



Prévision du risque de dégâts causés par les taupins sur les pommes de terre, et stratégies de lutte durables

Bruno Ngala, Ronan Le Cointe, Philippe Larroudé, Florian Manceau, Jérémy Cigna, Sylvain Poggi, Amandine Mollet, Philippe Dolo, François Verheggen, Yves Le Hingrat

► To cite this version:

Bruno Ngala, Ronan Le Cointe, Philippe Larroudé, Florian Manceau, Jérémy Cigna, et al.. Prévision du risque de dégâts causés par les taupins sur les pommes de terre, et stratégies de lutte durables. *Innovations Agronomiques*, 2026, 112, pp.148-174. <10.17180/ciag-2026-vol112-art10>. <hal-05684254>

HAL Id: hal-05684254

<https://hal.inrae.fr/hal-05684254v1>

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



Prévision du risque de dégâts causés par les taupins sur les pommes de terre, et stratégies de lutte durables

Bruno NGALA¹, Ronan LE COINTE², Philippe LARROUDÉ³, Florian MANCEAU¹, Jérémy CIGNA^{1,4}, Sylvain POGGI², Amandine MOLLET⁵, Philippe DOLO⁶, François VERHEGGEN⁷, Yves LE HINGRAT^{1,8}

¹ inov3PT, rue des Champs Potez, 62217 Achicourt, France

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

³ Arvalis - Institut du végétal, 21 chemin de Pau, 64121 Montardon, France

⁴ CNRS, Institut de Biologie Intégrative de la Cellule, 1 Av. de la Terrasse, 91190 Gif-sur-Yvette, France

⁵ FREDON Hauts de France – 21 et 265 rue Becquerel 62750 Loos-en-Gohelle, France

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

⁷ Université de Liège - Faculté de Gembloux Agro-Bio Tech - Laboratoire d'Écologie chimique et comportementale - Bât. TERRA - Avenue de la Faculté d'Agronomie 2B - Gembloux 5030, Belgique

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

Correspondance : bruno.ngala@inov3pt.fr ; ronan.le-cointe@inrae.fr

DOI : <https://doi.org/10.17180/10.17180/ciag-2026-vol112-art10>

Résumé

Dans un contexte de retrait des solutions chimiques, les larves de taupins (*Agriotes* spp.) sont devenues des ravageurs majeurs de la pomme de terre. Le projet TAUPIC (2020–2024) a réuni un large consortium pour développer des outils de prévision du risque, évaluer des solutions alternatives (biocontrôle, variétés, plantes de service) et initier des stratégies de protection intégrée. Les résultats montrent (i) une hiérarchisation des facteurs de risque, (ii) une forte variabilité spatio-temporelle des infestations, (iii) une efficacité partielle du biocontrôle (0–45 %), (iv) des différences variétales significatives liées aux profils métaboliques, et (v) le développement d'outils innovants (barcoding ADN, élevage, olfactométrie). TAUPIC a permis de constituer un socle de connaissances et ouvre la voie à une protection durable contre les taupins (*Agriotes* spp.).

Mots-clés : Taupins *Agriotes*, Pomme de terre, Biocontrôle, Protection intégrée, Prévision du risque, Variétés

Abstract: Predicting the risk of damage caused by wireworms to potatoes and sustainable control strategies

In a context of declining availability of chemical solutions, wireworm larvae (*Agriotes* spp.) have become major pests of potato crops. The TAUPIC project (2020–2024) brought together a broad consortium to develop risk prediction tools, assess alternative solutions (biocontrol, varieties, companion crops), and initiate integrated pest management strategies. The results show (i) a ranking of risk factors, (ii) strong spatial and temporal variability in infestations, (iii) partial effectiveness of biocontrol (0–45%), (iv) significant varietal differences linked to metabolic profiles, and (v) the development of innovative tools (DNA barcoding, rearing methods, olfactometry). TAUPIC has established a solid knowledge base and paves the way for sustainable protection against wireworms (*Agriotes* spp.).

Keywords: Wireworms *Agriotes* spp., Potatoes, Biocontrol, Integrated protection, Risk factors, Varieties



1. Introduction

Les taupins (Coléoptères, Elateridae) constituent aujourd'hui des ravageurs majeurs de la pomme de terre, provoquant des pertes économiques importantes par des dégâts sur tubercules (piqûres, galeries, présence de larves) (Kuhar et Speese, 2009). Les espèces responsables se répartissent en deux grands groupes selon leur cycle biologique : des espèces à cycle court (2–3 ans) et d'autres à cycle long (4–5 ans), dont la dynamique influence fortement les niveaux d'infestation et la gestion du risque. La production de plants est particulièrement impactée en raison d'exigences réglementaires strictes, mais l'ensemble des filières est concerné (Kasirajan et Ngouajio, 2012 ; Poggi *et al.*, 2021). En France, la pression des taupins, variable selon les contextes pédoclimatiques et les rotations, tend globalement à s'accroître (Larroudé, P., 2015).

La situation est particulièrement critique dans certaines zones d'élevage, notamment dans l'Ouest (Larroudé, P., 2015). En Bretagne, une enquête a montré que près de la moitié des parcelles étaient touchées, voire jusqu'à deux tiers localement, avec des niveaux élevés de dégâts rendant certains lots non commercialisables. Des difficultés supplémentaires apparaissent à l'export, notamment vers des pays comme l'Égypte en raison d'exigences sanitaires ciblant certaines espèces non présentes en France. D'autres régions sont également fortement affectées : le Sud (notamment Perpignan), les Pays de la Loire, la Nouvelle-Aquitaine ou encore l'Auvergne-Rhône-Alpes, où des pertes économiques importantes et des abandons de production sont observés. À l'inverse, certaines zones comme la Beauce restent relativement moins touchées, probablement en lien avec les sols et les systèmes de culture.

Dans les Hauts-de-France, les attaques sont en progression, avec en 2019 environ 20 % de tubercules touchés en moyenne sur un réseau de surveillance dédié. Plusieurs espèces ont été identifiées, dont *Agriotes sordidus* et *A. lineatus*, tandis que cinq espèces adultes ont été piégées (cycle long (4–5 ans) : *A. sputator*, *A. gallicus*, *A. lineatus*, *A. obscurus*, et cycle court (2–3 ans) : *A. sordidus*). Toutes les filières sont concernées, et de nombreuses variétés présentent des dégâts significatifs. Les systèmes en agriculture biologique sont particulièrement vulnérables en l'absence de solutions de lutte efficaces autorisées.

Cette recrudescence s'explique en partie par le retrait progressif de substances actives efficaces, comme l'éthoprophos interdit en 2019, rendant nécessaire le développement de nouvelles stratégies de gestion. Le projet TAUPIC (Casdar 2020–2024) s'inscrit dans cette dynamique, avec pour objectifs : (i) améliorer la prévision des risques d'attaque, (ii) développer des solutions alternatives de protection des tubercules, et (iii) concevoir des stratégies de protection intégrée combinant différents leviers agronomiques et biologiques.

2. Matériels et méthodes

2.1. Améliorer la prévision de risques d'infestation et de dégâts de taupins & Epidémiosurveillance

2.1.1. Enquêtes en parcelles pour améliorer la prévision du risque d'infestation et de dégâts en pomme de terre

Des enquêtes menées en 2021 et 2022 ont couvert 359 parcelles et collecté près de 90 variables (pédologiques, historiques, culturelles, paysagères et climatiques). En raison de la disparité des données entre les bassins de production (nombre limité de parcelles sur la zone comité Nord) et les années (aucuns dégâts en 2021 sur la zone Comité Centre et Sud), les analyses se sont concentrées sur la Bretagne. Dans ce jeu de données, nommé « Bretagne Plants », 239 parcelles ont été retenues (voir Figure 1 pour la localisation des parcelles) pour constituer un jeu de données homogène, représentatif du principal bassin de production. Les analyses ont permis de hiérarchiser les facteurs

influençant l'infestation (assolement, conditions pédoclimatiques, environnement) et ceux liés aux dégâts (sensibilité variétale, météo annuelle, itinéraires culturaux). Des modèles statistiques et de *machine learning* ont été utilisés pour relier ces variables aux niveaux de dégâts observés.

Principales étapes :

- conception et actualisation des questionnaires d'enquête ;
- réalisation des enquêtes (entretiens, collecte de données variées) ;
- échantillonnage des parcelles : après la récolte, entre février et mars, 4 échantillons de sol de 8 litres chacun ont été prélevés aléatoirement pour caractériser les niveaux d'infestation en larves du genre *Agriotes* et non *Agriotes* ainsi que pour les analyses de sol (texture, pH, matière organique) ;
- extraction de données météorologiques (INRAE AGROCLIM) et paysagères (méthode ALM1).

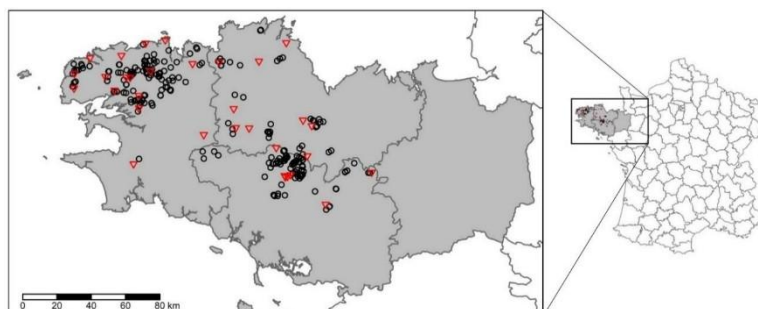


Figure 1 : Localisation des parcelles enquêtées en Bretagne : 239 parcelles ont été géolocalisées et sont représentées par des cercles noirs. Les stations météorologiques sont représentées par des triangles rouges.

Description de la figure 1

La figure 1 représente une carte géographique de la Bretagne sur laquelle sont localisés deux types de points.

Les parcelles enquêtées apparaissent sous forme de nombreux cercles noirs répartis sur l'ensemble du territoire. Leur densité varie selon les zones : certaines régions présentent une forte concentration de cercles, indiquant un nombre élevé de parcelles étudiées, tandis que d'autres zones sont plus faiblement couvertes.

Les stations météorologiques sont indiquées par des triangles rouges, moins nombreux et répartis de manière plus espacée. Leur position permet d'apprécier la couverture du territoire en points de mesure climatique.

L'ensemble de la carte permet de visualiser :

- la distribution spatiale des parcelles étudiées,
- le maillage des stations météorologiques,
- la proximité relative entre parcelles et stations.

La superposition de ces deux types d'informations met en évidence les zones où les données agronomiques (parcelles) et climatiques (stations) peuvent être croisées, ainsi que les éventuels déséquilibres de couverture spatiale.

2.1.2. Caractérisation des dégâts et codage de la variable réponse :

Les dégâts observés sur pomme de terre constituent la variable réponse. Cette variable a été considérée selon 2 types de codage : (i) sous forme d'une variable quantitative correspondant au nombre de tubercules non commercialisables par lot de 100 tubercules, et (ii) sous forme d'une variable qualitative comportant 2 modalités, présence ou absence de dégâts.



La Figure 2 montre la distribution de la variable « dégâts » exprimée sous sa forme quantitative, pour les enquêtes associées à « Bretagne Plants » : 125 lots ne présentent aucun dégât, 64 lots comportent entre 1 et 4 tubercules touchés, 34 lots comportent entre 5 et 10 tubercules touchés, et 16 lots comportent plus de 10 tubercules touchés avec une valeur maximale de 32.

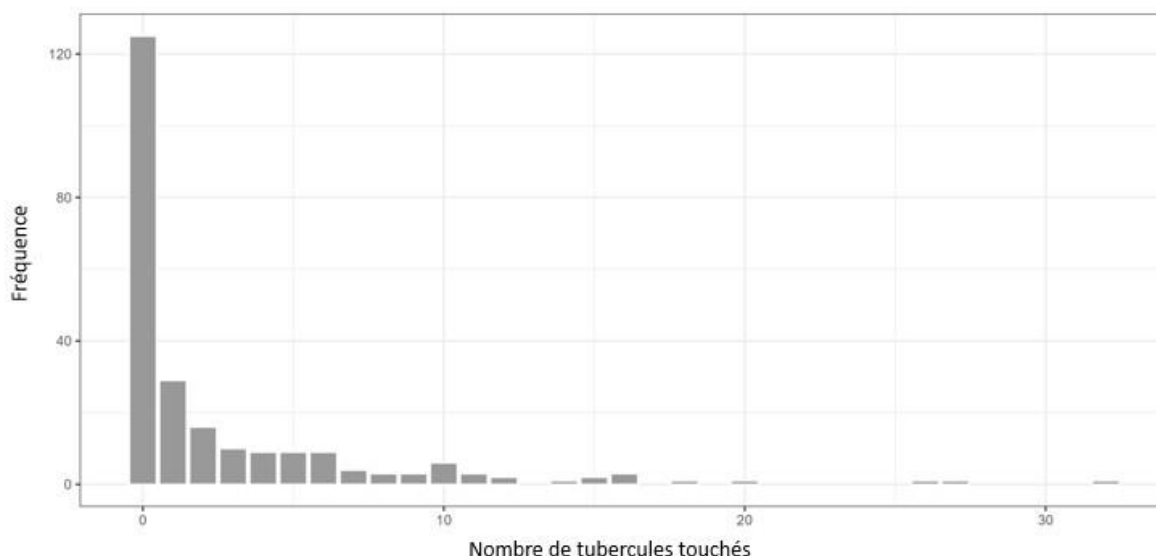


Figure 2 : Distribution des dégâts sur le jeu de données « Bretagne Plants » (variable quantitative).

Description de la figure 2

La figure 2 présente la distribution d'une variable quantitative correspondant au niveau de dégâts observés dans un ensemble de données.

Les valeurs sont représentées selon une échelle continue, organisée le long d'un axe horizontal (valeurs croissantes du niveau de dégâts). L'axe vertical indique la fréquence d'observation ou l'effectif associé à chaque intervalle de valeurs.

La distribution est visualisée sous forme d'un histogramme :

- des barres montrent la répartition des observations selon différentes classes de valeurs ;
- la hauteur des barres indique la concentration des observations pour chaque intervalle.

La figure permet d'identifier :

- la concentration principale des données (zone où les observations sont les plus fréquentes) ;
- l'étendue des valeurs (valeurs minimales et maximales observées) ;
- la présence éventuelle d'une asymétrie (distribution dissymétrique vers les faibles ou fortes valeurs) ;
- la dispersion des données (répartition plus ou moins étalée).

Selon la forme observée, la majorité des parcelles peut se situer dans des niveaux de dégâts faibles à modérés, avec éventuellement quelques observations présentant des niveaux plus élevés.

L'ensemble donne une vision globale de la variabilité des dégâts au sein du jeu de données et permet d'apprécier leur distribution statistique.

2.1.3. Liste des variables collectées et description des variables explicatives retenues :

Lors des enquêtes, près de 90 variables explicatives ont été collectées, regroupées en plusieurs catégories selon leur rôle dans l'infestation ou les dégâts. Après sélection, les variables retenues sont :

- niveaux d'infestation : Inf_Agriotes et Inf_NonAgriotes, issus de prélèvements de sol.



- caractéristiques pédologiques: pH, proportion d'argile, proportion de sable, matière organique.
- contexte paysager : proportions de prairies, cultures sarclées, céréales/légumineuses d'hiver et de printemps, colza d'hiver, surface de la parcelle.
- historique prairie: nombre d'années en prairie entre N-15 et N-5.
- rotation: années en prairie, labours, cultures d'hiver/printemps, cultures sarclées, chaulages.
- conditions climatiques N-1: précipitations + irrigation, température moyenne, jours avec humidité > 0,31, déclinés par saison (hiver, printemps, été, automne).
- itinéraire technique : dates de plantation, défanage, récolte, durées entre ces étapes, densité, type de buttage, traitement pyrèthrinoides.
- conditions climatiques pendant la culture: mêmes indicateurs que N-1, calculés sur 3 périodes (plantation-récolte, plantation-défanage, défanage-récolte).

Certaines variables (ex. variétés) ont été exclues pour manque de pertinence ou de représentativité.

2.1.4. Etude approfondie des facteurs de risques de dégâts sur un réseau de parcelles

En complément des enquêtes parcellaires, un suivi approfondi a été mené sur des sites pilotes de culture de pomme de terre afin de mieux comprendre la dynamique des taupins. L'objectif est de caractériser l'abondance larvaire, la diversité spécifique, l'évolution des attaques et d'identifier les conditions climatiques, culturales et pédologiques favorables aux infestations et aux dégâts, afin d'améliorer la prévision du risque. Sur les trois années d'étude, 28 sites pilotes ont été étudiés par le réseau des partenaires du projet, 9 sites en 2021, 10 sites en 2022 et 9 sites en 2023. Ces sites ont été suivis par les différents partenaires du projet : Bretagne Plants Innovations, Arvalis, Fredon Hauts de France, comité Centre et Sud, Comité Nord/ inov3PT.

Le dispositif expérimental repose sur 16 micro-parcelles (4 rangs de 35 m divisés en 4), observées à 5 dates après plantation (30, 60, 90, 110 et 130 jours). À chacune des dates d'échantillonnage, des prélèvements de sol (20x20x20 cm³) dans la butte ont permis de quantifier l'abondance larvaire, identifier les stades de développement et les espèces des taupins.

Les observations de dégâts sur 25 tubercules par micro-parcelle ont également été réalisées à 90, 110 et 130 jours post-plantation. Les variables climatiques telle que la pluviométrie (station météo à proximité du site), températures et humidité du sol à 15cm de profondeur (Sonde capacitive Sentek Drill & Drop, AGRALIS France) et agronomiques (caractéristiques physico chimiques du sol : texture, pH et % matière organique, date de défanage, durées de culture) ont été croisées avec les indicateurs d'abondance et de dégâts, sur différentes fenêtres temporelles (avant plantation, entre la plantation et les différentes observations, et autour du défanage). Les analyses ont été conduites séparément pour deux groupes d'espèces : Cycles longs 4 à 5 ans de vie larvaire dans le sol (*A. lineatus*, *A. sputator*, *A. obscurus*) → 9 sites (hors Vermelles_2023), et cycle court 1 à 3 ans de vie larvaire dans le sol (*A. sordidus*) → 8 sites.

2.1.5. Identification des espèces présentes

Les enquêtes et suivis de parcelles menées dans le cadre du projet ont permis d'actualiser les connaissances sur la diversité et la répartition des taupins dans les zones de production de pomme de terre. Les larves issues des tris de sol ont d'abord été caractérisées morphologiquement, permettant notamment d'identifier celles du genre *Agriotes* grâce à des critères spécifiques, comme la présence de spiracles sur le neuvième segment abdominal. Ce criblage a été réalisé principalement par l'INRAE-IGEPP, ainsi que par la Fredon Hauts-de-France et Arvalis pour certains échantillons. Les analyses ont ensuite été complétées par des identifications moléculaires après extraction d'ADN. Une PCR



multiplexe a notamment été utilisée pour détecter les principales espèces nuisibles en France du genre *Agriotes*, à cycle long (*A. lineatus*, *A. sputator*, *A. obscurus*) ou court (*A. sordidus*) (Mahéo et al., 2020).

Dans un second temps, les ADN des échantillons identifiés comme non *Agriotes* (et certains *Agriotes*) ont été analysés via un outil DNA barcoding adapté par le partenaire inov3PT à partir des travaux de Hebert et al. 2003. Cet outil moléculaire (bar-code ou code-barres génétique) consiste à amplifier une portion du gène de la Cytochrome Oxydase I (COI), de le séquencer et de l'identifier par analyse bio-informatique en la comparant à des séquences de référence disponibles dans les bases de données publiques. Cet outil permet d'identifier l'ensemble des espèces de taupins collectées et a été utilisé sur plus de 300 échantillons du projet (enquêtes et sites).

L'outil barcod a également été utilisé pour apprécier la diversité des populations de taupins présentes en parcelles d'essais durant la culture de pomme de terre et sur des échantillons prélevés après récolte autour de tubercules de pomme de terre et à un niveau moindre provenant de bennes et bâtiments de producteurs.

2.2. Développement de solutions innovantes et durables pour la prévention et la maîtrise des dégâts de taupins sur pomme de terre

2.2.1. Protéger les tubercules de pommes de terre, en évitant ou esquivant les attaques de taupins

L'objectif de cette tâche était d'identifier des stratégies de protection des tubercules de pommes de terre efficaces vis-à-vis des attaques de taupins. Elle consiste à évaluer différentes formulations et/ou stratégies de biocontrôle (microorganismes : *Metarhizium brunneum* F52, *Metarhizium brunneum* CB15-III, *Beauveria bassiana* ATCC74040 (Naturalis), *Beauveria bassiana* NPP111B005, macroorganismes : nématodes entomopathogènes, substances naturelles(extraits d'ail, extraits de piments et moutarde), d'amendements(cyanamide calcique, chitine, algues bore) + huiles essentielles,), stratégie appâts (plantes compagnes blé-orge, fertilisants organiques) ainsi que le levier variétal pour éviter les dégâts sur tubercules à la récolte.

Protection des tubercules

Quatorze (14) essais ont été implantés durant le projet de 2021 à 2023 pour évaluer différentes solutions dans une diversité de situations, avec l'appui des partenaires ou prestataires : Bretagne Plants Innovation (29), Astria (64), Fredon HdF et inov3PT (62), Midi Agro (16) et Arvalis (80). Les différentes solutions ont été appliquées selon différentes manières : soit en raie de plantation à l'aide de dispositifs de diffusion, soit en plein avant plantation, elles ont été soit incorporées dans le sol, soit pulvérisées sur la végétation à différents moments au cours du cycle de la pomme de terre. Les essais ont été menés en bande ou en micro-parcelles sur des dispositifs en blocs de Fischer à 4 répétitions de 4 rangs de 10 mètres de longueur. Sur chaque répétition de chacune des modalités 100 tubercules étaient observés et la présence d'une morsure (taille < 3.5 mm) ou d'un trou (taille > 3.5 mm) causés par les larves de taupins était noté.

2.2.2. Appétence de la plante cible – sensibilité variétale

Deux approches complémentaires ont été développées :

Essais au champ : quatre essais ont été menés en 2022 et 2023 évaluant la sensibilité de quinze variétés de pommes de terre en blocs de Fischer à six répétitions. L'évaluation portait sur 100 tubercules par répétition, distinguant les morsures superficielles (< 3,5 mm) et les trous profonds (> 3,5 mm) (collaboration Bretagne Plants Innovation).

Des tests en laboratoire (collaboration l'Université de Liège-Gembloux) ont été réalisés sur trois témoins de sensibilité : Charlotte (peu sensible), Spunta (moyennement sensible) ou Monalisa (très sensible)



identifiés dans le cadre des essais au champ ont pour objectif de définir le comportement des larves de taupins des espèces *A. obscurus* et *A. lineatus*.

Pour chaque variété, l'appétence des tubercules sur 15 jours ainsi que leurs effets sur le développement des larves de taupins des espèces *Agriotes obscurus* et *A. lineatus* a été évalué sur une période de 50 semaines. L'attractivité des variétés a ensuite été étudiée par des tests de choix binaires. Enfin, les composés organiques volatils (COV) émis par les tubercules, à deux stades physiologiques différents, ont été identifiés et quantifiés grâce à une collecte dynamique des composés volatils suivie d'analyses en chromatographie en phase gazeuse. Les méthodes utilisées sont consignées dans la publication de Chacon et al. (2023).

Activité alimentaire et croissance larvaire - L'activité alimentaire des taupins a été étudiée pour différentes variétés de pommes de terre en conditions contrôlées. Chaque larve était placée individuellement avec un tubercule dans une boîte contenant de la vermiculite humidifiée, maintenue dans l'obscurité à 21 ± 1 °C. Après quinze jours, les dégâts causés aux tubercules ont été évalués à partir du nombre de morsures, du nombre et de la taille des galeries profondes. Le poids des taupins et des tubercules a également été mesuré au début et à la fin des essais.

Attractivité et identification des COV

L'attractivité de différentes variétés de pommes de terre pour les taupins a été évaluée à l'aide d'un olfactomètre à deux branches. Les larves pouvaient choisir entre les odeurs émises par deux variétés de tubercules placées dans des bocal distincts. Après diffusion des odeurs, la position des taupins était observée afin d'identifier leur préférence olfactive. Les essais ont été réalisés en conditions contrôlées, avec plusieurs répétitions techniques.

Les tubercules ont été lavés, séchés puis stockés à 4 °C avant l'analyse des composés organiques volatils (COV). Deux tubercules étaient placés dans une chambre hermétique et les COV collectés durant 6 h sur des tubes adsorbants spécifiques. Les analyses ont été réalisées par chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse (GC-MS). Les composés ont été identifiés grâce à des bases de données et indices de rétention. Les quantités de COV ont ensuite été estimées et rapportées au poids sec des pelures, représentatif de la surface d'émission.

2.2.3. Etudes de la biologie des taupins en conditions contrôlées

Depuis 2020, un système d'élevage a été mis en place chez inov3PT à Achicourt, sur le modèle de l'IGEPP et d'Agroscope, afin de produire des populations homogènes de larves en conditions contrôlées. Le suivi quotidien des vols d'adultes (mars-juin), via des pièges à fourrage et des données météorologiques, a permis à la fois de collecter le matériel nécessaire aux élevages et d'analyser les facteurs environnementaux influençant leur activité. Ces élevages ont ensuite servi à conduire diverses expérimentations méthodologiques et à évaluer des stratégies de lutte en conditions contrôlées.

Un dispositif d'olfactométrie à 4 voies avec un pot central connecté au 4 pots périphériques via des tunnels, a été développé en 2021. Il a permis d'étudier les comportements et préférences alimentaires des larves de taupins et de cribler rapidement les extraits végétaux, variétés de pommes de terre et plantes de service selon leur attractivité ou leur caractère répulsif.

Entre 2022 et 2023, des couverts végétaux ont été testés en combinaison avec des champignons entomopathogènes (*Metarhizium brunneum*) encapsulé. Des études visant à identifier les couverts végétaux (sarrasin, moutard, radis fourrager, ray-grass anglais) impactant la ponte des adultes et le développement des jeunes larves de taupins ont été menées sous tunnel et en serre (2023 – 2024).



2.3. Analyses de données :

2.3.1. Améliorer la prévision de risques d'infestation et de dégâts de taupins & Epidémiosurveillance

2.3.1.1. Analyses des données issues des enquêtes

Dans le projet TAUPIC, la prévision du risque de dégâts repose sur la prédiction d'une variable réponse (quantitative : nombre de tubercules touchés, ou qualitative : présence/absence de dégâts) via des modèles de régression ou de classification. Trois algorithmes non linéaires ont été utilisés pour ces deux tâches : Random Forest (RF1), Conditional Random Forests (RF2) et Extreme Gradient Boosting (XGB), tous basés sur des ensembles d'arbres de décision. Pour la classification, la régression logistique (LOGREG) a également été appliquée. Les modèles ont été évalués selon :

- régression : MAE, RMSE, R^2
- classification : taux de bon classement (Accuracy)

La calibration s'est faite sur 239 parcelles, suivie d'une validation par validation croisée pour estimer la capacité prédictive sur de nouvelles parcelles. L'ensemble des analyses a été réalisé sous R v4.4.2.

2.3.1.2. Analyses des données issues de l'étude approfondie des facteurs de risques de dégâts sur un réseau de parcelles

Pour ce jeu de données les analyses réalisées par XLSTAT (version 2024.4.0.1424) sont basées sur la mise en relation des conditions climatiques, des caractéristiques physico-chimiques du sol et des pratiques culturales avec l'abondance larvaire ou les dégâts. Seules certaines relations dont les coefficients de corrélation (r) sont inférieurs à -0.50 ou supérieurs à +0.50 sont commentées. Certaines relations sont réalisées par le biais d'équations de prédiction en affichant le coefficient de détermination R^2 .

2.3.1.3 Analyse des données d'essais en micro-parcelles

La séquence de l'analyse se déroule comme suit : 1- L'essai est-il réaliste, c'est-à-dire capable de fournir des données utiles ? Pour cela, il faut que le niveau d'attaque dans le témoin non traité soit suffisant, 2 - les résultats sont-ils cohérents ? Pour cela, il faut que par comparaison au témoin non traité, la préparation de référence donne des résultats attendus. Si ces 2 conditions sont remplies, et après une transformation Arcsinus, les variables sont soumises à une analyse de variance (ANOVA) puis à un test de Tukey ($\alpha \leq 5\%$) pour comparer les préparations entre elles à l'aide du logiciel statistique R (v3.4.2).

2.3.1.3. Analyses des données d'essais en laboratoire

Les analyses statistiques ont été réalisées sous R afin d'évaluer l'effet des variétés de pommes de terre sur l'alimentation, le développement et l'attractivité des taupins. Différents tests statistiques (ANOVA, Kruskal-Wallis, Mann-Whitney-Wilcoxon) ont permis de comparer les variations de poids, les dégâts observés et la taille des galeries. Des modèles mixtes ont été utilisés pour analyser l'évolution du poids et de la taille des larves sur 50 semaines, en tenant compte de la variabilité individuelle. Les préférences olfactives des taupins lors des tests de choix ont été étudiées par modèles binomiaux. Enfin, les profils de composés organiques volatils (COV) des tubercules ont été comparés entre variétés et stades de développement grâce à des analyses multivariées (PermANOVA, ACP) et des analyses univariées.

2.3.1.4. Analyses des données issues d'essais en conditions contrôlées

Pour les expériences réalisées en conditions contrôlées, les données ont été soumises à une analyse de variance (ANOVA) à l'aide de GenStats V21. Le seuil de significativité statistique entre les modalités a été déterminée à 95 % % niveaux de confiance à l'aide du test Tukey ($\alpha \leq 5\%$).



3. Résultats (figures et tables inclus)

3.1. Enquêtes en parcelles pour améliorer la prévision du risque d'infestation et de dégâts en pomme de terre

3.1.1. Résultats des modèles de prévision de la variable réponse quantitative (nombre de tubercules touchés)

Parmi les trois méthodes testées, RF1 et XGB présentent un très bon ajustement ($R^2 = 0,93$ et 1 respectivement), contrairement à RF2 ($R^2 = 0,57$). Ces performances élevées suggèrent un possible surapprentissage, justifiant une étape de validation. La Figure 3 compare les modèles en termes d'erreur (MAE, RMSE) et de variance expliquée (R^2). Un modèle de référence dit « nul » est également présenté : il consiste à prédire systématiquement la valeur moyenne des dégâts observés dans le jeu de données initial. Trois principaux enseignements en ressortent :

- les 3 modèles produisent des prédictions nettement meilleures que le modèle nul ;
- les 3 modèles présentent des performances équivalentes, à titre d'illustration des valeurs d'erreur absolue moyenne (MAE) entre prédictions et observations égales à 2,9, 3,0 et 2,8 respectivement pour RF1, RF2 et XGB ;
- ces performances estimées par validation croisée restent modestes.

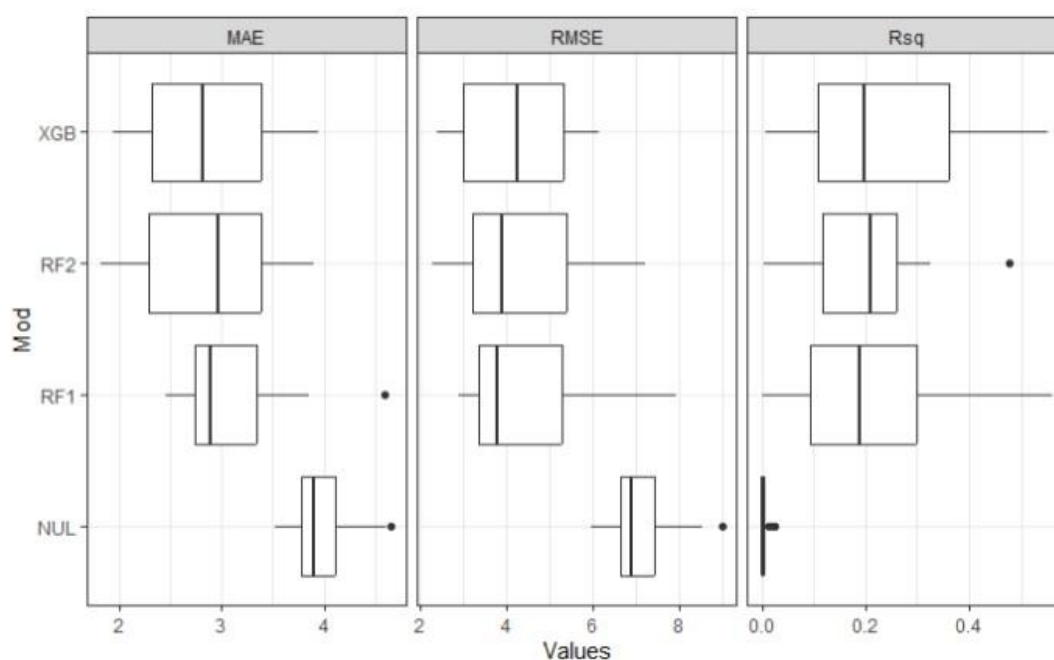


Figure 3 : Comparaison des performances de quatre modèles (RF1, RF2, XGB, modèle nul) pour prédire le nombre de tubercules touchés, à partir d'indicateurs d'erreur (MAE, RMSE) et de variance expliquée (R^2).

Description de la figure 3

La figure 3 compare quatre modèles de prédiction (RF1, RF2, XGB et un modèle de référence nul) selon trois indicateurs : MAE, RMSE et R^2 .

Chaque modèle est associé à des valeurs permettant d'évaluer :

- la précision des prédictions (MAE, RMSE),
- la capacité à expliquer la variabilité des données (R^2).



Les tendances observées sont les suivantes :

- RF1 et XGB présentent de faibles erreurs et des valeurs élevées de R^2 , indiquant de bonnes performances.
- RF2 affiche des erreurs plus élevées et un R^2 plus faible, traduisant une performance intermédiaire.
- le modèle nul présente les erreurs les plus fortes et un R^2 très faible, servant de référence minimale.

L'ensemble met en évidence des différences nettes de performance entre les modèles et permet d'identifier les plus efficaces pour la prédiction des dégâts.

3.1.2. Identification et hiérarchisation des variables explicatives prépondérantes pour la variable réponse quantitative (nombre de tubercules touchés)

Chacun des 3 algorithmes appliqués possède une mesure propre de l'importance des variables explicatives. Le Tableau 2 dresse le bilan des variables identifiées comme importantes, et de leur hiérarchisation, et souligne en caractères gras les variables dont l'influence fait consensus : le niveau d'infestation en larves du genre *Agriotes* (INF_Agriotes), mesuré sur la base de 4 tris de sol par parcelle, le pH (Sol_pH) et la teneur en matière organique (Sol_MO).

Parmi les variables impliquées dans le processus de colonisation de la parcelle, outre le pH et la teneur en matière organique, 4 variables explicatives sont mises en exergue par 2 algorithmes simultanément : Rota_prairie_nb (par XGB et RF2), la surface de la parcelle (Parcelle_Surface, par RF1 et XGB), le nombre d'années en cultures sarclées (Rota_CS, par RF2 et XGB), et les conditions météorologiques en période estivale (Meteo_summer_n.1_temperature, par RF1 et XGB).

Parmi les variables impliquées dans le processus d'attaques sur pomme de terre, aucune n'est consensuelle aux 3 méthodes. Toutefois, l'itinéraire technique de la culture de pomme de terre est représenté avec la conduite de la culture en buttes ou en billons (ITK.ecart) identifiée comme importante par RF2 et XGB, et la durée de la culture (ITK_Delta_plant_def et ITK_Delta_def_rec) identifiée par RF1 et XGB. De plus, les conditions climatiques entre le défanage et la récolte apparaissent via la variable Meteo_N_Hum_0.31_def_rec qui correspond au nombre de jours entre le défanage et la récolte où le sol présente une humidité supérieure à 0.31, identifiée comme influente par RF1 et XGB.

De façon moins consensuelle, l'algorithme XGB identifie comme importantes la texture du sol, les proportions de surface en prairie et culture sarclée dans le paysage, le nombre d'années en céréales ou légumineuses d'hiver, et plusieurs caractérisations des conditions météorologiques l'année précédente. Le nombre de labours est quant à lui identifié par l'algorithme RF2.



Tableau 2 : Synthèse des variables identifiées comme importantes pour la prévision des dégâts exprimée en nombre de tubercules touchés par lot, pour chacun des 3 algorithmes mis en oeuvre (RF1, RF2, XGB). Les variables faisant consensus pour les 3 méthodes sont surlignées en caractères bleus, et en vert lorsque le consensus est limité à 2 méthodes.

Random forest (RF1)	XGBoost (XGB)	Conditional random forest (RF2)
SoL_pH	SoL_pH	ITK_ecart
Meteo_N_Hum_0.31_def_rec	Meteo_N_Hum_0.31_def_rec	INF_Agriotes
Meteo_winter_n.1_temperature	Meteo_winter_n.1_precipitation	SoL_pH
Meteo_spring_n.1_temperature	Parcelle_Surface	Rota_Lab
INF_Agriotes	Meteo_summer_n.1_temperature	Rota_CS
Parcelle_Surface	Rota_CS	Rota_prairie_nb
ITK_Delta_def_rec	Paysage_PJ_nb	SoL_MO
Meteo_summer_n.1_temperature	INF_Agriotes	Meteo_autumn_n.1_humidite_du_sol
SoL_MO	SoL_Sables	
ITK_Delta_plant_def	SoL_MO	
	Meteo_Pluie_irri_def_rec	
	Paysage_CS	
	ITK_ecart.Buttes	
	Rota_Interculture	
	ITK_Delta_plant_def	
	SoL_argiles	
	Meteo_winter_n.1_temperature	
	Rota_CLH	
	Paysage_CH	
	Paysage_CLH	
	Meteo_spring_n.1_temperature	
	ITK_Delta_def_rec	
	Rota_prairie_nb	
	Meteo_Tmoy_Pla_def	
	Meteo_spring_n.1_humidite_du_sol	

3.1.3. Résultats des modèles de prévision de la variable réponse qualitative (présence / absence de dégâts)

L'ajustement des modèles testés sur le jeu de données présente de très bons résultats, exprimés sous forme de valeurs élevées du taux de bon classement des lots (avec ou sans dégâts). Ces valeurs sont 1, 1, 0.88 et 0.78 pour RF1, XGB, RF2, et LOGREG respectivement. La Figure 4 montre les résultats en termes de bon classement des modalités de la variable réponse qualitative (présence/absence de dégâts). Les principaux enseignements mis en évidence sont :

- tous les modèles testés améliorent la prévision du risque de dégâts par rapport à un modèle nul (qui prédirait systématiquement la classe la plus représentée, conduisant ici à un taux de bon classement de 52 %);
- les 4 modèles présentent des performances très similaires, avec une valeur moyenne de taux de bon classement égale à 61 % pour LOGREG, 62 % pour RF2 et XGB, et 64 % pour RF1 ;
- les capacités prédictives, estimées par validation croisée, restent modestes ;



- les modèles les plus flexibles de classification non linéaire (RF1, RF2, XGB) ne se démarquent pas significativement d'un modèle de régression linéaire généralisée (LOGREG).

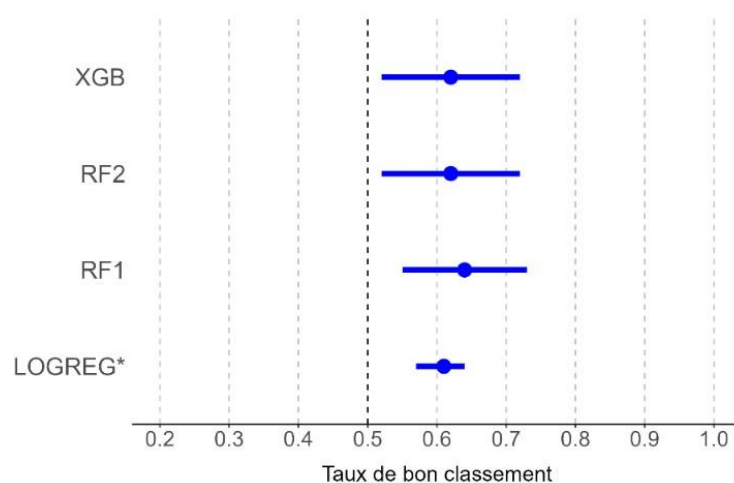


Figure 4 : Taux de bon classement pour un ensemble de lots de validation, i.e. n'ayant pas servi lors de la phase de calibration du modèle de prévision du risque. Symbole : valeur moyenne. Ligne : écart-type, sauf pour la méthode LOGREG (intervalle de confiance à 95 %).

Description de la figure 4

La figure 4 présente les performances de différentes méthodes de classification appliquées à un ensemble de lots de validation. Chaque méthode est représentée individuellement sur un axe horizontal (catégories distinctes), permettant une comparaison directe de leurs résultats.

Pour chaque méthode, un symbole central indique la valeur moyenne du taux de bon classement. Ce symbole constitue la valeur de référence pour comparer les performances entre méthodes.

Autour de cette valeur moyenne, une ligne verticale représente la variabilité des résultats :

- pour la majorité des méthodes, cette ligne correspond à l'écart-type, traduisant la dispersion des performances entre les lots testés ;
- pour la méthode LOGREG, la ligne représente un intervalle de confiance à 95 %, indiquant la plage dans laquelle se situe la valeur moyenne avec un niveau de confiance statistique donné.

Les principales informations visuelles reposent sur :

- la position des symboles (comparaison des performances moyennes entre méthodes),
- la longueur des lignes (niveau de variabilité ou d'incertitude associé à chaque méthode).

La figure permet ainsi d'identifier visuellement les méthodes offrant les meilleures performances moyennes, ainsi que celles dont les résultats sont les plus stables ou, au contraire, les plus variables selon les lots de validation.

3.1.4. Identification et hiérarchisation des variables explicatives prépondérantes pour la variable qualitative (présence / absence de dégâts)

Concernant les dégâts exprimés en termes de présence/absence de tubercules touchés le Tableau 3 dresse le bilan des variables identifiées comme importantes, et de leur hiérarchisation, et souligne en caractères gras (bleus et verts) les variables faisant le plus consensus. Au-delà du niveau d'infestation de la parcelle en larves de taupins du genre *Agriotes* (INF_Agriotes), les principales catégories de variables identifiées comme influentes sur les dégâts sont les caractéristiques pédologiques (le pH), les conditions météorologiques, la surface de la parcelle, le travail du sol dans la rotation (Rota_lab), et dans une moindre mesure le contexte paysager.



Tableau 3 : Synthèse des variables identifiées comme importantes pour la prévision des dégâts exprimés en termes de présence/absence de tubercules touchés dans un lots, pour chacun des 4 algorithmes mis en œuvre (RF1, RF2, XGB, LOGREG). Les variables faisant consensus pour 3 ou 4 méthodes sont surlignées en caractères bleus, et en vert lorsque le consensus est limité à 2 méthodes. *Les seuils de significativité sont inférieurs à 0.05 excepté pour les variables repérées par une astérisque.

Random forest (RF1)	XGBoost (XGB)	Conditional random forest (RF2)	Régression logistique (LOGREG)*
Meteo_Pluie_irri_def_rec	Meteo_Pluie_irri_def_rec	INF_Agriotes	INF_Agriotes
Sol_pH	Meteo_autumn_n.1_temp	Meteo_spring_n.1_temp	Rota_prairie_nb
Parcelle_Surface	Parcelle_Surface	Meteo_Pluie_irri_def_rec	Rota_lab
Paysage_CS	Sol_pH	Rota_Lab	Rota_CLH
Sol_MO	Paysage_CS	Meteo_autumn_n.1_temp	Rota_CS
Sol_Sables	Paysage_PJ_nb	Parcelle_Surface	Sol_pH
	Sol_Sables	Sol_pH	Meteo_summer_n.1_temp
		Histo_prairie_nb	Meteo_spring_n.1_precip
		Meteo_autumn_n.1_hum.sol	Meteo_spring_n.1_temp
		Rota_CLP	Parcelle_Surface*
			Paysage_CLH*
			Meteo_autumn_n.1_precip*
			Meteo_N_Hum_0.31_def_rec
			*

3.1.5. Enseignements des enquêtes en parcelles de producteurs

En préambule, il convient de souligner que la définition de la variable réponse traduisant le niveau de dégâts joue un rôle crucial dans la calibration du modèle de prévision du risque de dégâts. Dans le cadre du projet TAUPIC, le diagnostic du statut d'un tubercule (« touché » ou « non touché ») a été calqué sur la réglementation concernant la certification de plants de pomme de terre, les tubercules étant notés « touchés » dès lors que les symptômes correspondant à 3 galeries étaient observés. La question se pose de considérer alternativement une variable réponse dont la modalité « touché » correspond à la notation d'un symptôme attribué aux taupins, quelle que soit la sévérité observée. Notons que, selon que l'on retienne par exemple 1 ou 3 galeries pour déclarer un tubercule « touché », la distribution de la variable réponse codant les dégâts varie significativement (impacts sur le nombre de lots – et donc de parcelles- avec dégâts, et sur l'intensité des dégâts dans un lot échantillonné sur une parcelle).

Concernant les variables influentes, quelle que soit l'approche mise en œuvre (traitement de la variable réponse de manière quantitative ou qualitative, et type d'analyse : modèles non linéaires de machine learning ou modèle de régression logistique), plusieurs variables explicatives font consensus et sont identifiées comme importantes pour la prévision des dégâts causés par les larves de taupins sur les pommes de terre. Le niveau d'infestation en larves du genre *Agriotes* apparaît comme influent, mais pas systématiquement, contrairement à ce que nous attendions. Réalisée sur la base de quatre tris de sol par parcelle, quelques mois après la récolte du lot de pommes de terre, cette mesure du niveau d'infestation peut en fait être remise en cause, car elle ne reflète pas fidèlement la pression des larves de taupins avant la plantation, de nombreuses larves étant présentes dans les tubercules à la récolte. De plus, sur les 239 parcelles que compte le jeu de données, seules 124 larves du genre *Agriotes* ont été échantillonnées, soit en moyenne 0,51 larve par parcelle : ce signal est peut-être trop faible pour être mis en avant par les modèles. À titre de comparaison, l'outil d'aide à la décision pour la prévision des niveaux d'infestation sur le maïs, développé par l'IGEPP en collaboration avec ARVALIS, s'est appuyé sur l'analyse des résultats d'enquêtes réalisées dans 419 parcelles, dans lesquelles un total de



1 436 larves a été collecté, soit en moyenne 3,4 larves par parcelle. Nous remarquons également que des larves du genre *Agriotes* n'ont été trouvées que dans 43 des 114 parcelles signalées avec des dégâts. Ceci confirme qu'il est encore très difficile de mettre en relation le nombre de larves capturées avec les dégâts à la récolte. Ceci est vrai quelle que soit la méthode d'échantillonnage, comme le montre Horton (2006), qui a constaté que des dégâts significatifs pouvaient être observés alors qu'aucune larve n'avait été trouvée.

Comme prévu, les caractéristiques pédologiques, notamment le pH et la teneur en matière organique, ont un impact important sur les dégâts causés par les taupins sur les cultures de pomme de terre. Ces résultats sont cohérents avec ceux de Poggi *et al.* (2018) et Hermann *et al.* (2013), publiés dans la littérature scientifique. Les analyses statistiques réalisées dans le cadre du projet TAUPIC montrent que la texture du sol est également influente, mais dans une moindre mesure. Ceci peut s'expliquer par la faible variabilité des teneurs en sable et en argile du jeu de données, la quasi-totalité des parcelles étudiées ayant une texture limoneuse.

Comme l'ont montré des travaux récents effectués à l'IGEPP (cf. Poggi *et al.*, 2021), la disposition des éléments du paysage dans l'espace et dans le temps peut impacter l'infestation de la parcelle par les taupins. Dans notre étude, les variables décrivant le contexte paysager sont assez peu représentées. La surface de la parcelle apparaît néanmoins influente, de même que les proportions du contexte paysager local en prairies et cultures sarclées, mais dans une moindre mesure.

Parmi les variables décrivant l'historique de la parcelle, l'historique récent, traduit par les variables descriptives associées à la nature de la rotation (i.e. sur les cinq dernières années), apparaît plus influent sur le niveau de dégâts que l'historique considéré sur une période plus longue (i.e. sur les années N-15 à N-5). Il convient de signaler que dans le jeu de données actuellement analysé, la variable *Histo_prairie_nb* est la moins bien renseignée (8 données manquantes, soit 3,5 % du total). Cette variable n'ayant pu être renseignée via le registre parcellaire graphique (RPG), car les données n'étaient disponibles qu'au niveau de l'ilot jusqu'en 2014 et non de la parcelle, il serait pertinent de prévoir une collecte dès la phase d'enquête lors des projets futurs. En effet, dans l'étude de Roche *et al.* (2023), la présence d'une prairie dans l'historique de la parcelle (15 à 5 ans avant l'enquête sur le terrain) a montré un effet significatif sur l'abondance des larves de taupins. Par ailleurs, nos résultats montrent que le nombre de labours au cours des cinq dernières années influence le niveau de dégâts. Ceci est en accord avec différents travaux publiés dans la littérature scientifique qui montrent que le travail du sol peut exposer les larves à la surface et augmenter leur taux de prédation, et que l'arrêt du labour augmente les densités larvaires (Le Cointe *et al.*, 2023). A noter que les nombres d'années en cultures sarclées et en prairie apparaissent comme des variables explicatives d'importance.

3.2. Etude approfondie des facteurs de risques de dégâts sur un réseau de sites-pilotes

3.2.1. Caractérisation des populations de taupins et l'évolution de l'abondance larvaire

Sur trois années d'étude (2021-2023), 28 sites ont été suivis, mais seulement 17 ont été retenus pour l'analyse finale. Les populations de taupins étaient dominées par des espèces du genre *Agriotes*, avec une prédominance d'*Agriotes sordidus* (espèce à cycle court) dans le sud de l'Aquitaine et en Vendée, d'*Agriotes sputator* dans le Pas-de-Calais et en Haute-Vienne, et un mélange d'espèces (*A. lineatus*, *A. sputator* et *A. obscurus* – espèces à cycles longs) dans l'Aisne et dans le Finistère. Les analyses ont montré une augmentation de la taille des larves des espèces à cycles longs au fur et à mesure du cycle de culture Figure 5.

3.2.2. Evolution de l'abondance larvaire

Les conditions climatiques (température et pluviométrie) du printemps de l'année précédente, pourraient avoir un effet sur l'abondance larvaire observée au début du cycle de la pomme de terre. Une



température élevée au printemps favorise l'abondance larvaire, tandis qu'une pluviométrie élevée a un effet légèrement inhibiteur (Roche *et al*, 2023). Dans le cadre de cette étude, une relation positive ($r = 0.598$; $p > 0.20$) est observée entre l'abondance 30 jours après plantation et la température base 10°C cumulée au printemps (de 15 avril au 15 juin) de l'année précédente. L'effet de la pluviométrie est plus limité.

Les observations réalisées au cours de la période de culture montrent, en fonction des espèces de taupins présentes sur les sites suivis, des résultats intéressants sur l'évolution des tailles de larves dans les 20 premiers centimètres du sol (Figure 5) et l'évolution des niveaux d'abondances larvaires (Figure 6). Pour *Agriotes sordidus*, il n'est pas observé d'augmentation réelle des populations dans la butte en cours du cycle de la culture. En revanche pour les espèces à cycles longs, l'abondance larvaire augmentait régulièrement, la relation entre l'abondance mesurée en date1 (30 jours après plantation - 30JAP) et l'abondance cumulée à la fin du cycle de culture (date 5 130JAP) était significative ($r = 0.861$; $p < 0.01$).

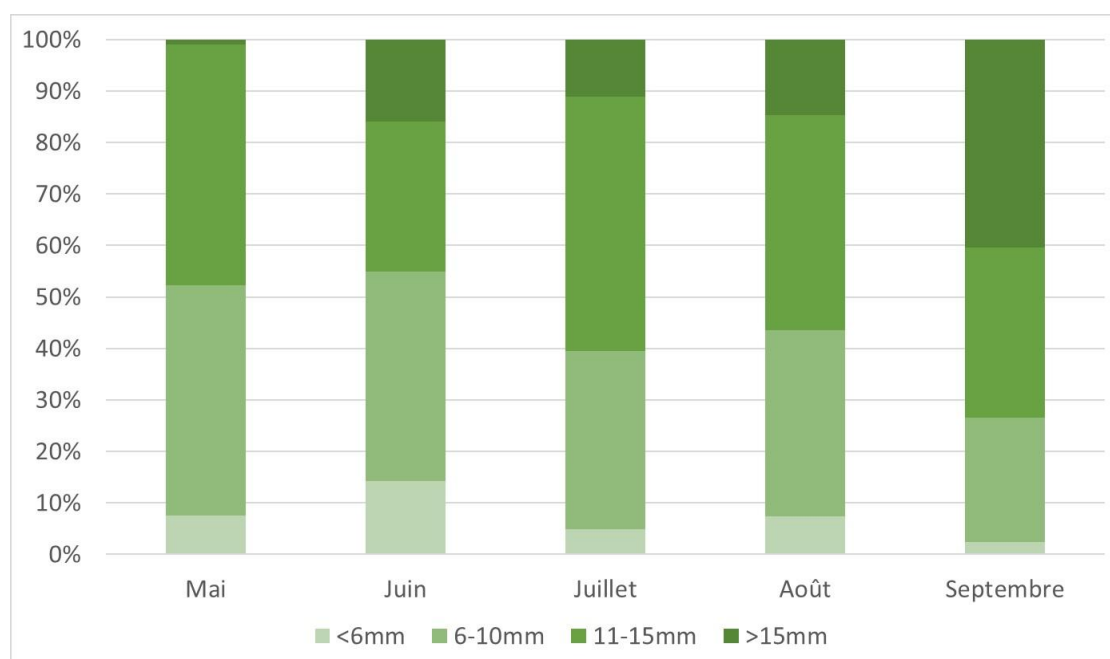


Figure 5 : Cinétique cumulée de capture des larves de taupins à cycles longs par classe de taille sur la durée totale d'observation.

Description de la figure 5

La figure 5 montre une évolution croissante au cours de la période mai – septembre dans l'horizon 0-20 cm du sol des fréquences de larves âgées dont la taille est supérieure à 15 mm susceptible de faire des dégâts dans les tubercules mûres.

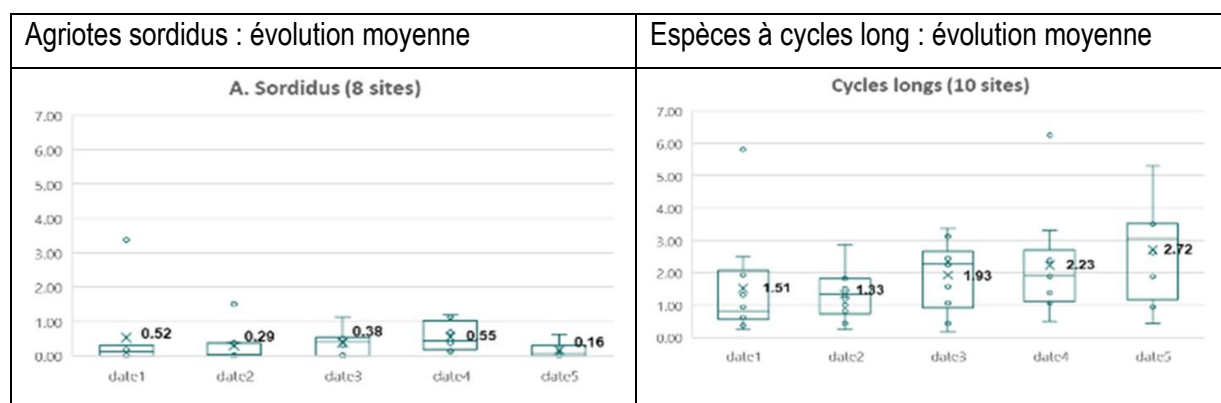
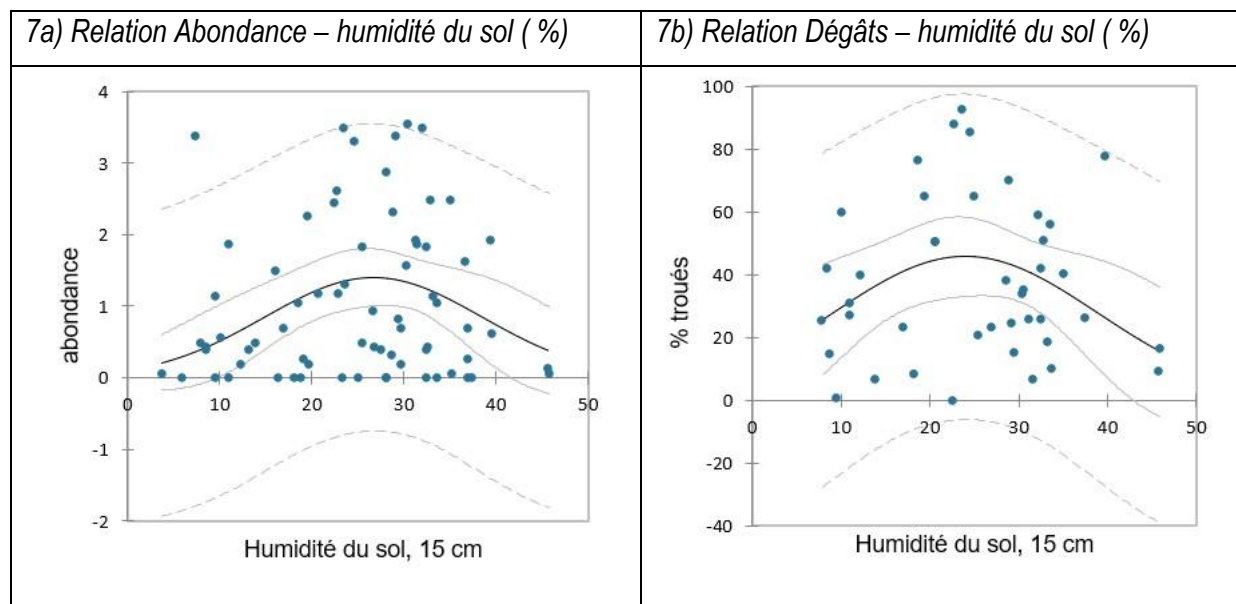


Figure 6 : Evolution de l'abondance larvaire par année et par site (nombre de larves/tri de sol) pour les différentes dates de notations date1 (J+30), date2 (J+60), date3 (J+87), date4 (J+115) et date5 (J+130). Les espèces ayant un long cycle de vie comprennent *Agriotes sputator*, *A. lineatus*, *A. obscurus*.

Pour *Agriotes sordidus*, aucune augmentation réelle des populations dans la butte en cours du cycle de la culture n'est observée (figure 6). En revanche pour les espèces à cycles longs, l'abondance larvaire augmente régulièrement, la relation entre l'abondance mesurée en date1 (30 jours après plantation - 30JAP) et l'abondance cumulée à la fin du cycle de culture (date 5 -130JAP) était significative ($r = 0.861$; $p < 0.01$).

3.2.3. Impact du climat sur l'abondance larvaire et les dégâts de taupins

L'analyse des conditions climatiques en cours de culture n'a pas permis de démontrer de manière claire leur impact sur l'évolution des dégâts ou de l'abondance larvaire. Les conditions de températures dans cette étude n'ont pas eu d'impact sur les deux indicateurs. Seuls les résultats obtenus sur l'humidité du sol sont détaillés (Figures 7).



Figures 7 : Abondance larvaire et dégâts en fonction de l'humidité du sol (%) à 15 cm de profondeur le jour de l'observation (courbes -----95 % Intervalle de confiance, - - - - - 95 % Intervalle de prédiction)



Description de la figure 7

La figure 7 représente la relation entre l'humidité du sol mesurée à 15 cm de profondeur et deux variables observées : l'abondance larvaire et le niveau de dégâts.

L'axe horizontal correspond à l'humidité du sol (en %). L'axe vertical indique, selon les graphiques ou les courbes, soit l'abondance larvaire, soit l'intensité des dégâts. La figure peut comporter une ou deux séries de courbes distinguant ces deux variables.

Pour chaque relation, une courbe principale illustre la tendance moyenne des observations en fonction de l'humidité du sol. Cette courbe met en évidence l'évolution globale (augmentation, diminution ou relation non linéaire) des variables étudiées.

Deux types de bandes ou lignes encadrent cette courbe :

- des lignes continues délimitent l'intervalle de confiance à 95 %, représentant la zone dans laquelle la valeur moyenne estimée est susceptible de se situer ;
- des lignes en tirets délimitent l'intervalle de prédiction à 95 %, plus large, correspondant à la dispersion attendue des observations individuelles autour de la courbe moyenne.

La largeur de ces intervalles varie le long de l'axe des abscisses, traduisant des niveaux d'incertitude différents selon les valeurs d'humidité du sol.

L'ensemble permet d'apprécier visuellement :

- la forme de la relation entre humidité du sol et variables biologiques,
- le niveau d'incertitude associé à l'estimation de cette relation,
- la variabilité attendue des observations individuelles.

La relation entre humidité du sol à 15 cm de profondeur et abondance larvaire (figure 7a) **n'est pas linéaire** (elle est en forme de cloche). Lorsque l'humidité est comprise entre 15 et 30 %, les niveaux d'abondance larvaire sont les plus élevés en deçà et au-delà l'abondance larvaire est plus faible.

La relation entre humidité du sol à 15 cm de profondeur et les dégâts sur tubercules (figure 7b) n'est pas linéaire non plus, elle suit l'évolution de la présence de larves dans l'horizon du sol. Les niveaux de dégâts sont élevés entre 20 et 30 % d'humidité du sol, et reste plus faibles dans des sols plus secs ou plus humides.

3.2.4. Évolution des dégâts sur les tubercules

Les dégâts mesurés sur les tubercules étaient importants dès 87 jours après plantation et évoluaient peu après la date de défanage (Figures 8).

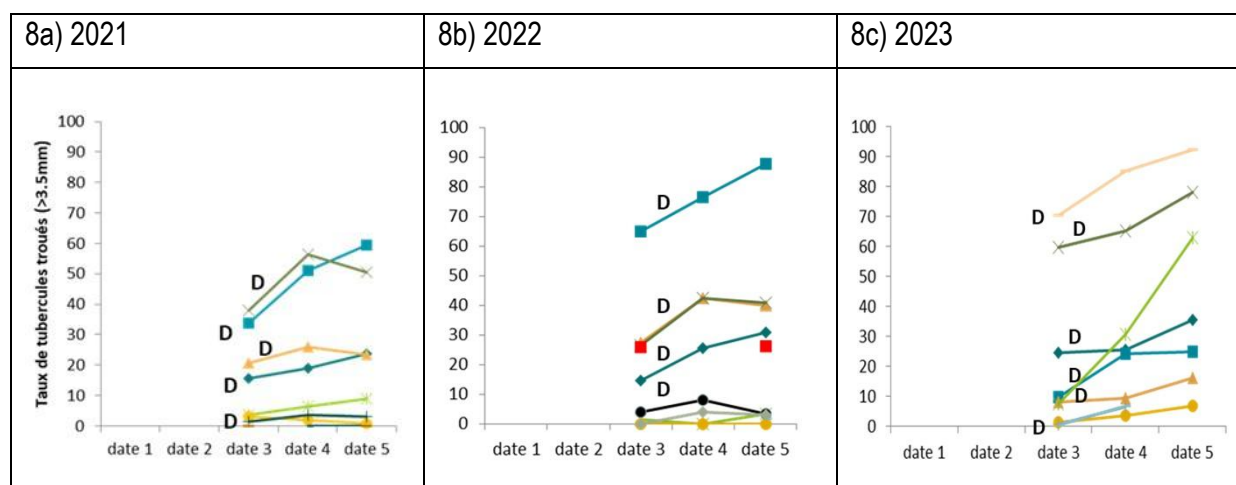


Figure 8 : Evolution des dégâts par site/année (fréquence de tubercules troués, %), D = positionnement du défanage par rapport à la date d'observation date1 (J+30), date2 (J+60), date3 (J+87), date4 (J+115) et date5 (J+130) pour les années 8a) 2021, 8b) 2022 et 8c) 2023



Description de la figure 8

La figure 8 est composée de trois sous-parties correspondant à trois années distinctes (2021, 2022 et 2023). Dans chaque sous-partie, plusieurs séries de données illustrent l'évolution des dégâts pour différents sites expérimentaux.

L'axe horizontal représente une succession de dates d'observation exprimées en jours après une date de référence : J+30, J+60, J+87, J+115 et J+130. Ces points correspondent à des moments clés du suivi au cours de la campagne. L'axe vertical indique la fréquence de tubercules présentant des dégâts, exprimée en pourcentage.

Pour chaque site, une courbe ou une série de points relie les valeurs observées aux différentes dates, permettant de visualiser l'évolution temporelle des dégâts. Les sites sont distingués par des couleurs, des symboles ou des styles de lignes différents.

Un repère spécifique, noté « D », indique pour chaque série le positionnement du défanage par rapport aux dates d'observation. Ce repère permet de situer visuellement cet événement dans la chronologie des mesures.

Les principales informations accessibles visuellement sont :

- la progression des dégâts au fil du temps pour chaque site ;
- les différences d'intensité des dégâts entre sites à une même date ;
- les écarts entre années, visibles en comparant les trois sous-figures ;
- la position relative du défanage par rapport à l'évolution des dégâts.

La figure permet ainsi d'identifier des tendances temporelles (augmentation, stabilisation ou variation des dégâts), de comparer les dynamiques entre sites et d'apprécier les variations interannuelles.

Les figures 8 (a, b et c) ne montrent pas de manière flagrante l'effet du défanage sur l'augmentation des dégâts. Les dégâts sont souvent élevés avant le défanage qui a généralement eu lieu après la date 3 (87 jours après plantation). Une forte relation ($r = 0.98$) entre les dégâts à la date 3 (87 JAP) et les dégâts finaux (130 JAP) est observé (non montré ici).

3.2.5. Relation entre abondance larvaire et dégâts

Aucune relation forte n'a été trouvée entre l'abondance larvaire et les dégâts au cours du cycle de la culture, bien que des tendances plus marquées aient été observées entre l'abondance cumulée à date-5 et les dégâts à la même date (Figure 9). Cela suggère que l'abondance larvaire en début de cycle de culture de pomme de terre qui est très corrélée à l'abondance larvaire en fin de cycle pourrait prédire les dégâts à la récolte.

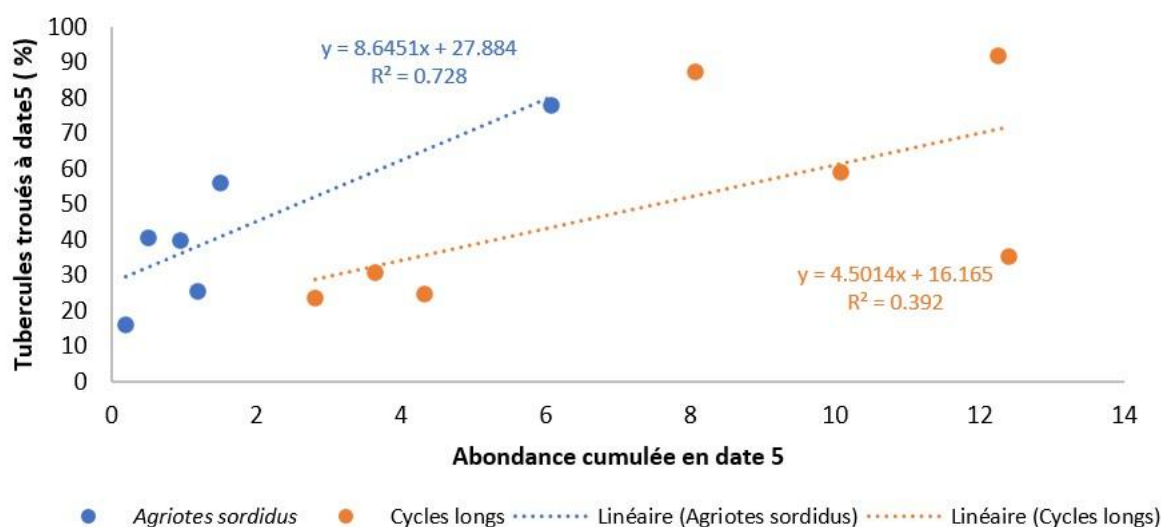


Figure 9 : Relation entre abondance larvaire et dégâts en cumulé à date 5 (J+130) par type d'espèces. Les espèces ayant un long cycle de vie comprennent A. sputator, A. lineatus, A. obscurus



Description de la figure 9

La figure présente la relation entre l'abondance larvaire et le niveau de dégâts cumulés mesurés à la date J+130 (date 5), en distinguant les observations selon le type d'espèces.

L'axe horizontal correspond à l'abondance larvaire, exprimée sous forme quantitative (nombre ou densité de larves). L'axe vertical indique le niveau de dégâts cumulés, mesuré comme la proportion ou le nombre de tubercules endommagés.

Les données sont représentées sous forme de points, chaque point correspondant à une observation (site ou parcelle). Les points sont différenciés selon le type d'espèces, généralement par des codes visuels distincts (couleurs ou symboles).

Deux groupes d'espèces sont distingués :

- les espèces à cycle de vie long (incluant *Agriotes sputator*, *A. lineatus* et *A. obscurus*) ;
- les autres espèces (par exemple à cycle plus court), représentées séparément.

Une ou plusieurs courbes de tendance peuvent être associées à ces groupes, illustrant la relation moyenne entre abondance larvaire et dégâts. Ces courbes permettent d'apprécier la forme de la relation (linéaire ou non linéaire) et les différences éventuelles entre types d'espèces.

Les éléments visuels permettent de percevoir :

- la corrélation entre abondance larvaire et niveau de dégâts ;
- les différences de relation selon le type d'espèces ;
- la dispersion des observations autour de la tendance moyenne, traduisant la variabilité des situations.

Dans l'ensemble, la figure met en évidence le lien entre pression larvaire et intensité des dégâts, ainsi que le rôle du type d'espèces dans cette relation.

La figure 9 montre une belle relation entre l'abondance larvaire et les dégâts à la date 5 soit 130 jours après plantation quelles que soient les espèces de taupins considérées et ce malgré des effectifs plutôt faibles.

Pour conclure, les données collectées sur trois ans apportent des éléments sur le comportement des taupins, mais restent insuffisantes pour identifier précisément l'influence du climat sur leur abondance et les dégâts.

L'abondance mesurée en début de culture permet toutefois d'anticiper celle en fin de cycle, et semble liée aux conditions climatiques du printemps précédent (température favorable, pluviométrie défavorable). Les dégâts en fin de culture sont également liés à l'abondance des larves. Le défanage n'a pas montré d'effet clair, des dégâts étant déjà présents avant son intervention. Ces résultats suggèrent d'adapter les stratégies de protection tout au long du cycle, et pas uniquement à la plantation.

3.2.6. Etudes complémentaires sur les outils d'étude de la diversité des populations de taupins

Sur les deux années d'enquêtes, la moitié des larves de taupins récupérées appartiennent au genre *Agriotes*. Sur les tris de sol effectués en avril sur les parcelles enquêtées, une moitié des larves n'appartient pas au genre *Agriotes*. Ces genres non-*Agriotes* sont à l'inverse peu présents sur les prélèvements en lien avec les dégâts (larves prélevées durant la culture de la pomme de terre ou en frigos) où le genre *Agriotes* prédomine. La signification biologique de ces espèces / genres de taupins identifiés reste à préciser.

L'analyse ADN barcod a permis d'identifier les échantillons non-*Agriotes* des parcelles enquêtées comme appartenant principalement à l'espèce *Athous bicolor* (41 % des non-*Agriotes* tout secteur confondu), *Adrastus rachiifer* (35 %), *Hemicrepidius hirtus* (4 %) et *H. niger* (2 %) et *Athous campyloides* (18 %). Au niveau régional, les 3 espèces majoritaires non-*Agriotes* ont été identifiées sur les 2 secteurs de Bretagne analysés, en région Centre et Sud, ainsi que sur le secteur Nord, sauf pour *Athous bicolor*.



non détecté dans cette région, mais le faible échantillonnage peut expliquer cette absence de détection (Figure 10).

En cours de culture de pomme de terre, des prélèvements réalisés sur 3 parcelles expérimentales (Le Faou, Sizun, Saint-Laurent-les-Églises-87) ont montré qu'en moyenne 87 % des individus prélevés ($N = 222$) durant la période de culture de la pomme de terre appartenaient au genre *Agriotes*, pour seulement 13 % de populations non-*Agriotes*. Les non-*Agriotes* prélevés sur le site le Faou correspondaient principalement à *Athous campyloides*, tandis qu'à Sizun les non-*Agriotes* étaient principalement identifiés comme *Adrastus rachifer*. Sur le site de Saint-Laurent-les-Églises, aucun échantillon non-*Agriotes* n'a été détecté. Sur les réseaux des parcelles en pomme de terre caractérisé, les identifications morphologiques ont indiqué aussi une forte majorité d'*Agriotes*.

Les identifications réalisées sur plus de 300 individus de taupins prélevés par Bretagne-Plants Innovation chez des producteurs de plants après récolte de pomme de terre, dans des bennes et dans des bâtiments de stockage, ont révélé aussi une prépondérance d'*Agriotes* (> 95 % *A. lineatus* et *A. sputator*), et très peu de *H. hirtus* (> 5 %).

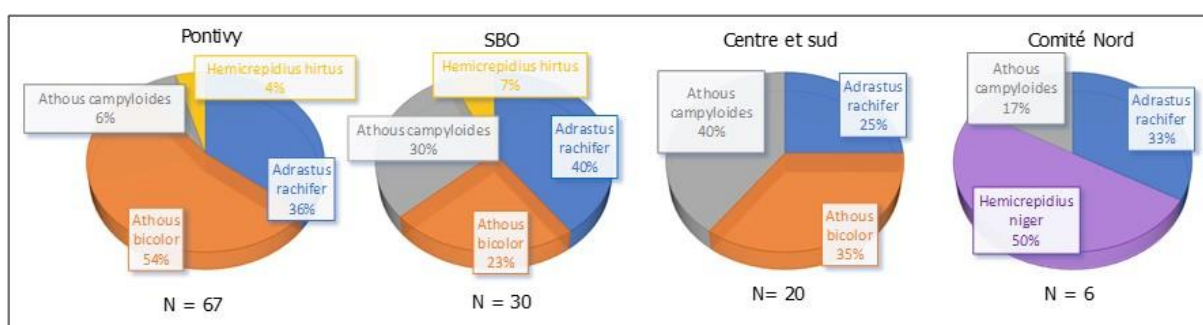


Figure 10 : Répartition des espèces de taupins non *Agriotes* caractérisé à l'aide d'ADN barcoding dans les tris de sol effectués au printemps sur les 2 années d'enquêtes (2021 et 2022)

Description de la figure 10

La figure est un diagramme circulaire représentant la distribution des espèces de taupins n'appartenant pas au genre *Agriotes*. Le cercle est divisé en segments, chacun correspondant à une espèce distincte identifiée dans les échantillons.

La taille de chaque segment est proportionnelle à la fréquence relative de l'espèce dans l'ensemble des individus analysés. Les segments sont différenciés visuellement par des couleurs ou des motifs, permettant de distinguer les différentes espèces.

L'organisation visuelle met en évidence :

- un nombre variable de segments correspondant au niveau de diversité spécifique observé ;
- des segments de tailles contrastées, reflétant des différences d'abondance entre espèces.

Certaines espèces occupent une part importante du diagramme, indiquant une présence dominante au sein des échantillons, tandis que d'autres sont représentées par des segments plus réduits, traduisant une occurrence plus faible.

L'ensemble du cercle représente la totalité des individus non-*Agriotes* identifiés sur les deux années d'étude. La figure ne détaille pas la répartition annuelle mais propose une vision globale cumulée.

Les informations accessibles visuellement sont :

- la richesse spécifique des taupins non-*Agriotes*,
- la contribution relative de chaque espèce à l'ensemble des observations,
- le degré de dominance ou d'équilibre entre espèces au sein du groupe étudié.



3.3. Développement de solutions innovantes et durables pour la prévention et la maîtrise des dégâts

3.3.1. Protéger les tubercules de pommes de terre, en évitant ou esquivant les attaques de taupins

Pour les essais en micro-parcelles, les taux de dégâts sur les pommes de terre observés dans les témoins variaient fortement (de moins de 5 % à plus de 90 % de tubercules troués). Parmi les solutions testées, les champignons entomopathogènes *Metarhizium anisopliae* et *Metarhizium brunneum* ont montré une efficacité moyenne de 30 à 41 %, améliorée par des doses plus élevées. La solution commerciale Attracap®, basée sur un mécanisme "Attract & Kill", a réduit les attaques de 37 à 75 % en conditions modérées. Les souches de *Beauveria bassiana* (ATCC74040, NPP111B005, PPRI5339) ont présenté des efficacités variables, de 16 à 47 % selon la dose et le mode d'application. Les nématodes entomopathogènes n'ont pas encore montré de résultats concluants faute de conditions expérimentales favorables.

Concernant les substances naturelles, des extraits de piments et de moutarde ont atteint 32 % d'efficacité, tandis que des extraits d'ail ont permis des réductions de 18 à 28 % des dégâts. Les stratégies d'appâts à base de blé ou d'orge ont donné des résultats inégaux : jusqu'à 29 % d'efficacité avec des semences traitées à la cyperméthrine, mais des effets moindres sans traitement. Enfin, certains amendements (chitine, algues, bore, cyanamide calcique) ont montré sur peu d'essais des effets limités (7 à 27 %).

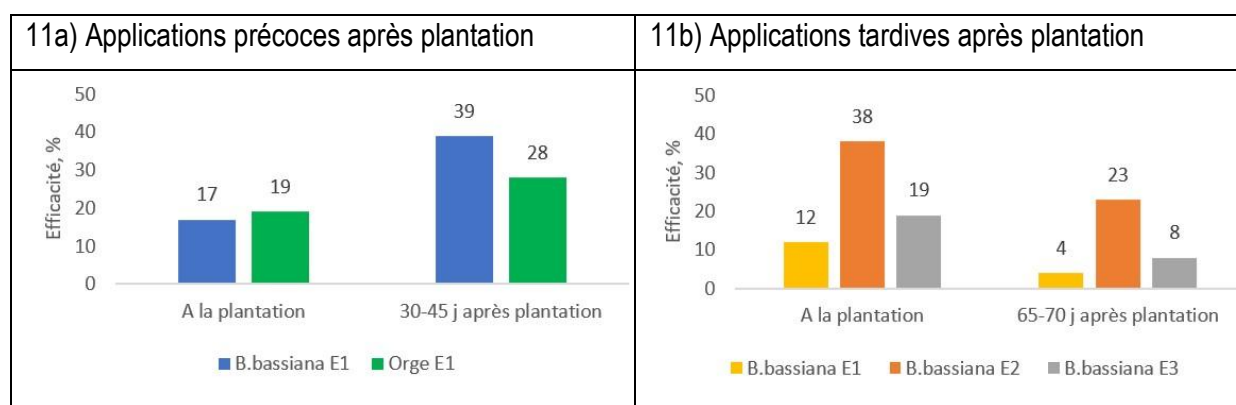


Figure 11 : Efficacité de diverses solutions de protection selon la date d'application

La figure 11a montre de meilleurs résultats lorsque les applications 30 à 45 jours après plantation d'orge traitée (+9 points d'efficacité) ou de *Beauveria bassiana* ATCC74040 (+21 points). Dans la figure 11b, l'application des traitements à base de *Beauveria bassiana* réalisée 65-70 jours post plantation engendre des résultats très inférieurs à ceux réalisés à la plantation (de -8 à -15 points). Ces résultats confirment la nécessité de prendre en compte le positionnement temporel des solutions pour une efficacité optimale.

3.3.2. Appétence de la plante cible – sensibilité variétale

Essais au champ : Les résultats ont montré une hiérarchisation nette des variétés : les plus sensibles (ex. Monalisa) présentaient environ trois fois plus de dégâts que les plus tolérantes (ex. Charlotte). Une variété intermédiaire, Spunta, montrait de nombreuses morsures mais peu de galeries profondes — les larves semblaient attirées mais peu enclines à s'y nourrir durablement. Ces observations confirment les appréciations empiriques des experts et suggèrent une différence d'appétences entre variétés (Figure 12).

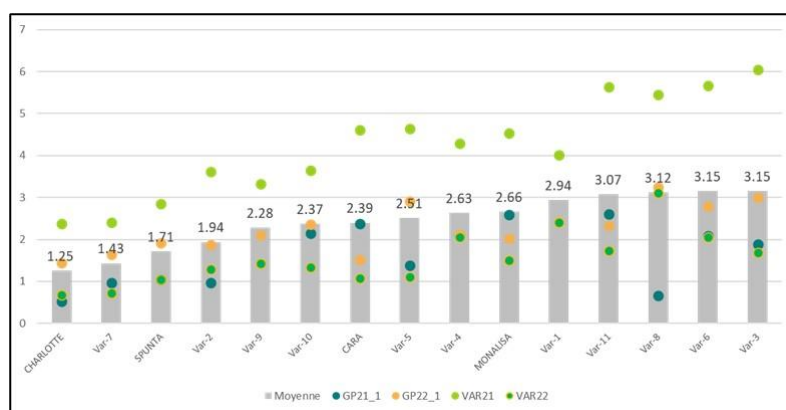


Figure 12 : Essais d'évaluation de variété de pommes de terre au champ – synthèse de 4 essais 2021-2022. Indice de gravité prenant en compte les morsures et dégâts profonds. Les points ronds et colorés représentent les expériences individuelles. Les barres grises représentent les moyennes de 4 expériences distinctes pour chacune des variétés testées dans six blocs randomisés.

Essais au laboratoire : 65 composés organiques volatils (COV) ont été identifiés à deux stades de développement des tubercules (78 et 124 jours après plantation). Les analyses ont montré des différences de profils odorants entre variétés uniquement au stade le plus avancé, mais l'effet du stade physiologique restait plus marqué que celui de la variété. Les tubercules au stade le plus avancé, plus sensibles aux attaques de taupins, présentaient un profil plus diversifié que ceux du stade plus précoce. Aucune différence qualitative n'a été observée entre variétés, mais certaines différences quantitatives ont été mises en évidence. Les tubercules Charlotte émettaient moins de 2-undécanone et de benzaldéhyde que Monalisa, tandis que Monalisa produisait davantage de 6-méthyl-5-hepten-2-one et de 2-butoxyéthanol. À l'inverse, Charlotte émettait davantage de nonadécane.

Trois composés majeurs (1-Octen-3-ol, Nonanal, 2-Phenoxyéthanol) ont ensuite été testés séparément : un seul, à forte concentration, a montré un pouvoir attractif significatif ($p=0.027$). Cependant, la variabilité des lots entre années rend difficile toute conclusion définitive. Ces travaux se poursuivent, notamment sur d'autres signaux potentiels (dioxyde de carbone, glycoalcaloïdes, sucres réducteurs,...).

Lors des études en olfactomètre à double voie, les larves (*A. lineatus* et *A. obscurus*) se sont orientées préférentiellement vers la variété Spunta lors des duels Charlotte/Spunta et Monalisa/Spunta, confirmant son attractivité élevée. Cependant, l'évaluation de leur nuisibilité (consommation réelle sur tubercule) a montré une perte de poids significative uniquement pour les tubercules de Monalisa, indiquant que cette variété est non seulement attractive mais aussi consommée, tandis que Charlotte et Spunta subissent peu de dégâts profonds. En parallèle, les taupins nourris avec Monalisa présentaient une taille significativement supérieure à ceux nourris avec Spunta ou Charlotte, confirmant le rôle favorable de cette variété sensible dans le développement du ravageur, observations en lien avec les dégâts en parcelle d'essais.

3.3.3. Mieux comprendre et limiter les dégâts de taupins : rôle du climat, des cultures et du biocontrôle

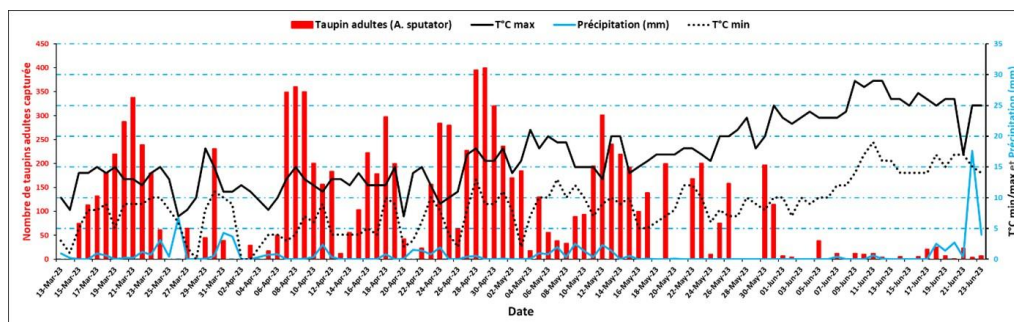
Les suivis quotidiens (mars à juin) sur 3 ans ont montré que l'activité des adultes est favorisée par la hausse des températures lors de journées humides après une période de nuits froides (Figure 13). Les espèces dominantes détectées dans les zones des études (Pas-de-Calais) sont *A. sputator*, *A. obscurus* et *A. gallicus*.

Concernant les stratégies préventives combinant le *Metarhizium brunneum* avec des cultures / couverts précédant les pommes de terre, les résultats montrent une réduction notable des dégâts sur la culture



de pomme de terre suivante. Toutefois, certaines cultures précédant la pomme de terre (maïs, blé, prairies) augmentent les risques de dégâts, sauf en présence de *Metarhizium brunneum* appliqués en préventif.

Les expériences visant à démontrer la ponte des taupins et le développement des juvéniles éclos sur différents couverts végétaux ont montré que certaines espèces (sarrasin et moutarde brune) réduisaient la ponte des adultes et/ou augmentaient la mortalité des juvéniles de taupins, par rapport au ray-grass (témoin) (Figure 14). Ces observations devront toutefois être vérifiées au champ avec des dispositifs adaptés.





difficulté à relier les comptages larvaires aux niveaux de dommages. Cette limite appelle à une amélioration des méthodes d'échantillonnage et à l'intégration de variables indirectes (paysage, rotation, climat) dans les modèles prédictifs, comme proposé par Roche *et al.* (2023).

Concernant les solutions de biocontrôle, les essais en micro-parcelles montrent des efficacités variables (0–45 %), dépendantes des contextes et du positionnement des applications. Les champignons entomopathogènes (*Metarhizium brunneum*, *Beauveria bassiana*) apparaissent prometteurs, notamment en association avec des couverts végétaux, mais leur performance reste insuffisante en cas d'infestations fortes, ce qui corrobore les conclusions de Poggi *et al.* (2021). Les substances naturelles et les stratégies appâts présentent des effets limités et nécessitent des optimisations (choix des formulations, timing d'application).

La sensibilité variétale constitue un levier prometteur : les essais au champ et en laboratoire confirment des différences significatives entre variétés, avec *Monalisa* particulièrement vulnérable et *Charlotte* plus tolérante. Ces observations sont cohérentes avec les hypothèses sur l'influence des composés organiques volatils (COV), bien que nos analyses n'aient pas permis d'établir un lien direct, suggérant l'implication d'autres facteurs biochimiques (CO₂, glycoalcaloïdes) (Todd *et al.*, 2012).

Enfin, les études en conditions contrôlées apportent des éléments nouveaux sur la biologie des taupins et ouvrent des perspectives pour des stratégies préventives basées sur la perturbation de la ponte ou la réduction de la survie larvaire via des couverts végétaux spécifiques.

5. Conclusion

Le projet TAUPIC (2020–2024) a permis de :

- hiérarchiser les facteurs de risque et développer des modèles explicatifs intégrant des variables pédoclimatiques et culturelles ;
- caractériser la diversité spécifique des taupins et mettre au point des outils innovants (barcoding ADN, élevage, olfactométrie) pour la recherche et l'épidémiosurveillance ;
- évaluer des leviers alternatifs (biocontrôle, variétés, couverts végétaux) dont certains montrent un potentiel intéressant mais nécessitent des optimisations pour une efficacité robuste ;
- confirmer la sensibilité variétale de pomme de terre comme axe stratégique pour la sélection et la conception de systèmes de culture moins attractifs.

Ces résultats constituent un socle pour la protection intégrée des cultures de pomme de terre contre les taupins. Toutefois, la variabilité spatio-temporelle des infestations et la complexité des interactions sol-climat-culture imposent de poursuivre les travaux pour :

- améliorer la précision des modèles prédictifs ;
- optimiser les protocoles d'application des biocontrôles et leur intégration dans des stratégies combinées ;
- approfondir la compréhension des mécanismes d'attractivité variétale pour orienter la sélection.

En somme, TAUPIC ouvre la voie à une gestion durable et multifactorielle des taupins, conciliant efficacité agronomique et respect des contraintes environnementales. Ces travaux feront l'objet d'un approfondissement et d'une valorisation dans le cadre du projet PARSADA-TaupiFAST2 (2025 – 2029), garantissant la continuité des recherches et le développement d'outils innovants pour la protection intégrée des cultures.



6. Recommandations

À la lumière des résultats du projet TAUPIC et des limites identifiées, plusieurs recommandations peuvent être formulées pour la recherche, le développement et la pratique agricole :

6.1. Amélioration des outils de prévision

- Renforcer les modèles prédictifs en intégrant des variables paysagères, des données climatiques fines et des indicateurs indirects de risque (historique cultural, rotations).
- Standardiser les méthodes d'échantillonnage larvaire pour obtenir des signaux plus robustes, en s'inspirant des approches développées pour le maïs (Roche *et al.*, 2023).

6.2. Optimisation des stratégies de biocontrôle

- Tester des applications pluriannuelles des champignons entomopathogènes (*Metarhizium*, *Beauveria*) et leur association avec des couverts végétaux et/ou amendements.
- Affiner le positionnement temporel des traitements pour maximiser l'efficacité.
- Poursuivre les recherches sur les nématodes entomopathogènes et leurs extraits bactériens pour améliorer leur performance.

6.3. Gestion agronomique et rotation

- Limiter les prairies récentes dans les rotations avant pomme de terre ou prévoir des leviers compensatoires (travail du sol, couverts).
- Favoriser des pratiques culturales réduisant la survie larvaire, comme le labour stratégique ou l'utilisation de plantes de service à effet répulsif en bandes tampons.

6.4. Sélection variétale et attractivité

- Intégrer la sensibilité variétale dans les choix de plantation : privilégier les variétés tolérantes (*Charlotte*) dans les zones à risque.
- Approfondir l'étude des composés organiques volatils (COV) et autres signaux chimiques pour orienter la sélection vers des variétés moins attractives.

6.5. Approche intégrée et formation

- Combiner plusieurs leviers (biocontrôle, variétés, pratiques culturales) dans des stratégies intégrées adaptées au contexte local.
- Renforcer la formation des producteurs et techniciens sur la reconnaissance des facteurs de risque et l'utilisation des outils de prévision.

Ethique

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 :

B. NGALA : <https://orcid.org/0000-0002-1790-591X>

S. POGGI : <https://orcid.org/0000-0003-3051-5091>

R. LE COINTE : <https://orcid.org/0000-0001-8130-7538>

Jérémy CIGNA : <https://orcid.org/0000-0002-1219-7096>

Yves Le HINGRAT : <https://orcid.org/0000-0002-26212541>

Contributions des auteurs

Bruno NGALA et Florian MANCEAU : Pilotage des essais en condition contrôlée.

Ronan Le Cointe et Sylvain POGGI : Pilotage d'enquête parcellaires et analyses de donnée issue des enquêtes

Philippe LARROUDÉ : Pilotage des essais lutte contre les taupins aux champs, suivi du réseau des parcelles et analyses

Jérémy CIGNA : Caractérisation de la diversité de taupins à l'aide d'un outil moléculaire

Amandine MOLLET : Suivi d'un réseau des 4 parcelles en pomme de terre

Philippe DOLO : Caractérisations de la sensibilité variétale de pommes de terre aux champs

François VERHEGGEN : Caractérisations de composés organique volatiles (COVs) dans les tubercules de pomme de terre

Yves Le HINGRAT : Pilotage du projet TAUPIC

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

Remerciements aux partenaires et personnes impliquées dans la mise en place et le suivi des travaux, aux techniciens et producteurs ayant contribué aux enquêtes ou à l'évaluation de solutions.

Déclaration de soutien financier

Ce projet a bénéficié du concours financier du ministère de l'agriculture via le compte d'affectation spéciale « Développement agricole et rural » dans le cadre de l'appel à projets Recherche Technologique 2020.

Références bibliographiques

Chacon-Hurtado A, Ruhland F., Boullis A., Verheggen F. (2023). Potato cultivar susceptibility to wireworms: feeding behaviour, fitness and semiochemical-based host selection *Entomologia Generalis*, Volume 43, Issue 6, 1193–1201. <https://doi.org/10.1127/entomologia/2023/2168>



Hermann, A., Brunner, N., Hann, P., Wrbka, T., Kromp, B., & B. (2013). Correlations between wireworm damages in potato fields and landscape structure at different scales. *Journal of Pest Science*, 86, 41–51. <https://doi.org/10.1007/s10340-012-0444-z>

Hebert, P. D., Cywinska, A., Ball, S. L., & deWaard, J. R. (2003). Biological identifications through DNA barcodes. *Proceedings. Biological sciences*, 270(1512), 313–321. <https://doi.org/10.1098/rspb.2002.2218> Horton, D. R. (2006). Quantitative relationship between potato tuber damage and counts of Pacific coast wireworm (Coleoptera: Elateridae) in baits: Seasonal effects. *Journal of the Entomological Society of British Columbia*, 103, 37–48.

Kuhar, T. P., & Speese, J. (2009). *Scouting for wireworms before planting vegetables*. Virginia Cooperative Extension, Virginia State University. (Document 2906-1329).

Larroudé, P. (2015). Espèces de taupins : Une cartographie est désormais disponible. *Perspectives Agricoles*, 427, 46–49.

Le Cointe, R., Larroudé, P., Thibord, J.-B., Lehmus, J., Ogier, J.-C., Mahéo, F., Malet, M., Dolo, P., Ngala, B., Plantegenest, M., Joubert, S., Mollet, A., & Poggi, S. (2023a). État des lieux des connaissances sur les taupins (Coléoptères : Elatérédés) et des stratégies alternatives aux pesticides pour la gestion des dégâts. *Innovations Agronomiques*, 89, 78–90. <https://doi.org/10.17180/ciaq-2023-vol89-art07>

Le Cointe, R., Plantegenest, M., & Poggi, S. (2023b). Wireworm management in conservation agriculture. *Arthropod-Plant Interactions*, 17, 421–427. <https://doi.org/10.1007/s11829-023-09966-9>

Poggi, S., Le Cointe, R., Lehmus, J., Plantegenest, M., & Furlan, L. (2021a). Alternative strategies for controlling wireworms in field crops: A review. *Agriculture*, 11, 436. <https://doi.org/10.3390/agriculture11050436>

Mahéo, F., Lehmus, J., Larroudé, P., Le Cointe, R., (2020). Un outil moléculaire simple et abordable pour identifier les larves de taupins du genre Agriotes. *Le Cahier des Techniques de l'Inra* 2020 102.

Poggi, S., Le Cointe, R., Riou, J.-B., Larroudé, P., Thibord, J.-B., & Plantegenest, M. (2018). Relative influence of climate and agroenvironmental factors on wireworm damage risk in maize crops. *Journal of Pest Science*, 91, 585–599. <https://doi.org/10.1007/s10340-018-0951-7>

Poggi, S., Sergent, M., Mammeri, Y., Plantegenest, M., Le Cointe, R., & Bourhis, Y. (2021b). Dynamic role of grasslands as sources of soil-dwelling insect pests: New insights from *in silico* experiments for pest management strategies. *Ecological Modelling*, 440, 109378. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2020.109378>

Roche, J., Plantegenest, M., Larroudé, P., Thibord, J.-B., Le Ronan, C., & Poggi, S. (2023). A decision support system based on Bayesian modelling for pest management: Application to wireworm risk assessment in maize fields. *Smart Agricultural Technology*, 4, 100162. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100162>

Kabaluk, T. J., Young, B. M. S., Doreau, A. M., & Mackovic, C. R. (2012). A simple computation-based approach for measuring the carbon dioxide production of respiring biological samples in passively ventilated chambers. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 145, 175–180. <https://doi.org/10.1111/j.1570-7458.2012.01324.x>

Pour citer cet article : Bruno NGALA, Ronan LE COINTE, Philippe LARROUDÉ, Florian MANCEAU, Jérémy CIGNA, Sylvain POGGI, Amandine MOLLET, Philippe DOLO, François VERHEGGEN & Yves LE HINGRAT, 2026 - Prévion du risque de dégâts causés par les taupins sur les pommes de terre, et stratégies de lutte durables. *Innovations Agronomiques* 112, <https://doi.org/10.17180/10.17180/ciaq-2026-vol112-art10>



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.