouvait être enregistrée en fonction de la variété cultivée, par rapport à une plante saine (Hane & Hamm, 1999 ; Rykbost *et al.*, 1999). Cette baisse est la conséquence de tubercules moins nombreux et plus petits, et d'un nombre plus limité de tiges par pied. Par ailleurs, parmi les sept souches de PVY reconnues, celle nommée PVY^{NTN} induit la maladie des nécroses annulaires superficielles sur tubercules (Beczner *et al.*, 1984), qui rend impossible la commercialisation des tubercules portant ce type de symptôme. En raison de tous ces dommages qu'il peut induire sur plante, de sa transmission quasi instantanée d'une plante infectée à une plante saine lors de la prise alimentaire de près de 70 espèces de pucerons, et de sa présence sur plus de 500 espèces végétales (cultivées, adventices), le PVY est le virus le plus fréquent sur cette culture et le plus problématique pour les producteurs.

Seule l'application d'huiles minérales en végétation permet de lutter efficacement contre le PVY (Boiteau *et al.*, 2009) en limitant la transmission du virus par les pucerons vecteurs de maladie et ainsi restreindre les dommages induits par ce virus. Optimiser l'application des huiles en végétation pour i) maximiser le contrôle des infections et ii) les utiliser à bon escient même si elles sont reconnues aujourd'hui comme produits de biocontrôle, est ainsi un enjeu majeur pour les producteurs de plants de pomme de terre, et ce au niveau de tous les bassins de productions. Les agriculteurs utilisent aujourd'hui des cadences d'application standard afin de protéger le plus possible les nouvelles feuilles produites. A l'échelle d'une même exploitation agricole de nombreux facteurs induisent de la variabilité concernant la dynamique du couvert végétal : variété, itinéraire technique, microclimat, historique de la parcelle... Cette variabilité qui peut être très forte entre deux parcelles proches est difficile à



appréhender et est rarement prise en compte. Adapter les traitements à la parcelle apparaît comme un levier pertinent pour améliorer la protection contre les infections virales.

Mobiliser le numérique est aujourd'hui reconnu comme étant un moyen pertinent pour améliorer la protection des cultures (Reboud *et al.*, 2022). Lors de la dernière décennie les avancées technologiques ont permis de démocratiser l'utilisation de capteurs dans de nombreux domaines dont l'agriculture et de permettre le développement d'outils d'aide à la décision. Ce projet propose de développer un outil numérique pour le suivi en temps réel du développement du couvert de pomme de terre afin de mieux cibler les applications d'huiles minérales et les adapter aux conditions locales de chaque parcelle. Ce travail requiert une approche pluridisciplinaire avec les tâches suivantes (Figure 1) qui sont détaillées dans cet article :

- l'intégration, le déploiement et la validation de capteurs pour le suivi au champ ;
- l'expérimentation et du phénotypage manuel du couvert ;
- le développement d'un système d'information pour automatiser le recueil et le stockage des données et retourner des informations vers les utilisateurs ;
- le développement de modèles pour suivre la dynamique du couvert à partir de données capteurs ;
- la mobilisation de cet outil numérique intégré pour élaborer de nouvelles stratégies de lutttes et identifier les limites pour une utilisation en pratique.

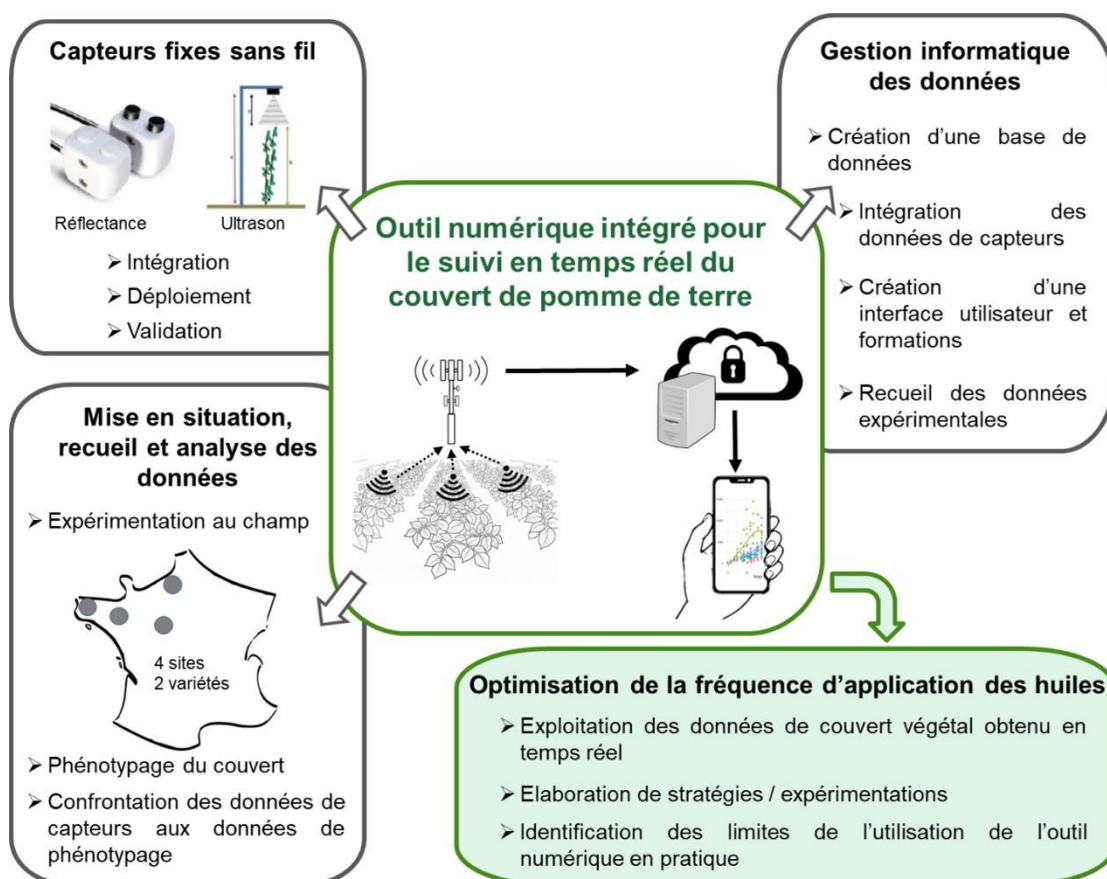


Figure 1 : Représentation synthétique de l'objectif, des actions menées et de la finalité du projet CANOPY.

Description de la figure



Présentation des trois actions mises en place pour intégrer des outils numériques permettant de suivre en temps réel le couvert des plantes de pommes de terre. La première action a consisté à intégrer, déployer et valider deux capteurs fixes sans fil (capteurs de réflectance et ultrason). La seconde a été de mettre en situation ces capteurs sur 4 sites d'expérimentation, de phénotyper le couvert et confronter les données acquises avec les capteurs à des données de réalités terrain. La troisième action a été de développer une base de données permettant l'intégration automatique des données de capteurs, et le recueil des données expérimentales. L'enjeu de ce projet est d'exploiter les données de couvert végétal obtenu en temps réel pour optimiser la fréquence d'application des huiles minérales.

2. Intégration, déploiement et validation de capteurs fixes sans fil

L'objectif du projet étant d'avoir un suivi fin dans le temps de la croissance du couvert, nous nous sommes orientés vers l'utilisation de capteurs fixes. Déployés en petit nombre, ces derniers ne permettent pas d'informer précisément sur l'hétérogénéité spatiale du couvert, comme c'est le cas avec un suivi par proxi ou télédétection. Néanmoins, ils permettent d'avoir une représentation temporelle très fine du phénomène suivi.

Pour caractériser le couvert, en particulier la surface foliaire, nous avons choisi deux types de capteurs complémentaires qui donnent des signaux pertinents pour phénotyper la végétation :

- Des capteurs à ultrasons (TS3 Ultrasonic Sensor, Toposens GmbH, München, Allemagne) pour le suivi de la hauteur du couvert. Ce type de capteur émet des impulsions hautes fréquences. Lorsque les ondes émises rencontrent les feuilles des plantes, elles se réfléchissent et retournent vers le capteur qui détecte cet écho et mesure le temps écoulé entre l'émission de l'impulsion et la réception de l'écho. Ce temps est ensuite utilisé pour calculer la distance au couvert et permet donc de suivre l'évolution de sa hauteur ;
- Des capteurs dans le rouge et le proche infra-rouge (Apogee Instruments, Logan Utah, USA) permettant de mesurer la réflectance du couvert végétal. La lumière du soleil mesurée par un premier capteur rentre en contact avec la canopée ; selon les longueurs d'ondes considérées de ce rayonnement solaire, des éléments peuvent soit traverser le couvert végétal et atteindre le sol, soit être absorbés et utilisés pour stimuler la photosynthèse, ou soit être réfléchis. Cette lumière réfléchie, est ensuite captée par un second capteur. Le différentiel de rayonnement entre les deux capteurs permet d'établir un spectre de réflectance du couvert végétal. Ce spectre est ensuite traduit en indice de végétation NDVI (indice de végétation par différence normalisée) ou EVI2 (indice de végétation amélioré).

La société Pessl Instruments, partenaire du projet CANOPY, a intégré ces capteurs dans un prototype qui permet d'automatiser la mesure via ces capteurs toutes les 15 minutes et de transmettre ces données par un réseau GSM (4G 3G) via une carte Sim au système d'information de la société. Ces données sont directement transmises via l'API dédiée ou l'interface FieldClimate. Pour être déployés dans les parcelles expérimentales de chaque site, ces capteurs ont été installés sur des portiques, enchâssant deux rangs de pomme de terre, permettant un suivi au nadir du couvert (Figure 2).



Figure 2 : Portique sur lequel ont été positionnés les différents capteurs à ultrasons et de réflectance pour suivre le développement foliaire des plantes ainsi que le système de transmission sans fil pour un suivi en temps réel. Photo © INRAE

Description de la figure

Photo présentant le système de fixation des capteurs à ultrasons et de réflectance en parcelle expérimentale. Ces capteurs sont fixés sur une barre horizontale soutenue aux extrémités par deux barres inclinées, enfoncées dans le sol de manière à bien stabiliser l'ensemble. La barre horizontale est positionnée à une hauteur de 1.2 m environ, de manière que les capteurs soient au-dessus de la hauteur maximale de la canopée des plantes de pomme de terre. Le portique enjambe 2 rangs de pommes de terre, afin que chaque capteur, orienté vers le sol, puisse être placé au-dessus d'un rang.

Afin de contrôler la fiabilité des mesures réalisées par le prototype de Pessl Instruments, mais aussi pour pallier de potentielles défaillances de ce système, les parcelles expérimentales sur le site INRAE (Le Rheu, Ille et Vilaine (35)) ont été instrumentées avec des capteurs similaires, et une autre architecture, sur un autre portique. Les capteurs à ultrasons utilisés par INRAE, ont été intégrés sur une carte Arduino MKR WAN 1300 permettant une transmission des trames de données sur le réseau LoRaWAN. Ces trames ont été ensuite filtrées et collectées par des passerelles informatiques réparties sur le site, chargées de capter les transmissions sans fils et de transmettre les données sur le réseau Intranet INRAE. Ces données au format Json ont été alors traitées par une solution OpenSource (NodeRed/Influxdb/Grafana) hébergée et sécurisée sur le Datacenter INRAE situé à Toulouse pour visualisation et extraction finale. Pour la réflectance, nous avons utilisé le capteur SRS Decagon qui présente les mêmes caractéristiques que celui utilisé par la société Pessl Instruments. Les données ont été recueillies par une centrale d'acquisition Campbell CR1000 via le protocole de transmission filaire SDI-12. Elles ont été ensuite collectées manuellement par liaison RS232. Pour l'ensemble de ces capteurs, les données ont été collectées toutes les 15 minutes.

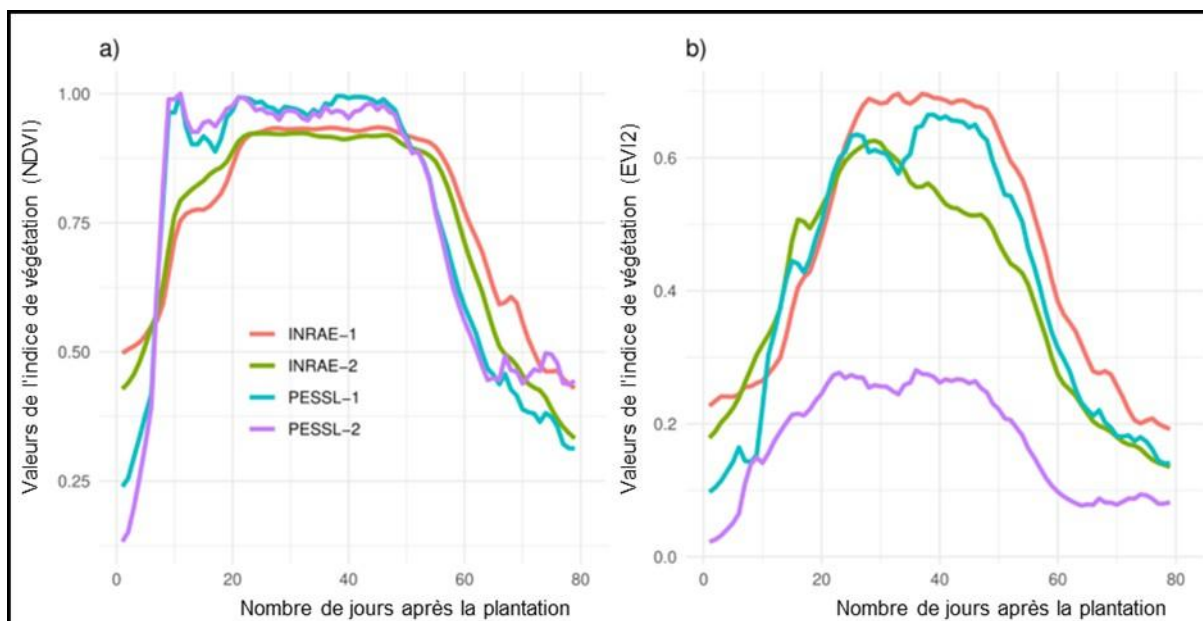


Figure 3 : Comparaison des données de réflectance acquises via les capteurs INRAE et Pessl Instruments pour l'année 2022 sur le site de Le Rheu. Les données de réflectance au cours du temps sont ici traduites en indices de végétation NDVI (a) et EVI2 (b), moyennées à la journée. PESSL-1 / PESSL-2 : 2 capteurs de réflectance intégrés par le partenaire Pessl Instruments ; INRAE-1 / INRAE-2 : 2 capteurs de réflectance développés par INRAE.

Description de la figure

Présentation graphique de l'évolution des valeurs de deux indices de végétation (NDVI, EVI2) en fonction du nombre de jours après la plantation. Les deux indices ont présenté un profil proche. Les courbes obtenues en forme de cloche, ont montré que ces indices de végétation, correspondant à un taux de recouvrement du sol, augmentaient très rapidement sur les 20 premiers jours de la culture, jusqu'à obtenir un indice saturant. Ces valeurs stagnaient ensuite pendant environ 20 jours, puis diminuaient rapidement sur 20 jours suivants.

Comme illustré dans la Figure 3, les deux indices de végétation donnent des dynamiques proches, mais avec des valeurs moins saturantes (en-dessous de 1) pour l'indice EVI2 au moment où le développement du couvert végétal était à son maximal. Les autres différences observées pouvant s'expliquer par des localisations différentes des portiques dans la parcelle et l'âge du capteur de réflectance utilisé par la solution INRAE qui avait déjà été déployée pendant plusieurs années pour d'autres expérimentations.

Enfin, une station météorologique a été installée sur chaque site dans une des parcelles expérimentales. La station (iMETOS3.3 Pessl Instruments) était équipée de sondes permettant de recueillir toutes les 15 minutes des données de température/humidité de l'air et du sol, le volume de pluviométrie, le vent (intensité, direction).

3. Expérimentation au champ et phénotypage du couvert végétal

3.1. Mise en place des parcelles expérimentales

Quatre parcelles expérimentales ont été mises en place dans des régions présentant des conditions pédoclimatiques contrastées : deux en région Bretagne (Finistère (29), gérée par Bretagne Plants Innovation - BPI, Ille et Vilaine (35), suivi par INRAE Le Rheu - LRH), une en région Hauts-de-France (Pas-de-Calais (62), géré par Comité Nord - CN) et une dans la région Centre-Val de Loire (Loiret (45), suivi par le Comité Centre et Sud - CCS). Sur les deux premières années 2021-2022, seule la variété



Passion a été implantée. C'est une variété précoce, reconnue à dire d'experts comme présentant un développement foliaire important en termes de hauteur et de vigueur. Pour les campagnes 2023-2024, une seconde variété, Allians, a été ajoutée. C'est une variété à chair ferme, semi-précoce, qui présente un développement foliaire moins important que celui de Passion. Chaque année, un seul lot de semences de chacune de ces variétés a été utilisé pour la mise en place des essais dans les différents sites. Ces lots ont été fournis par Bretagne Plants Innovation.

Pour les campagnes 2021-2022, sur chaque site a été implantée une micro-parcelle de 15 m x 6 m de manière à disposer de 8 rangs de 75 tubercules de pommes de terre, avec une distance inter-rang de 0.75 m et d'une distance entre les pieds de 0.20 m (Figure 4). Sur chaque micro-parcelle, trois zones étaient définies :

- une zone où étaient placés les deux portiques ayant chacun un capteur de réflectance et à ultrasons. Chacun de ces capteurs était positionné au-dessus d'un rang ;
- une zone où étaient définis trois quadras (1 m x 1 m) matérialisant l'emplacement pour la mesure manuelle de la hauteur des plantes et la prise de vue de la canopée au cours du temps ;
- une dernière où était réalisé le prélèvement, dite zone de collecte, des plantes pour recueillir les données destructives.

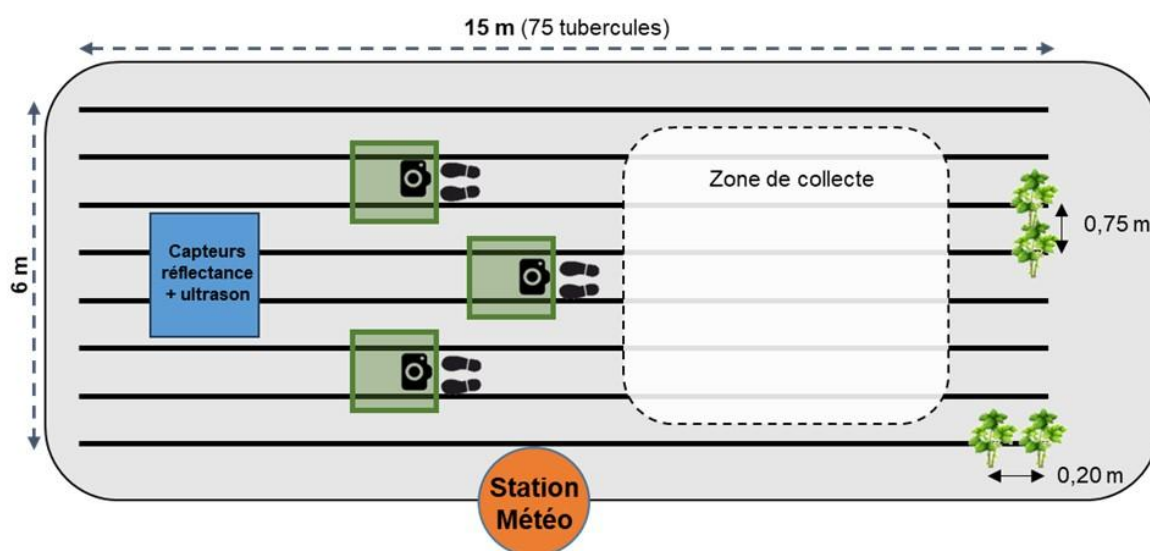


Figure 4 : Schéma d'un site expérimental avec la localisation des différentes zones de recueil des données collectées par les capteurs et par les opérateurs.

Description de la figure

Représentation schématique d'un site expérimental de forme rectangulaire. Toute la moitié droite de la placette correspond à la zone de collecte des plantes pour réaliser des mesures destructives. Sur la moitié gauche, sont localisées les 3 zones de 1 m x 1 m où sont réalisées les mesures manuelles de hauteur des plantes et les prises de vue pour l'estimation du taux de recouvrement. A l'extrémité gauche, est positionné le portique avec les différents capteurs. Une station météorologique est placée en bordure de la placette.

Pour les campagnes 2023-2024, le nombre de micro-parcelles a été doublée sur chaque site de manière à intégrer la seconde variété. Chacune d'elle était pourvue d'un seul portique équipé des deux types de capteurs et des mêmes zones de collecte des données manuelles.

Sur ce dispositif, aucun traitement huile, ni insecticide n'ont été appliqués. En fonction des conditions climatiques chaque année, la plantation des essais a été réalisée fin avril/début mai (Loiret, Finistère), ou début/fin mai (Ille et Vilaine, Pas-de-Calais).

3.2. Phénotypage du couvert végétal durant la saison de culture

Pour chaque expérimentation instrumentée, le couvert a été phénotypé tout au long de la période de culture pour confronter les données de capteurs aux caractéristiques du couvert.

Les données manuelles collectées étaient de deux ordres : des données non destructives et des données destructives. Concernant les données non destructives, au niveau des trois quadras définis sur chacun des quatre sites expérimentaux, trois points de mesure ont été pris avec une règle, du haut de la butte jusqu'au sommet des plantes. Une photo d'ensemble a également été prise de chaque quadra pour avoir un suivi du taux de couverture du sol par analyse d'images.

L'objectif central du projet étant de suivre la surface foliaire, cette dernière a été mesurée par échantillonnage destructif. Les méthodes traditionnelles d'estimation de la surface foliaire telles que le planimètre étant coûteuses et chronophages, nous avons mis au point une méthode permettant d'estimer rapidement la surface foliaire pour chaque échantillon de chaque site. Brièvement, la méthode consiste à placer sur un support spécifique les étages foliaires de chaque tige individualisée d'une plante collectée ; de prendre une photo de ce matériel biologique avec les repères associés présents sur le support, et de réaliser une analyse d'images implémentée sous ImageJ et Python (Figure 5). La méthode et sa validation est détaillée dans Jumel *et al.* (2025) et les codes sont disponibles sur la forge INRAE à l'adresse suivante : <https://forge.inrae.fr/stephane.jumel/support-and-associated-algorithms-for-measuring-leaf-area>.

A chaque date de notation, trois plantes entières ont été prélevées dans la zone dédiée de chacun des sites. Pour chacune des tiges de ces 3 plantes, chaque étage foliaire a suivi la méthodologie décrite ci-dessus afin d'estimer la surface foliaire. L'ensemble des parties aériennes de chaque plante était ensuite regroupé dans un sac de papier kraft, et pesé afin de définir la biomasse globale de chaque plante. Ce sac était ensuite mis dans une étuve à 80°C pendant 48h, pour obtenir le poids sec.

L'ensemble de ces données a été collecté deux fois par semaine pendant la phase de croissance active des plantes (environ cinq semaines) et une seule fois par semaine lorsque la végétation stabilisée était atteinte (environ quatre semaines). Ces données étaient renseignées manuellement dans la base de données développée par la FN3PT dans le cadre de cette étude.

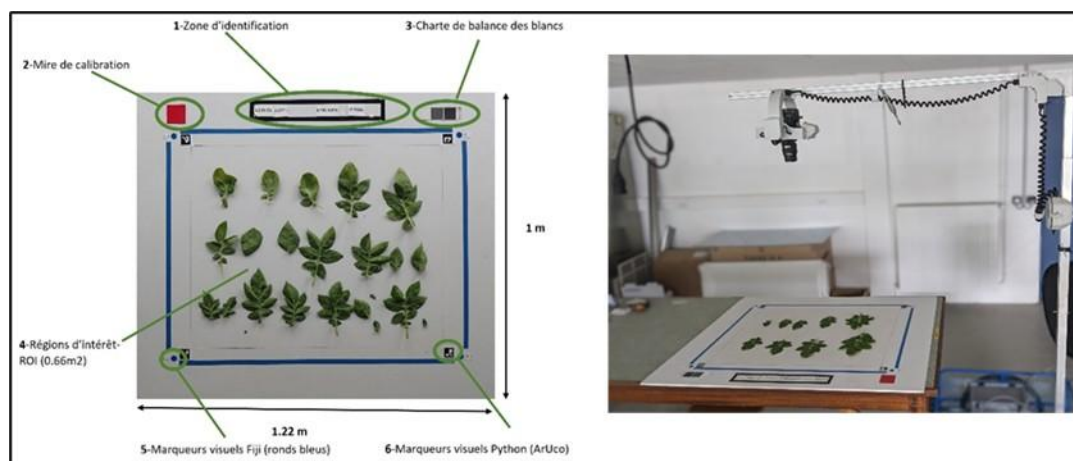


Figure 5 : Présentation du support et des repères intégrés permettant une estimation automatique de la surface foliaire grâce à une analyse d'image sous ImageJ et Python. Photos © INRAE

Description de la figure

La figure est composée de deux photos. Celle de gauche présente le support sur lequel les étages foliaires individualisés d'une même tige ont été positionnés. Ce matériel biologique était placé au milieu d'un carré délimité par des traits bleus, sans avoir de chevauchement entre les folioles. A chaque angle de ce carré se trouvait un marqueur visuel reconnu automatiquement par ImageJ ou par Python qui leur permettait de savoir dans quelle zone se trouve le végétal à quantifier.



D'autres informations étaient présentes en haut du panneau, à l'extérieur de la zone d'analyse (zone d'identification avec le nom de la variété, le numéro de la plante et celui de la tige ; une charte de balance des blancs pour homogénéiser toutes les prises de vue selon la luminosité présente). La photo de droite montre comment était réalisée la prise de vue. Cette prise de vue était effectuée à l'aide d'une perche équipée d'un système de déclenchement à distance et d'un appareil photo maintenu à la verticale par un système de stabilisation automatique, au-dessus du panneau.

3.3. Dynamiques des couverts de pomme de terre

Les surfaces foliaires estimées par imagerie montrent que quelle que soit l'année et le site d'expérimentation, la surface foliaire atteint son maximum entre 35 et 40 jours après l'émergence de 100 % des plantes de la placette (Figure 6). Cette première phase de croissance forte de la surface correspond au développement des différentes tiges de chaque plante ainsi que des feuilles (période appelée croissance active). Une phase descendante est ensuite observée, correspondant à la chute des feuilles basales et à la croissance limitée des étages terminaux (période appelée végétation stabilisée). La comparaison entre les sites d'expérimentation montre que la croissance de la surface foliaire n'est pas homogène d'un site à l'autre. En effet, pour une même variété, cette surface est 2 à 3 fois supérieure sur le site du Centre-Val de Loire (CCS), comparée aux trois autres sites. Cette surface plus importante sur ce site peut s'expliquer par le fait de l'installation d'un système d'irrigation présent dans cette parcelle qui permet aux plantes d'être moins impactées en cas de conditions de sécheresse.

En plus de cette variabilité entre les sites, une importante variabilité interannuelle a été également observée pour un même site (Figure 7). Sur le site de la région Centre-Val de Loire (CCS) notamment, entre la campagne 2024 (11 000 cm²) et 2023 (7 500 cm²), une perte de surface foliaire de près de 32 % a été enregistrée au point culminant (Figure 7). Une différence jusqu'à 150 % a été observée entre les années 2021 et 2022 (5 000 cm²) (résultats non présentés). Ces variations importantes sont liées aux différentes conditions climatiques rencontrées selon les années.

Ces variations de surface foliaire entre les sites d'expérimentation et entre les années pour un même site, se retrouvent également avec la variété Allians. En effet, en 2024 une surface de 7 500 cm² était enregistrée sur le site Centre-Val de Loire (CCS), contre 5 500 cm² à la campagne 2023, soit une perte de 26 %. Ces données montrent la difficulté de prévoir l'évolution de la surface foliaire, malgré des pratiques culturales similaires. Elles mettent bien en avant la pertinence de suivre la dynamique de chaque parcelle pour espérer adapter au mieux la lutte contre les infections virales.

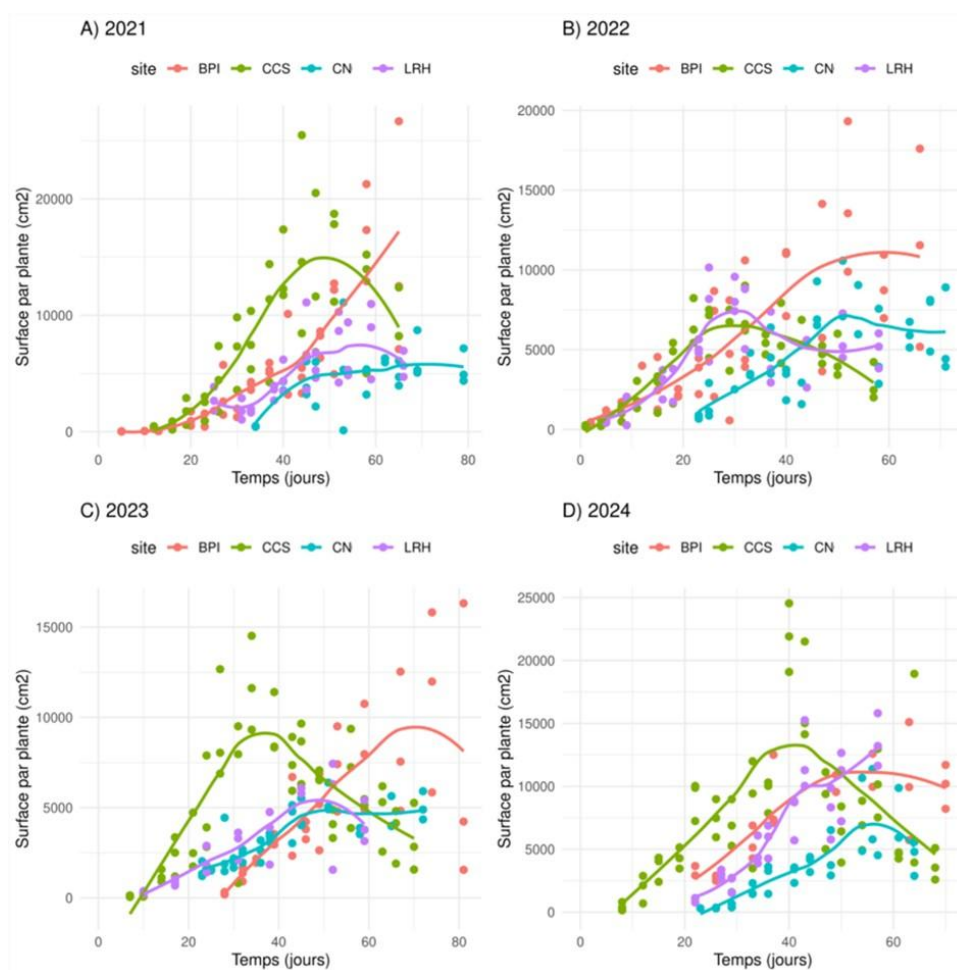


Figure 6 : Dynamique de développement de la surface foliaire de la variété de pomme de terre Passion sur les différents sites expérimentaux (BPI-Bretagne Plant Innovations ; CCS-Comité Centre et Sud ; CN-Comité Nord ; LRH-Le Rheu), de 2021 à 2024 (A à D). Le temps 0 correspond au 15 mai de chaque année.

Description de la figure

La figure se compose de 4 graphes intitulés A, B, C et D correspondant à l'évolution de la surface foliaire de la variété Passion de 2021 à 2024 sur les 4 sites d'expérimentation. La courbe rouge correspond à l'évolution de la surface enregistrée à Bretagne Plant Innovations (BPI) ; en vert celle au Comité Centre et Sud (CCS) ; en bleu au Comité Nord (CN) ; en violet à Le Rheu (LRH). En 2021, la dynamique d'évolution de la surface foliaire au CN, LRH et BP était similaire, avec un développement progressif de la surface qui a débuté 15 jours après la plantation et qui saturait à près de 6000 cm² à 50 jours après la plantation. Cette surface a diminué ensuite lentement jusqu'à la fin de la sénescence. Au CCS, cette dynamique a été trois fois plus importante que sur les 3 autres sites, avec une surface foliaire de 15 000 cm² atteinte au bout de 50 jours après la plantation. Cette surface a diminué ensuite rapidement lors de la sénescence.

En 2022, la dynamique de croissance foliaire a été similaire entre les sites CCS, CN et LRH avec un pic de surface foliaire à 7500 cm². En revanche, c'est à BPI que la surface foliaire a été la plus importante avec une surface de 11000.

En 2023, le profil de développement foliaire a été le même pour les sites LRH et CN, avec un pic de surface foliaire à 5000 cm², 50 jours après la plantation. De la même manière, cette dynamique a été similaire pour BPI et CCS, avec un pic de près de 10000 cm², avant de baisser progressivement au moment de la sénescence.

En 2024, les profils de développement foliaire pour les sites LRH, CCS et BPI ont été très proches, avec une valeur maximale de surface de l'ordre de 12000 cm². En revanche, sur le site du CN, elle a été plus faible, avec une surface maximale de 7500 cm².

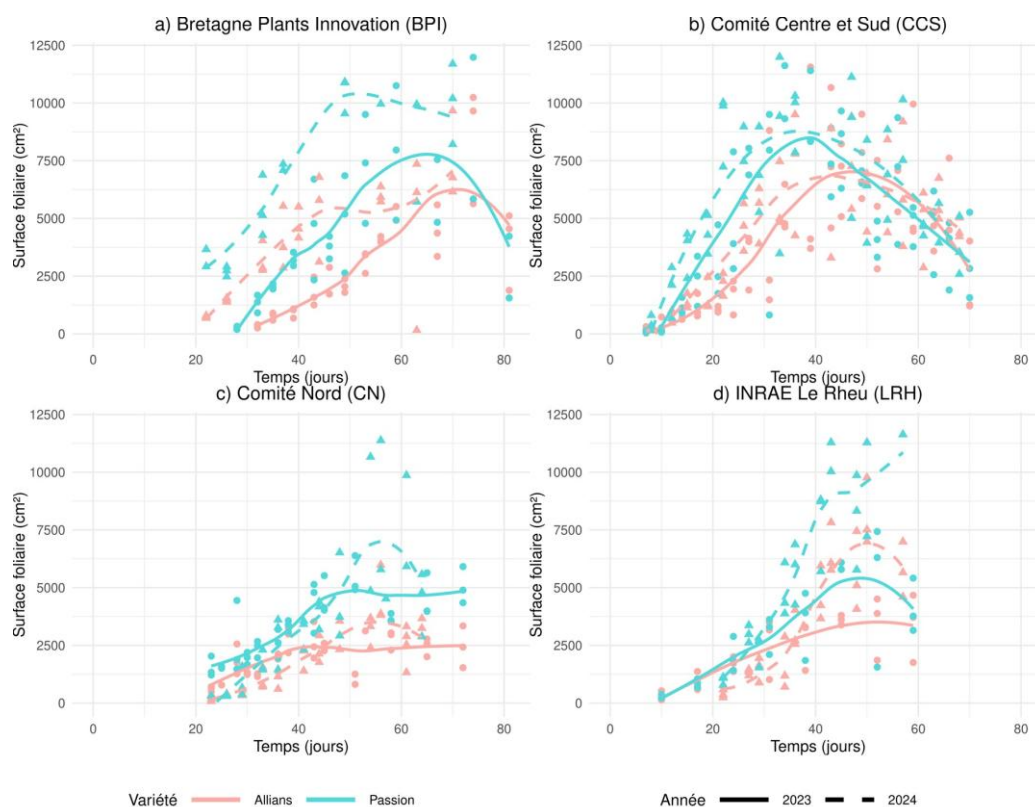


Figure 7 : Dynamique de développement de la surface foliaire des variétés Passion (en bleu) et allians (en rouge) selon les sites d'expérimentation (BPI-Bretagne Plant Innovations ; CCS-Comité Centre et Sud ; CN-Comité Nord ; LRH-Le Rheu) et les années 2023 (ligne continue avec des points) et 2024 (ligne discontinue avec des triangles). Le temps 0 correspond au 15 mai de chaque année. Pour gagner en visibilité tous les graphiques ont les mêmes limites d'axes et pour le graphique b) quelques points outliers indiquant des plantes à des surfaces foliaires allant jusqu'à 20000 cm² ne sont pas visibles.

Description de la figure

La figure se compose de quatre graphiques intitulés a, b, c et d. Chaque graphique illustre l'évolution de la surface par plante, exprimée en centimètres carrés, en fonction du temps, exprimé en jours. Le temps 0 correspond au 15 mai de chaque année. Deux variétés de plantes, nommées Allians et Passion, ont été comparées sur deux années distinctes, 2023 et 2024. La variété Allians est représentée par une couleur rouge, tandis que la variété Passion est indiquée par une couleur bleue. Chaque graphique représente les observations brutes, en point pour 2023 et triangle pour 2024. A cela s'ajoute une courbe de lissage représentant la tendance des données en traits plein pour 2023 et en ligne de tiret pour 2024. Ainsi chaque graphique comprend 4 courbes : une ligne pleine rouge pour Allians en 2023, une ligne pleine bleue pour Passion en 2023, une ligne de tirets rouge pour Allians en 2024 et une ligne de tirets bleue pour Passion en 2024. Le graphique a correspondant au site Bretagne Plants Innovation, montre que la surface par plante de la variété Allians a augmenté progressivement jusqu'à environ 6000 cm² vers 50 jours en 2023, puis a diminué légèrement. En 2024, cette surface a atteint un pic plus élevé, aux alentours de 8000 cm² vers le même nombre de jours. Pour la variété Passion, la surface par plante a atteint environ 7500 cm² en 2023 et environ 10500 cm² en 2024, avant de diminuer légèrement après 50 jours. Le graphique b, intitulé Comité Centre et Sud, indique que la surface par plante de la variété Allians a atteint environ 7000 cm² en 2023 et 2024, vers 40 jours, avant de diminuer. Pour la variété Passion, la surface par plante a culminé à environ 8700 cm² en 2023 et 2024, toujours vers 40 jours, puis a diminué rapidement. Le graphique c, intitulé Comité Nord montre que la surface moyenne par plante de la variété Allians a atteint environ 2500 cm² en 2023 et environ 3700 cm² en 2024, vers 50 jours, puis s'est stabilisée. Pour la variété Passion, cette surface a atteint environ 5000 cm² en 2023 et environ 7000 cm² en 2024, vers 50 jours. Le graphique d, intitulé INRAE Le Rheu indique que la surface par plante de la variété Allians a atteint environ 4000 cm² en 2023 et environ 7000 cm² en 2024, vers 50 jours, puis a diminué légèrement. Pour la variété Passion, cette surface a atteint environ 5000 cm² en 2023 et environ 12000 cm² en 2024, vers 50 jours, avant de diminuer légèrement en 2023.

4. Gestion informatique des données

L'objectif de cette action était la mise au point d'un système d'information pour la collecte, le stockage et la visualisation des données issues du réseau de capteurs mis en place dans les différents sites d'expérimentation et des données collectées par les opérateurs. Une étude détaillée a été réalisée pour proposer aux utilisateurs un ensemble « application web, base de données et service web en tâche de fond » permettant de répondre à cet objectif. La base de données développée a été hébergée dans un data center sécurisé (infogéré) au niveau de inov3PT (Figure 8). Un système de programme permanent (service Windows) interrogeait en permanence le serveur de stockage du prestataire PESSL Instruments avec des requêtes afin de récupérer les informations souhaitées associées à chaque capteur, de contrôler les données et d'émettre des alertes en cas d'anomalies, de consolider les données, et mettre à disposition des informations sous forme d'application web à destination des utilisateurs finaux.

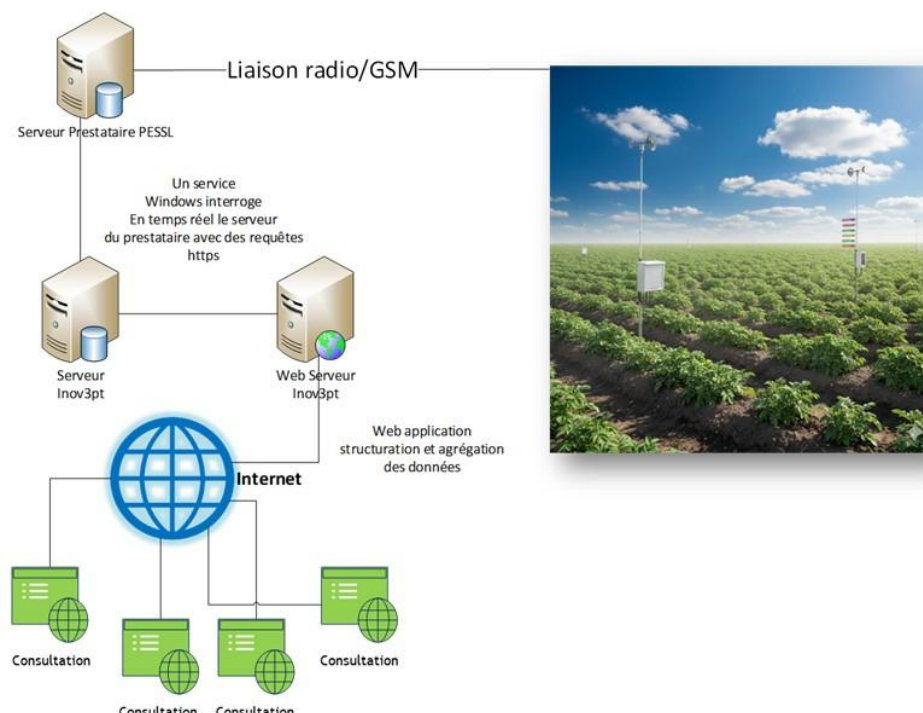


Figure 8 : Représentation schématique du cheminement des informations collectées par les capteurs jusqu'aux utilisateurs finaux.

Description de la figure

Le visuel est composé de deux parties principales. À gauche, un schéma technique illustrant une architecture de communication et de traitement de données. À droite, une photographie représentant un dispositif installé dans un champ agricole. Le schéma de gauche montre plusieurs serveurs et leurs interactions via des connexions réseau. En haut à gauche, un premier bloc intitulé « Serveur Prestataire PESSL » est représenté par une icône de serveur. Une liaison horizontale part de ce serveur vers la droite, annotée « Liaison radio/GSM ». La zone centrale correspond aux serveurs inov3pt. Deux serveurs sont placés en dessous : Serveur inov3pt et Web Serveur inov3pt qui sont reliés par une connexion. Une annotation indique qu'un service Windows interroge en temps réel le serveur du prestataire via des requêtes HTTPS. À droite du Web Serveur inov3pt, un texte indique : Web application structuration et agrégation des données. Sous les serveurs, une icône représentant un globe est associée au mot « Internet ». Plusieurs lignes partent de ce globe vers des icônes de postes utilisateurs schématisant la consultation des utilisateurs.

Cette base de données reprenait la liste des équipements présents sur chaque site, configurait les différentes parcelles d'un site (nom des sites, nombre de plantes, nombre de tiges, nombre de quadrats, variété), permettait l'enregistrement de données automatiques (capteurs) et manuelles (hauteur des plantes), et d'importer ou exporter des photos (surface foliaire, canopée).



5. Discussion : Confrontation des données de capteurs aux données de phénotypage

5.1. Analyse empirique

A partir des spectres de réflectance enregistrés avec les capteurs Apogee, deux indices de végétation ont été calculés, le NDVI et le EVI2. Ces deux indices ont permis de suivre l'évolution de la densité de végétation de la plantation à la sénescence des plantes de pomme de terre dans les différents sites. Sur le site en Ille et Vilaine (LRH) par exemple (Figure 3), les résultats obtenus ont montré que lors de la croissance active des plantes, la valeur de ces indices augmentait fortement démontrant un recouvrement progressif du sol, traduisant indirectement le développement des plantes. Cette phase était ensuite suivie par un plateau, correspondant à un état de la plante appelée la végétation stabilisée, puis une diminution brutale des indices associée à la sénescence des plantes et à la réouverture du couvert végétal. Ainsi, sans fournir directement des données chiffrées de surface foliaire, la dynamique des variables données par les capteurs permet déjà d'informer sur la dynamique du couvert.

5.2. Prédiction de la surface foliaire

Nous avons mobilisé des méthodes d'apprentissage automatique standard pour évaluer notre capacité globale à prédire une surface foliaire à un temps t à partir de données de capteurs acquises au temps t . Cela correspond à un problème de régression classique où nous allons chercher à prédire la surface foliaire par plante, variable réponse ou de sortie obtenue par le suivi longitudinal destructif du couvert, à partir d'un ensemble de variables d'entrées, ici toutes quantitatives et obtenues par les capteurs déployés dans le projet. Pour cela nous avons utilisé les données obtenues entre 2019 et 2024 sur le site INRAE de Le Rheu (LRH) sur lequel des données préliminaires au projet ont pu être intégrées pour maximiser le nombre d'observations. Les données brutes de surface foliaires présentant une forte variabilité inter-plantes rendent plus difficile les prédictions. Nous avons ici utilisé la surface foliaire obtenue par un modèle non-linéaire bi-logistique ajusté aux données par les moindres carrées. Ce modèle capture bien la dynamique moyenne du couvert observé (croissance et défoliation) et permet d'avoir des données de surface foliaire journalière (Glais *et al.* 2026). Concernant les données de capteurs, nous avons i) considéré les moyennes journalières, ii) remplacé les données manquantes, pouvant être imputées à des pannes (capteurs, antenne, serveur), en utilisant une interpolation linéaire et iii) moyenné les données journalières lorsque plusieurs capteurs du même type étaient présents dans la même parcelle. Comme prédicteurs de la surface foliaire nous avons considéré les indices de végétation NDVI et EVI2, la hauteur du couvert obtenu par ultrasons ainsi que la température et l'humidité de l'air. Trois modèles classiques d'apprentissage automatique ont été utilisés : la régression linéaire, les forêts aléatoires (Random Forest) et l'extrême gradient boosting (XGBoost) (Figure 9). Le jeu de données initial a été réparti aléatoirement en 80 % pour l'apprentissage et 20 % pour le test. Comme mesure de performance, nous avons considéré la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE), l'erreur quadratique moyenne relative (RRMSE), la moyenne des différences absolues entre valeurs prédites et valeurs réelles (MAE) et le coefficient de détermination (R^2), des métriques classiques pour les problèmes de régression. Les analyses ont été réalisées en utilisant le logiciel libre R et les packages caret, randomForest, xgboost et MLmetrics. En considérant toutes les données acquises sur le site INRAE pour la variété Passion, les résultats montrent une bonne prédiction de la surface foliaire. Pour de faibles valeurs de surface foliaire les modèles ont tendance à surestimer la surface alors que pour de fortes valeurs (typiquement une fois le couvert fermé) les modèles sous-estiment cette surface. C'est le modèle XGBoost, à priori plus performant, qui prédit le mieux devant les forêts aléatoires et enfin la régression linéaire qui elle ne capture pas les non-linéarités (Figure 9). Comme suggéré par le calcul des corrélations entre les variables, le calcul de l'influence des variables dans les prédictions montre que la hauteur et les indices de végétations (NDVI et EVI2) sont les

variables les plus importantes pour prédire la surface foliaire et suggère une influence très faible de la température et de l'humidité de l'air.

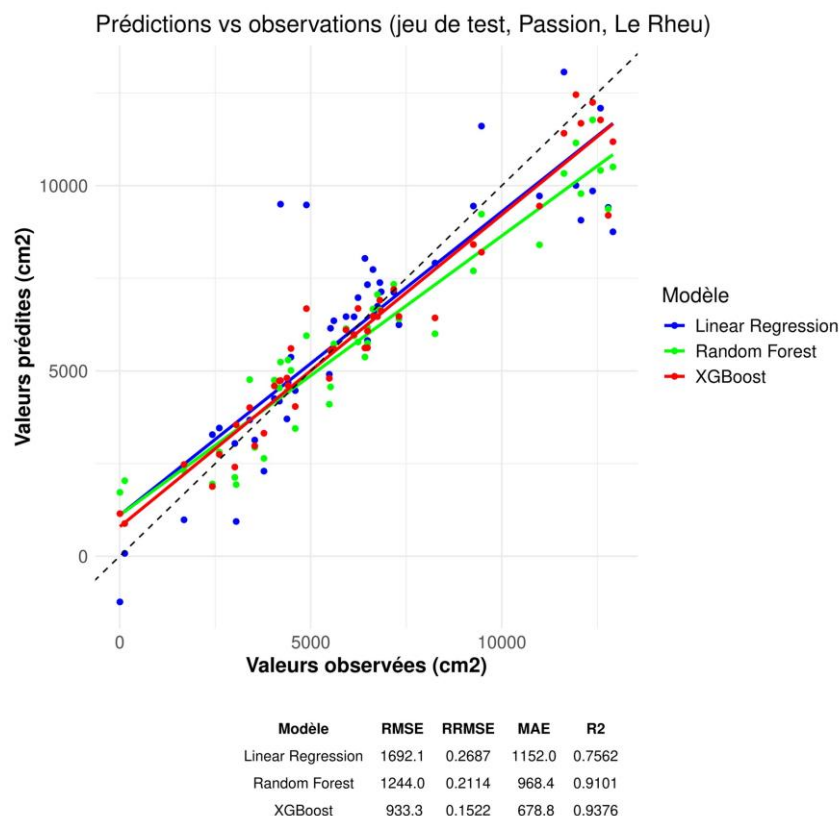


Figure 9 : Comparaison des valeurs prédites et observées (cm²) pour les trois modèles prédictifs. Chaque point représente une observation du jeu de test pour la variété Passion sur le site de Le Rheu. La ligne pointillée correspond à l'égalité parfaite ($y = x$). Les lignes colorées indiquent les tendances de prédiction pour chaque modèle : régression linéaire (bleu), forêt aléatoire (vert) et XGBoost (rouge). Les performances des modèles sont résumées par les indicateurs RMSE, RRMSE, MAE et R².

Description de la figure

La figure présente un nuage de points comparant des valeurs de surface foliaire observées (axe horizontal) à des valeurs prédites par des modèles (axe vertical) pour la variété Passion sur le site INRAE de Le Rheu. Les deux axes utilisent la même unité (cm²) et couvrent une plage allant de 0 à 14 000. Chaque point représente une observation individuelle de jeu de test. Trois ensembles de points sont distingués par couleur : bleu pour le modèle de régression linéaire, vert pour la forêt aléatoire et rouge pour le gradient boosting extrême. Une ligne diagonale en pointillés traverse le graphique du bas gauche vers le haut droit. Elle correspond à la première bissectrice qui représente la situation idéale où les valeurs prédites sont égales aux valeurs observées. Les points sont globalement alignés le long de la diagonale, indiquant une corrélation positive entre valeurs observées et prédites. La dispersion des points autour de la diagonale varie selon la couleur. Les points bleus montrent une dispersion plus importante autour de la diagonale avec des écarts marqués indiquant des sous-estimations et surestimations plus fortes. Les points verts et rouges sont plus proches de la diagonale avec des dispersion plus faibles.

Trois lignes continues, chacune associée à une des trois couleurs et donc modèles utilisés représentent les tendances moyennes. Les lignes montrent que les modèles ont tendance à surestimer la surface foliaire pour des valeurs allant jusqu'à 5000 cm² puis à la sous-estimer pour des valeurs plus fortes. Les lignes sont relativement proches et l'écart le plus notable correspond à la droite verte qui a une pente plus faible et montre que les forêts aléatoires sous-estiment plus la surface foliaire pour des valeurs importantes que les deux autres modèles. Sous le graphique un tableau présente quatre métriques utilisées pour évaluer les performances prédictives des trois modèles : RMSE, RRMSE, MAE et R². En prenant dans l'ordre suivant les modèles régression linéaire, forêt aléatoire et XGBoost le tableau montre que les erreurs (RMSE, RRMSE, MAE) diminuent du premier au troisième modèle alors qu'au contraire le coefficient de détermination augmente. Les résultats montrent que l'ensemble des modèles capture la tendance générale des données et que le modèle XGBoost (en rouge) prédit des valeurs plus proches des observations avec des erreurs plus faibles.



Dans un deuxième temps nous avons voulu savoir si l'apprentissage réalisé sur la variété Passion était transférable à la variété Allians, moins haute et au feuillage moins dense. Pour cela nous avons évalué les capacités prédictives des modèles présentés ci-dessus en considérant comme jeu de test les données acquises pour la variété Allians. Dans ce cas on remarque que c'est la forêt aléatoire qui prédit le mieux et que le XGBoost est le moins performant (Figure 10). De plus, on observe un biais important avec une surestimation des trois modèles. Cela met en exergue un problème de surajustement et la difficulté de prédire correctement la surface foliaire pour toutes les variétés. Néanmoins, dans les cas où le biais identifié est stable, ce qui est le cas ici, il est envisageable de corriger les prédictions a posteriori.

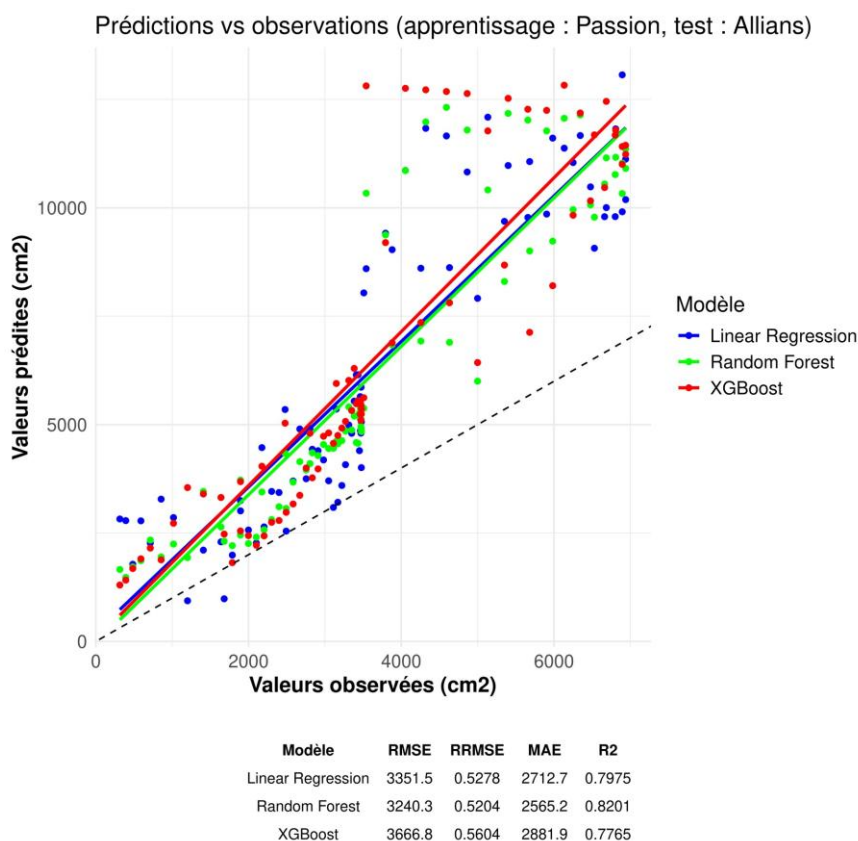


Figure 10 : Comparaison des valeurs prédites et observées (cm²) pour les trois modèles prédictifs lorsque l'apprentissage est réalisé sur la variété Passion et le jeu de test correspond aux données acquises pour la variété Allians. Chaque point représente une observation du jeu de test pour la variété Allians sur le site de Le Rheu. La ligne pointillée correspond à l'égalité parfaite ($y = x$). Les lignes colorées indiquent les tendances de prédiction pour chaque modèle : régression linéaire (bleu), forêt aléatoire (vert) et XGBoost (rouge). Les performances des modèles sont résumées par les indicateurs RMSE, RRMSE, MAE et R²

Description de la figure

La figure présente un nuage de points comparant des valeurs de surface foliaire observées pour la variété Allians sur le site INRAE de Le Rheu (axe horizontal) à des valeurs prédites par des modèles (axe vertical) entraînés avec les données acquises sur la variété Passion. Les deux axes utilisent la même unité (cm²) et couvrent une plage allant de 0 à 14 000. Chaque point représente une observation individuelle de jeu de test. Trois ensembles de points sont distingués par couleur : bleu pour le modèle de régression linéaire, vert pour la forêt aléatoire et rouge pour le gradient boosting extrême. Une ligne diagonale en pointillés traverse le graphique du bas gauche vers le haut droit. Elle correspond à la première bissectrice qui représente la situation idéale où les valeurs prédites sont égales aux valeurs observées.



Les points sont quasiment tous au-dessus de la diagonale indiquant une surestimation de la surface foliaire de la variété Allians. La dispersion des points ainsi que l'écart à la première bissectrice augmentent avec la surface foliaire. Trois lignes continues, chacune associée à une des trois couleurs et donc modèles utilisés représentent les tendances moyennes. Les lignes montrent que les modèles surestiment la surface foliaire et que le biais augmente avec la surface foliaire. Les lignes sont relativement proches et l'écart le plus notable correspond à la droite rouge qui a une pente plus élevée et montre que le modèle XGBoost surestime plus la surface foliaire pour des valeurs importantes que les deux autres modèles. Sous le graphique un tableau présente quatre métriques utilisées pour évaluer les performances prédictives des trois modèles : RMSE, RRMSE, MAE et R². Le tableau montre que les erreurs (RMSE, RRMSE, MAE) diminuent dans l'ordre XGBoost, régression linéaire et forêt aléatoire, le coefficient évoluant logiquement dans le sens inverse.

6. Conclusions, perspectives

Le projet CANOPY a permis de montrer qu'il était possible d'avoir un outil numérique répondant à la demande forte de la filière plant de pomme de terre de pouvoir suivre en temps réel le développement de la plante pour permettre à terme d'adapter au contexte local (variété, croissance du couvert) les pulvérisations en huile minérale de protection contre les infections PVY. Ce projet met notamment en avant la large panoplie de compétences à mobiliser pour mettre au point, valider, déployer et utiliser ce type d'outil. En déployant des capteurs fixes sur quatre sites d'expérimentation, pendant quatre années, et sur deux variétés de pomme de terre nous avons pu faire la preuve de concept qu'il était possible de suivre la croissance du couvert en temps réel, mais aussi d'identifier différentes limites et perspectives.

La transmission sans fil des données et le déploiement d'un système informatique adapté permettent aux utilisateurs finaux d'accéder aux données en temps réels. La hauteur et les indices de végétation étant fortement corrélés au développement du couvert végétal, le simple suivi régulier de ces variables est très informatif et permet d'avoir une première idée de la dynamique du couvert. Par exemple une augmentation rapide de la hauteur et d'indices de végétation indiquent une croissance rapide du couvert. Des développements informatiques pourraient permettre de rendre ces informations encore plus facilement accessibles (e.g. applications smartphone) et conviviales.

Le phénotypage non destructif et destructif des couverts de pomme de terre réalisé lors du projet a fourni de nombreuses données quantitatives sur le développement foliaire des plantes qui était encore souvent estimé de manière empirique. L'ensemble de ces données a notamment mis en exergue une grande hétérogénéité de développement des plantes selon la localisation géographique de la culture, l'année, et la variété considérée. Ce dernier élément est en total accord avec les observations faites de façon empirique par les experts terrain qui estiment le regroupement des variétés en trois groupes selon la nature de la croissance des plantes : croissance lente / moyenne / rapide. Cette variabilité (variétale, localisation géographique, annuelle) complexifie énormément la gestion de protection des plantes contre les infections virales et met en avant le défi d'adapter la gestion au contexte local de chaque parcelle. En effet, une même variété produite dans des zones géographiques différentes présentera une dynamique de développement foliaire variable. De la même manière deux variétés produites dans une même parcelle pourront avoir un développement foliaire différent selon leur physiologie propre. Cette variabilité importante a pour conséquence que les recommandations générales faites pour protéger les couverts peuvent souvent être peu adaptées aux contextes locaux.

La première confrontation des données d'observation de la surface foliaire aux données issues des capteurs a montré que i) la forte variabilité inter-plantes de la surface foliaire diminue les performances des modèles pour prédire la surface foliaire à partir des capteurs (voir Glais *et al.* 2026), ii) qu'en lissant d'abord les surfaces foliaires, des modèles prédictifs communs peuvent relativement bien prédire avec un biais faible sur la surface foliaire à partir du suivi non destructif par capteurs et que iii) des données acquises sur une variété ne permettent pas de prédire sans biais la surface foliaire de toutes les variétés. Pour obtenir un meilleur modèle prédictif et limiter le sur-apprentissage sur une variété, il serait important de collecter des données (surface foliaire et suivi par capteur) dans un ensemble de variétés présentant des architectures et des dynamiques de croissances variées. Ce travail reste à compléter



notamment pour évaluer les transferts entre années et sites expérimentaux. Les modèles d'intelligence artificielle récents étant plus performants que les modèles de machine learning classiques comme ceux que nous avons utilisés, l'utilisation d'architectures types transformers pour les séries temporelles pourraient permettre d'améliorer la qualité des prédictions. De plus, il pourrait être intéressant d'envisager des prévisions à court terme pour essayer de prédire la surface foliaire les jours suivants. Répondre à ce type de question serait tout à fait intéressant pour avoir un outil d'aide à la décision et pourrait nécessiter la combinaison de modèles d'IA et de modèles d'écophysiologie.

L'analyse des données et le calcul de l'influence des variables dans les modèles de prédiction montre que quelle que soit la variété et sa dynamique de développement foliaire, en période de croissance active, la hauteur des plantes définie avec les capteurs à ultrasons, permettait de prédire de façon fiable la surface foliaire. En revanche, lors de la végétation stabilisée, c'est l'indice de végétation EVI2 qui serait préconisé pour la prédiction. Si la phase de croissance active est la plus importante il pourrait envisager de ne suivre que la hauteur du couvert, en particulier sa dynamique, pour avoir un bon proxy de la dynamique de la surface foliaire. Toutefois ces tendances pourraient dépendre de l'architecture de la plante et il faudrait étudier cet aspect plus en profondeur pour généraliser cette tendance. Si ce facteur de développement foliaire est pris en compte à l'avenir par les experts terrain pour les conseils apportés aux producteurs pour la modulation des pulvérisations huile, il sera important pour les obtenteurs de connaître la dynamique de développement foliaire de leurs nouvelles variétés par rapport aux autres variétés. Dans l'idéal, nous pourrions imaginer une approche d'agriculture de précision où chaque parcelle soit suivie en temps réel pour que les traitements soient adaptés à l'échelle de la parcelle. Une autre approche qui pourrait être moins précise mais intéressante, serait que ce suivi en temps réel du développement foliaire via les capteurs, se fasse dans chaque bassin de production de la pomme de terre, et sur chacun des trois groupes de variétés définis selon leur dynamique de développement foliaire.

A terme, en vue d'une utilisation optimale des capteurs à ultrasons et de réflectance en conditions de culture, une nouvelle réflexion devra être engagée pour identifier un système de portique capable de se baisser automatiquement à l'approche d'un engin agricole pour ne pas bloquer leur passage lors des différents traitements de la culture. On pourrait imaginer des systèmes similaires à ceux utilisés pour l'ouverture automatique de portails, adaptés à des portiques. Nous pourrions également envisager d'équiper les machines agricoles de caméras pour cartographier la parcelle et mieux décrire la variabilité spatiale de la surface foliaire. En combinant capteurs fixes et suivi embarqué par caméra de manière opportuniste (lorsque la machine passe), il serait ainsi envisageable de prédire la dynamique spatio-temporelle au sein de chaque parcelle.

La méthodologie et le dispositif appliqués jusqu'à présent permettent de collecter des données à l'échelle de la plante ; cependant il pourrait être également intéressant d'acquérir des données de développement foliaire à l'échelle de la feuille pour évaluer notamment la surface foliaire produite au cours du temps selon les étages foliaires et selon le stade physiologique de la plante (croissance active, végétation stabilisée). Ces informations sont cruciales pour une protection optimale de la plante face aux infections virales du fait que la protection apportée par l'huile est une protection de contact qui n'est pas efficace sur les nouvelles surfaces foliaires produites entre deux pulvérisations.

Éthique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.



Déclaration relative à l'Intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'Intelligence artificielle dans le processus de rédaction

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

ORCIDs des auteurs

LECLERC, M. : <https://orcid.org/0000-0002-5314-461X>

LANGRUME, C. : <https://orcid.org/0009-0005-1279-6928>

LE HINGRAT, Y. : <https://orcid.org/0000-0002-26212541>

Contributions des auteurs

Laurent GLAIS : Pilotage des essais expérimentaux sur les 4 régions ; collecte des données destructives sur le site LRH en Ile et Vilaine

Melen LECLERC : Gestion des analyses statistiques et développement du modèle de prédiction ; collecte des données destructives sur le site LRH en Ile et Vilaine

Heiner DENZER : Intégration des capteurs et mise en place des capteurs dans les différents sites d'expérimentation

Christophe LANGRUME : Pilotage et suivi des capteurs INRAE ; collecte des données destructives sur le site LRH en Ile et Vilaine

Stéphane JUMEL : Développement de la méthode rapide d'évaluation de la surface foliaire ; collecte des données destructives sur le site LRH en Ile et Vilaine

Christophe DARGIER : Développement de la base de données

Philippe LATY : Mise en place et gestion de l'essai sur le site CCS en région Centre-Val de Loire

Philippe DOLO : Mise en place et gestion de l'essai sur le site BPI en région du Finistère

Sébastien VAST et David DUPRE : Mise en place et gestion de l'essai sur le site CN en région Hauts-de-France

Sarah CARDON : Formation des opérateurs à l'enregistrement des données manuelles sur la base de données, développement de la partie front-end permettant de visualiser les données collectées issues des capteurs

François VERNEY : Développement des outils de visualisation en temps réel des données collectées issues des capteurs

Frédéric BOULARD et Maryse URVOY : Plantation et récolte ; collecte des données destructives sur le site de la région Ile et Vilaine

Loïc DANIEL : Mise en place de l'essai sur le site LRH de la région Ile et Vilaine

Laura DEMEY : Responsable de la gestion administrative de projet

Yves LE HINGRAT : Pilotage initial du projet CANOPY

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, conseiller, posséder de parts, recevoir de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.



Remerciements

Aux partenaires et personnes impliquées dans la mise en place et le suivi des essais, et aussi pour la gestion des capteurs.

Déclaration de soutien financier

Ce projet a bénéficié du concours financier du ministère de l'agriculture et de l'alimentation via le compte d'affectation spéciale « Développement agricole et rural de recherche technologique pour la compétitivité et la durabilité des filières de la production à la transformation » dans le cadre de l'appel à projets Recherche Technologique 2020.

Références bibliographiques

Beczner, L., Horvath, J., Romhanyi, I., & Förster, H. (1984). Studies on the ethiology of tuber necrotic ringspot disease in potato. *Potato Research* 27: 339-352.

Boiteau, G., Singh, M., & Lavoie, J. (2009). Crop border and mineral oil sprays used in combination as physical control methods of the aphid-transmitted potato virus Y in potato. *Pest Management Science*, 65: 255-259.

Glais, L., Bellstedt, D.U. & Lacomme, C. (2017). Diversity, Characterisation and Classification of PVY. In: Lacomme C., Glais L., Bellstedt D.U., Dupuis B., Karasev A.V., Jacquot E. (Eds), *Potato virus Y: biodiversity, pathogenicity, epidemiology and management*. Springer International Publishing AG, Chan. Pp 43-76.

Glais, L., Leclerc, M. (2026). Volet technique final du projet CANOPY. Plateforme de la R&D Agricole. <https://rd-agri.fr/detail/DOCUMENT/120159b8-9382-4d46-9b00-7b6e3524d0b8>

Hane, D.C., Hamm, P.B. (1999). Effects of seedborne potato virus Y infection in two potato cultivars expressing mild disease symptoms. *Plant Disease* 83: 43-45.

Jumel, S., Glais, L., Boulard, F., Langrume, C. & Leclerc, M. (2025). Conception d'un support de prises de vue et d'une chaîne d'analyse d'images pour l'estimation rapide de la surface foliaire sur feuilles détachées. *NOV'AE* 5.

MAAF (2015). Plan Ecophyto II.

Reboud, X., Bedoussac, L., Cellier, V., Cordeau, S., Delzon, S., Leclerc, M., & Jouan, J. (2022). Mobiliser les agroéquipements et le numérique pour des systèmes de culture sans pesticides. *ZÉRO PESTICIDE*, 177.

Rykboost, K.A., Hane, D.C., Hamm, P.B., Voss, R., & Kirby, D. (1999). Effects of seedborne potato virus Y on russet Norkotah performance. *American Journal of Potato Research*. 76: 91-96.

Pour citer cet article : Laurent GLAIS, Melen LECLERC, Heiner DENZER, Christophe LANGRUME, Stéphane JUMEL, Christophe DARGIER, Philippe LATY, Philippe DOLO, Sébastien VAST, Sarah CARDON, François VERNEY, David DUPRÉ, Frédéric BOULARD, Loïc DANIEL, Maryse URVOY, Laura DEMEY & Yves LE HINGRAT, 2026 - Phénotyper par capteurs le Couvert végétal de la pomme de terre pour mieux lutter contre le virus Y : Projet CANOPY (2020-2025). *Innovations Agronomiques* 112, <https://doi.org/10.17180/10.17180/ciag-2026-vol112-art09>



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations agronomiques* et son DOI, la date de publication.