



## Rapport final

# EFFET DES APPLICATIONS FOLIAIRES D'AZOTE, BORE ET CALCIUM SUR LES MALADIES DU POMMIER EN PRODUCTION FRUITIÈRE INTÉGRÉE

Date : 31 mai 2024

Responsable scientifique : Vincent Philion, M. Sc.

Ce rapport a été produit à l'attention de : Programmation de recherche en phytoprotection  
dans la pomme

MAPAQ-IRDA

## RÉSUMÉ DU PROJET

L'impact de l'azote, du bore et du calcium sur les maladies des pommiers a fait l'objet de nombreuses études qui ont été résumées dans une fiche du guide de production fruitière intégrée<sup>1</sup>. L'objectif de notre projet était de valider en conditions commerciales que le calendrier des apports foliaires proposé dans la fiche PFI peut contribuer à réduire les maladies du pommier, sans avoir d'impact négatif sur la production. Pour ce faire, nous avons comparé l'effet des applications foliaires d'azote (urée), de calcium (chlorure de calcium) et de bore et leur combinaison sur les maladies usuelles du pommier (tavelure, feu bactérien), mais aussi sur différents paramètres de production. Les traitements mis en place avaient aussi pour but de comparer l'effet de deux sources de calcium, la dose de bore et l'impact du moment de l'application de l'azote.

Le projet a permis de confirmer que l'effet fertilisant des apports foliaires est mesurable et qu'il a un impact sur les maladies du pommier. Comme les interactions entre matières fertilisantes sont rarement considérées, le projet a permis d'identifier que l'effet conjoint des engrais n'est pas toujours additif. Le programme PFI proposé actuellement s'est avéré le plus utile. Les objectifs secondaires du projet quant à la formulation de calcium, de la quantité de bore et le fractionnement de l'azote ont permis de dégager des recommandations : le chlorure de calcium s'est avéré plus efficace que le Poma, les doses élevées de bore et les traitements tardifs d'urée ont eu des impacts négatifs.

## INTRODUCTION

Pour maximiser la production de pommes de qualité, des apports de différents minéraux sont requis. Une fertilisation inadéquate (excessive ou déficitaire) peut aussi avoir des impacts négatifs sur la production et nuire à l'arbre. Par exemple, les excès d'azote nuisent à la coloration et à la fermeté des fruits. La fertilisation a aussi des impacts sur les ravageurs du pommier, le plus connu étant l'apparition des pucerons qui sont favorisés par les apports trop importants en azote. L'effet de la fertilisation sur les maladies du pommier (tavelure, feu bactérien, blanc, pourriture d'entrepôts) est aussi rapporté, quoique moins bien documenté. Selon les modalités d'application, la fertilisation peut soit inhiber ou aggraver les problèmes de maladie. Par exemple, quand l'azote est appliqué pour favoriser la croissance, la littérature rapporte que la tavelure et le feu bactérien sont aggravés. A l'opposé, l'urée appliquée après la récolte ou très tôt au printemps, sur la litière de feuille, inhibe la tavelure. La nutrition des plantes passe d'abord par le sol, mais ce sont les compléments de fertilisation foliaire qui sont visés dans ce projet, principalement parce que leurs impacts peuvent être identifiés et corrigés rapidement. L'impact de l'azote, du bore et du calcium sur les maladies des pommiers a fait l'objet de nombreuses études qui ont été résumées dans une fiche du guide de production fruitière intégrée<sup>1</sup>. L'objectif de notre projet était de valider en conditions commerciales que le calendrier des apports foliaires proposé dans la fiche PFI peut contribuer à réduire les maladies du pommier, sans avoir d'impact négatif sur la production. Pour ce faire, nous avons comparé l'effet des applications foliaires d'azote (urée), de calcium (chlorure de calcium) et de bore et leur combinaison sur les maladies usuelles du pommier (tavelure, feu bactérien), mais aussi sur différents paramètres de production. Les traitements mis en place avaient aussi pour but de comparer l'effet de deux sources de calcium, la dose de bore et l'impact du moment de l'application de l'azote.

## MÉTHODOLOGIE

L'expérience de 12 traitements a été organisée selon un dispositif en blocs complets aléatoires (4 répétitions) avec 5 arbres consécutifs par parcelle élémentaire de GingerGold/B9 (Bloc R7 du verger de l'IRDA) planté en 2013. Le cultivar a été choisi pour sa sensibilité à la tavelure, au feu bactérien et au blanc du pommier. La fertilisation antérieure au projet était uniforme sur l'ensemble du verger. Chaque parcelle élémentaire du dispositif de 48 parcelles occupait 22.81 m<sup>2</sup>, soit 5 arbres x 1.25 m x 3.65 pour un total de 1095 m<sup>2</sup> (2192 pommiers/ha). L'attribution des parcelles est demeuré le même pour les deux années du projet. L'arbre central et au besoin les deux arbres adjacents de chaque parcelle ont été utilisés pour toutes les mesures, observations et prises d'échantillons. Les applications d'engrais au sol, l'irrigation goutte-à-goutte, le désherbage, l'émondage, l'éclaircissage chimique et tous les traitements phytosanitaires étaient communs à l'ensemble des parcelles. Aucun traitement fongicide n'a été appliqué dans la parcelle en 2021. En 2022, deux applications de fongicides ont été réalisées après les infections primaires sur l'ensemble des parcelles pour ralentir la progression de la tavelure, soit Penncozeb en juin et Folpan en juillet. Des traitements de streptomycine ont été appliqués dans la parcelle au moment de la floraison. Des traitements insecticide (Calypso, GF120 en 2021 et Bioprotec, Movento, Assail et GF-120 ont été appliqués en 2022. Dans la mesure où c'était possible, la tension hydrique était maintenue sous 12 kPa pendant la saison de croissance. Les engrais au sol ont été limités l'urée au printemps avant débourrement (50 kg/ha d'urée sur toute la surface au sol dans 336 L/ha) et un chaulage a été effectué sur l'ensemble de la parcelle à l'automne 2021 (4 tonnes/ha, 73.2% CaCO<sub>3</sub> et 16.7% MgCO<sub>3</sub>). Aucun autre engrais n'a été appliqué dans les parcelles, hormis ceux prévus par le dispositif expérimental.

Tableau 1. Récapitulatif des traitements d'engrais foliaire du dispositif expérimental.

|    | Nom du traitement                      | Lettre | Azote <sup>1</sup> | Bore <sup>2</sup> | Calcium <sup>3</sup> |
|----|--|--------|--------------------|-------------------|----------------------|
| 1  | Témoin sans engrais foliaire           | C      | Non                | Non               | Non                  |
| 2  | Programme de référence (PFI)           | G      | Oui                | Oui               | Oui                  |
| 3  | Azote selon le risque de tavelure      | A      | Oui <sup>4</sup>   | Oui               | Oui                  |
| 4  | Azote foliaire à dose élevée et tardif | D      | Oui <sup>5</sup>   | Oui               | Oui                  |
| 5  | Témoin sans urée                       | H      | Non                | Oui               | Oui                  |
| 6  | Urée foliaire seul                     | L      | Oui                | Non               | Non                  |
| 7  | Bore foliaire à dose élevée            | I      | Oui                | Oui <sup>6</sup>  | Oui                  |
| 8  | Témoin sans bore                       | K      | Oui                | Non               | Oui                  |
| 9  | Bore foliaire seul                     | F      | Non                | Oui               | Non                  |
| 10 | Calcium foliaire Poma                  | B      | Oui                | Oui               | Oui <sup>7</sup>     |
| 11 | Témoin sans calcium                    | J      | Oui                | Oui               | Non                  |
| 12 | Calcium foliaire seul                  | E      | Non                | Non               | Oui                  |

<sup>1</sup>Sauf indication contraire, les applications d'azote ont été réalisées sous forme d'urée (46% N) à raison de 6 applications de 4 kg/ha réparties entre le débourrement et deux semaines après le stade calice pour un total de 11 kg/ha N.

<sup>2</sup>Le bore (Etidot-67 EP, 20% B) a été fractionné en 5 applications (bouton rose, calice, début juin, mi-juin et début juillet) à raison de 0.6 kg/ha par application de formulation pour un total de 0,6 kg/ha de B. Les trois premières dates permettaient une application en mélange avec l'urée et les trois dernières avec le calcium.

<sup>3</sup> Les applications de chlorure de calcium (4 kg/ha, 28% Ca) ont débuté au stade calice et réparties 7 applications en cours d'été de sorte que leur fréquence diminuait en cours de saison pour un total de 7,8 kg/ha Ca. Les dates des trois premières applications permettaient une application en mélange avec l'urée.

<sup>4</sup> Les applications d'urée (4 kg/ha) étaient faites en lien avec les infections de la tavelure du pommier. En 2021, les traitements étaient visés en post infection, immédiatement après les infections calculées selon le logiciel RIMpro. En 2022, les traitements étaient effectués avant les périodes de pluies prédites.

<sup>5</sup> Les applications ont été fractionnées en 3 applications à dose élevée de 8 kg/ha. Les deux premières dates d'application permettaient le mélange avec le bore et la dernière (tardive) avec le calcium.

<sup>6</sup> Dose de 2 kg/ha par application au lieu 0.6 kg/ha.

<sup>7</sup> Le chlorure de calcium a été remplacé par une formulation commerciale (Poma), à raison de 10 L/ha).

Traitements : Les applications d'engrais foliaires ont été faites avec un pulvérisateur à jet porté de type tunnel équipé de ventilateurs tangentiels Weber (Bodman, Germany). La vitesse de l'air a été optimisée pour la canopée selon la stratégie Aircheck<sup>2</sup>. Les rampes verticales du pulvérisateur ont traité directement les deux côtés de la rangée avec chacune 10 buses coniques Albus ATR 80 "lilas" dont la pression était ajustée pour un débit individuel de 0.405 L/min pour un total de 225 L/ha à 5.92 km/h. Les effets séparés de l'azote, du calcium, du bore et leurs combinaisons (interactions) ont été quantifiés par une expérience factorielle de 8 traitements (2<sup>3</sup> combinaisons), à laquelle 4 traitements additionnels ont été greffés (Tableau 1). Dans les traitements avec azote, les applications d'urée foliaire ont été fractionnées en 3 applications à dose élevée de 8 kg/ha (#4), selon les infections de tavelure à raison de 4 kg/ha (#3) ou 6 applications de 4 kg/ha pour les autres traitements, soit la stratégie régulière recommandée dans la fiche PFI. Les applications régulières ont été effectués aux 5-10 jours entre le stade du débourrement avancé et deux semaines après la pleine floraison. Les applications du traitement #4 (urée tardif) ont été appliqués au stade bouton rose, au stade calice et environ 21 jours après la pleine floraison, au moment où l'azote foliaire doit commencer à baisser selon nos recommandations. En 2021, les applications du traitement #3 ont été faites moins de 48 h après le début des infections (3 applications), soit pendant la période de germination des spores et les premiers stades d'infection. En

2022, les traitements ont été appliqués en lien avec 7 périodes de pluie, avant que les critères d'infection soient rencontrés. Pour les traitements avec bore, les applications de la formulation Etidot-67 EP (disodium octaborate tetrahydrate,  $\text{Na}_2\text{B}_8\text{O}_{13}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , 20 % bore), ont été appliquées à raison de 0.6 kg/ha par application sauf pour le traitement #7 où une stratégie à dose élevée a été testée (2 kg/ha). Le bore a été réparti sur 5 applications (bouton rose, calice, début juin, mi-juin et début juillet). Le bore était mélangé à l'urée pour les traitements avec les deux éléments en commun et aux stades correspondants. Finalement, les applications de calcium ont été faites à partir du stade calice à raison d'une application par semaine pour les 4 premières applications. Par la suite, les applications ont été espacées et renouvelées en fonction du lessivage apparent par la pluie pour un total de 7 applications en 2021 et 2022. Les arbres ont été traités avec du chlorure de calcium (4 kg/ha, 28% Ca, soit 1.12 kg/ha Ca par application) à l'exception du traitement #10 (Poma, Agro-100, 6% Ca, 10 L/ha), soit 0.68 kg/ha Ca par application). L'urée, le bore et le chlorure de calcium ont été mélangés en cuve à chaque occasion où la fertilisation était commune. Comme le mélange des trois éléments au stade calice correspond à un traitement usuel des producteurs, des tests de compatibilité (jar test<sup>3</sup>) et de phytotoxicité ont été faits en marge du projet avec les insecticides et fongicides appliqués à cette période. Aucun autre engrais foliaire n'a été appliqué.

**Analyses minérales:** Une analyse minérale foliaire standard a été réalisée dans chaque parcelle élémentaire à la mi-juillet des deux années du projet. Chaque échantillon (48 échantillons par an) était constitué de 25 feuilles qui provenant du milieu des pousses (non à fruits), à raison de une feuille par pousse. Les échantillons en sacs de papier ont été immédiatement séchés à 65°C avant l'envoi au laboratoire d'analyse de l'IRDA. La teneur de 22 éléments incluant l'azote ammoniacal et les nitrates a été rapportée.

**Physiologie :** L'état végétatif des pousses, soit le nombre de pousse en croissance active a été estimé sur 20-25 pousses aléatoires par parcelle à différents moments durant la saison. La pousse a été classée selon qu'elle était issue du bourgeon apical (terminal) ou d'un bourgeon axillaire et selon qu'elle était végétative ou issue d'un bourgeon floral (pousse de bourse); soit 4 catégories. Seules les pousses longues (> 5 cm) ont été considérées<sup>4</sup>. La croissance annuelle des pousses végétatives a été mesurée après la récolte en 2021 et 2022 sur 15 pousses par arbre. La mesure de la fluorescence de la chlorophylle (rapport  $F_v/F_m$ ) et la concentration en chlorophylle ont été utilisés comme indicateurs de la santé générale, une méthodologie usuelle non destructive pour évaluer les stress subis par les plantes, incluant les dommages infligés aux feuilles par les ravageurs<sup>5</sup>, les maladies<sup>6</sup> et les stress abiotiques<sup>7</sup>. Ces deux paramètres ont été mesurés in situ sur la face adaxiale d'une feuille du milieu des pousses, choisies à la mi-hauteur d'un arbre par parcelle et du même côté de la rangée. Les mesures ont été faites en juillet au milieu du jour. Un fluoromètre (OS30p, Opti-Sciences, Hudson, NH, USA) a été utilisé pour mesurer le rapport  $F_v/F_m$  sur une portion de limbe obscurcie pendant 30 min avec une pince prévue à cet effet. Les lectures ont été faites sur 2 pousses par parcelle en 2021 et 6 pousses en 2022. La concentration en chlorophylle ( $\text{mg}/\text{m}^2$  de surface) a été mesurée avec un appareil dédié (CCM-300, Opti-Sciences, Hudson, NH, USA) au centre d'une feuille, de 6 pousses par arbre.

**Phytoprotection :** L'incidence de la tavelure sur bouquets et sur pousse a été estimée séparément en comptant le nombre de feuilles tavelées sur 20 bouquets/pousses par parcelle. L'incidence du blanc à l'échelle des pousses a été établie une fois par année en juillet en observant 25 pousses par parcelle en 2021 et 15 pousses par parcelle en 2022. L'incidence de la rouille du pommier a été estimée à la fin juillet en comptant le nombre de feuilles affectées sur 20 et 25 pousses respectivement par parcelle. La

sensibilité des pousses au feu bactérien a été estimée en inoculant les 2 feuilles les plus jeunes de 25 pousses saines et en croissance par arbre par la méthode de l'inoculation au ciseau. Des ciseaux trempés dans une suspension bactérienne ( $10^{E9}$  CFU/ml) ont été utilisés pour couper les feuilles sur le dernier tiers perpendiculairement à la nervure principale. L'inoculation a été faite le 7 juin 2021 et le 11 juin 2022, soit après un cumul d'environ 600 degrés-jours (base 5°C sinus simple, cumul débutant au 1<sup>er</sup> mars), pour calquer la procédure d'un projet antérieur<sup>8</sup>. Huit jours après l'inoculation, la sévérité de l'infection (absence =0, nécrose sur la nervure = 1, nécrose au pétiole = 2, nécrose sur la pousse = 3, nécrose sur les autres feuilles = 4) et la présence d'exsudat a été notée pour chaque pousse avant leur éradication et leur retrait du verger.

Récolte: Pour chaque arbre, le nombre de fruits récoltés et le nombre de bourgeons avec plus d'un fruit a été compté lors de la cueillette à la fin août. Les fruits ont été entreposés dès la récolte et observés à trois moments. Un échantillon aléatoire de 15 pommes par parcelle a été prélevé fin août, fin octobre et le reste des fruits a été observé à la mi-novembre. La procédure pour les observations après récolte a été adaptée des travaux de Chouinard<sup>9</sup>. Les mesures de qualité soit l'indice de maturité (iode) lors de la première observation, la pression convertie en newtons (pénétrromètre) et la concentration en sucre du jus composite (Brix) ont été notés et utilisées pour calculer l'indice Streif<sup>10</sup> pour chaque pomme échantillonnée [ $\text{pression}/(\text{Brix} \times \text{indice iode})$ ]. L'indice de coloration a été observé pour chaque fruit en attribuant une cote entre 1 (vert) et 7 (jaune) inspirée du nuancier du CTIFL pour le cultivar Tentation. Le poids total approximatif des fruits récoltés par parcelle a été établi en additionnant le poids des trois dates d'échantillonnage en entrepôt. Les données ont été utilisées pour calculer le rendement et le poids moyen des fruits. L'analyse de la distribution du calibre individuel de tous les fruits a été faite en combinant le calibre calculé à partir du diamètre mesuré de chaque fruit lors des deux échantillonnages avec le calibre observé lors de l'échantillonnage final. Les données de récolte ont été mises en lien avec la densité florale mesurée au stade bouton rose. La densité florale a été établie en énumérant le nombre de bouquets floraux sur l'arbre entier au stade bouton rose et en mesurant le diamètre des arbres à 50 cm du sol, le nombre de bouquets par surface transversale du tronc (fruits/cm<sup>2</sup>) a été rapporté. L'incidence de tavelure, de roussissure, de suie-moucheture, de pourriture du cœur, de dégâts superficiels de punaises, de charançons, de lépidoptères et les dégâts internes de mouche de la pomme ont également été observés pour chaque fruit lors de chaque observation et cumulés pour l'analyse statistique. En 2022, les dégâts d'insecte n'ont pas été évalués.

Analyses statistiques : Pour l'analyse des variables réponses considérées séparément (ex : tavelure, feu bactérien), les effets de l'application de chaque élément fertilisant (N, Ca, B), les interactions doubles entre chaque paire d'élément et l'interaction triple ont été utilisés pour modéliser l'effet des engrais (effet fixe) sur chaque variable étudiée. La structure des effets aléatoires de chaque modèle a été choisie sur la base de l'AIC. La corrélation temporelle pour la même parcelle entre les deux années a été estimée en comparant différentes structures de corrélation. Des modèles par année ont aussi été évalués. La modélisation des effets fixes a été adaptée selon le type de variable réponse et selon la présence de surdispersion. Un modèle de type GLMM (mixte et linéaire généralisé) a été utilisé lorsque nécessaire (ex : nombre de fruits, incidence). Le type de distribution et les particularités des modèles ont été indiqués dans l'analyse. Des modèles linéaires mixtes (LMM) ont été construits pour les données continues (poids des pommes, longueur des pousses, etc). Le nombre de fruits par inflorescence a été analysé comme la proportion de bourgeons avec un fruit ou plusieurs fruits et la proportion des fruits présentant des symptômes de russetting (variables binomiales) ont été analysées par régression logistique. Les variables binomiales et de comptage ont été analysées avec la fonction « glmer ». La

surdispersion des modèles de régression logistique et de comptage a été modélisée avec un effet aléatoire au niveau des observations ou avec une régression négative binomiale<sup>11</sup>. Les cotes non paramétriques (coloration, sévérité du feu bactérien, roussissure des fruits) ont été analysées comme donnée ordinale<sup>8</sup>. Dans les cas où c'était possible, une analyse graphique des résidus a été utilisée pour confirmer le choix de chaque modèle. Des tests de rapport de vraisemblance ont été réalisés sur les modèles recalculés pour le maximum de vraisemblance (ML) pour la sélection des effets fixes des modèles. En général, la sélection des variables a été faite par élimination subséquente (fonction drop1), mais différentes alternatives ont été utilisées pour assurer que le modèle final soit le plus parcimonieux, notamment en considérant la valeur du AIC. Pour les variables retenues, la valeur de  $\chi^2$  de ce test, le nombre de degrés de liberté du numérateur et la probabilité associée ont été rapportés. Pour les modèles GLMM, le rapport de cotes (Odds Ratio, OR) ou le risque relatif (RR) dans le cas des régressions de comptage est également rapporté. Pour toutes les variables réponses analysées, les effets non significatifs ont été exclus du modèle final duquel les coefficients et leurs intervalles de confiance ont été rapportés. Les détails des modèles où seuls les covariables étaient significatifs (ex : nombre de bourgeons par arbre) n'ont pas été rapportés. Des comparaisons de paires de moyennes marginales estimées (emmeans) ont été utilisées pour faciliter l'interprétation des interactions et pour étudier l'effet du type de calcium, la dose de bore ou le moment d'application de l'azote par rapport au témoins correspondants avec ou sans l'engrais étudié. L'analyse de l'effet des engrais sur la teneur minérale des feuilles a été réalisée avec une analyse canonique de redondance (RDA)<sup>12</sup> à l'aide des outils de la librairie « vegan ». Nonobstant l'application d'engrais imposé dans les effets fixes, la teneur minérale des feuilles observée a été corrélée avec l'incidence des maladies.

## RÉSULTATS :

Les deux années du projet étaient très contrastées. Pour les mois de mai à août, la saison 2021 (203 mm en 177 h pluvieuses) était généralement plus sèche que 2022 (505 mm sur 255 h) et la pluviométrie explique une grande partie de la variation observée dans les variables réponses étudiées. Néanmoins, l'effet d'un ou de plusieurs traitements d'engrais était détectable sur la plupart des paramètres étudiés.

Analyses minérales: Les traitements d'engrais foliaires ont eu conjointement un effet significatif sur les teneurs minérales des feuilles mesurées en juillet les deux années. Cependant, aucun des engrais n'a eu d'effet significatif direct sur son élément correspondant dans l'analyse foliaire (N,B,Ca). En 2021, les feuilles des parcelles traitées avec l'urée avaient une teneur plus grande en calcium. En 2022, la teneur en calcium des feuilles était moindre qu'en 2021 et l'effet de l'urée sur le calcium était absent. Le modèle RDA retenu pour résumer l'effet des traitements sur l'analyse minérale expliquait 29% de la variance observée (F=6.3, P=0.001). L'effet de l'urée et du calcium était significatif et différent pour les deux années du projet. Les traitements tardifs d'urée (F=1.77, P=0.08) et appliqués en fonction des pluies (F=1.75, P=0.09) n'ont pas été jugés assez importants pour l'inclusion au modèle. Tous les autres effets incluant le bore et le Poma n'ont pas eu d'effet mesurable sur la teneur minérale globale des feuilles. Deux axes canoniques (22% et 5%) étaient significatifs et englobaient la quasi-totalité de la variance expliquée. Sur les axes canoniques l'urée avait un effet opposé au calcium en 2021, mais leur relation était conjointe en 2022. De tous les éléments analysés seuls le Zn, Cu, Ba, Ca, Mn, C et S contribuaient à plus de 55% de la variation dans la composition minérale.

En général, la concentration d'azote, potassium, calcium, bore, manganèse et de fer étaient dans la plage optimale de référence en pomiculture (Barriault, comm. pers.). Par contre, les valeurs mesurées pour le phosphore, magnésium, zinc et cuivre étaient un peu faible. Le chaulage à l'automne 2021 a surtout été

effectué pour combler la légère lacune en magnésium, mais cet apport ne s'est pas réflété dans l'analyse minérale. La concentration en magnésium des feuilles a même diminué de 10% en 2022.

Physiologie : L'état végétatif des pousses pendant la saison (Figure 1) était très contrasté entre 2021 et 2022. En 2021, un bourgeon terminal était visible sur la moitié des pousses dès la mi-juillet alors que très peu de bourgeons terminaux étaient visibles à la même période en 2022.

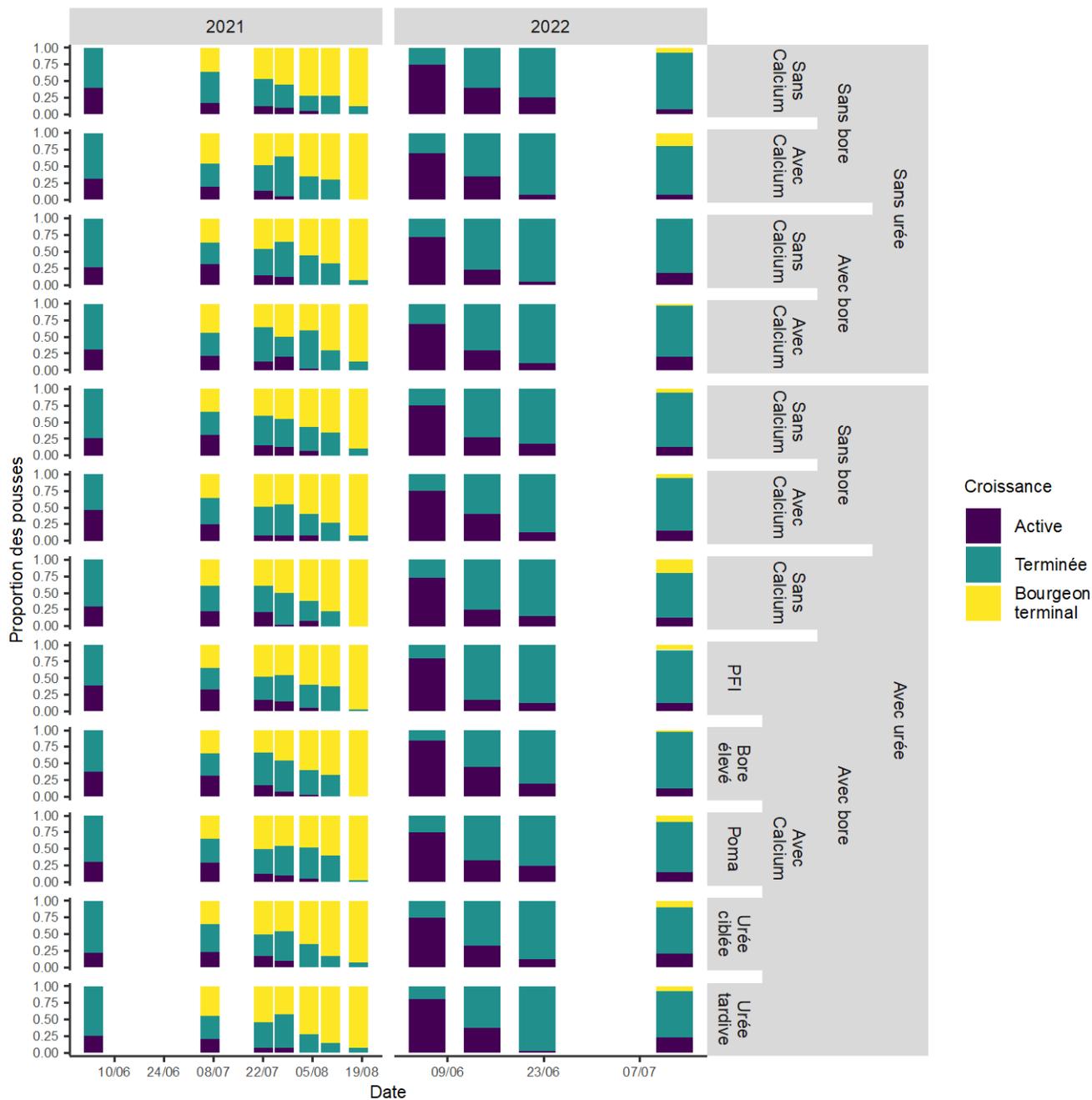


Figure 1. État de la croissance des pousses végétaives suivant un régime de fertilisation foliaire.

L'état végétatif en cours d'année était influencé de façon importante par le nombre de bouquets floraux sur l'arbre et dans une moindre mesure par les fertilisants foliaires. Dans le témoin, la probabilité que la pousse observée soit active était plus grande dans les arbres avec davantage de bouquets, mais l'effet était variable par traitement et l'interaction a été utilisée comme indicateur de l'effet du traitement. Lors de la première observation en 2021 nous avons observé que les traitements d'urée, de bore, de calcium et leur interaction avec le nombre de bouquets (GLMER:  $\chi^2 = 10.5$  (1 df),  $P = 0.001$ ) avaient un effet sur la probabilité qu'une pousse soit en croissance. Par rapport au témoin sans engrais, l'urée seule et le calcium utilisés seuls atténuaient l'effet du nombre des bouquets alors que le bore était neutre. Les 3 paires urée + bore et urée + calcium et bore + calcium et la combinaison PFI étaient neutres.

Tous les effets avaient disparu dès l'observation du 7 juillet pour laquelle aucun traitement ou élément n'avait d'effet significatif au seuil de  $P = 0.05$  ou de magnitude d'intérêt agronomique. Par la suite, les engrais foliaires n'ont eu pas d'effet mesurable sur la probabilité qu'une pousse soit en croissance, jusqu'au 4 août. Même si très peu de pousses étaient encore en croissance à cette date (0 à 8% selon le traitement), nous avons observé que les pousses issues des arbres ayant reçu de l'urée étaient plus actives que celles sans urée (GLMER: OR = 4,7,  $\chi^2 = 8.6$  (1 df),  $P = 0.027$ ). Aucune pousse en croissance active n'a été observée par la suite en 2021. En 2022, les traitements foliaires n'ont eu aucun impact appréciable sur la probabilité qu'une pousse soit en croissance lors des 4 observations. En 2021 la sécheresse estivale a provoqué un arrêt de croissance prématuré. Plus tard en saison, la pluie a provoqué une nouvelle poussée de croissance. Pour bien refléter les deux poussées de croissance (avant et après la sécheresse), la présence d'un bourgeon de fin de croissance intermédiaire a été modélisée. La probabilité que la croissance reprenne au cours de la saison 2021 (17% à 42%) était moindre dans le traitement sans engrais par opposition aux traitements avec engrais (OR = 0.40, GLMER:  $\chi^2 = 6.4$  (1 df),  $P = 0.01$ ), mais la plupart des différences entre traitements n'étaient pas significatives ou agronomiquement notable. En 2022, la proportion des pousses avec une croissance intermédiaire était faible (< 5%) et n'a pas été analysée.

La longueur moyenne des pousses à la fin de la saison (Figure 2) était différente selon l'année (LMER:  $\chi^2 = 138$  (1 df),  $P < 0.001$ ), les traitements avec l'azote (LMER:  $\chi^2 = 6.5$  (1 df),  $P = 0.01$ ), les traitements avec le bore (LMER:  $\chi^2 = 4.3$  (1 df),  $P = 0.036$ ) et l'interaction bore\*année (LMER:  $\chi^2 = 4.7$  (1 df),  $P = 0.03$ ) qui ont été retenus dans le modèle de croissance. La croissance annuelle moyenne dans le témoin sans engrais en 2022 (31.5 cm) était plus élevée qu'en 2021 (22.3 cm). La croissance annuelle additionnelle dans les parcelles traitées avec l'azote était plus importante (2.8 cm) que les parcelles sans azote les deux années. En 2021, le bore a aussi augmenté la croissance moyenne (3.5 cm), mais pas en 2022 (0.8 cm). Augmenter la dose de bore a diminué la croissance en 2021 (-6.3 cm,  $t = -2.1$ ,  $P = 0.03$ ) par rapport au traitement à dose usuelle, mais cet effet n'a pas été observé en 2022. Le moment d'application de l'azote (ciblé, tardif) n'a eu aucun effet significatif sur la croissance.

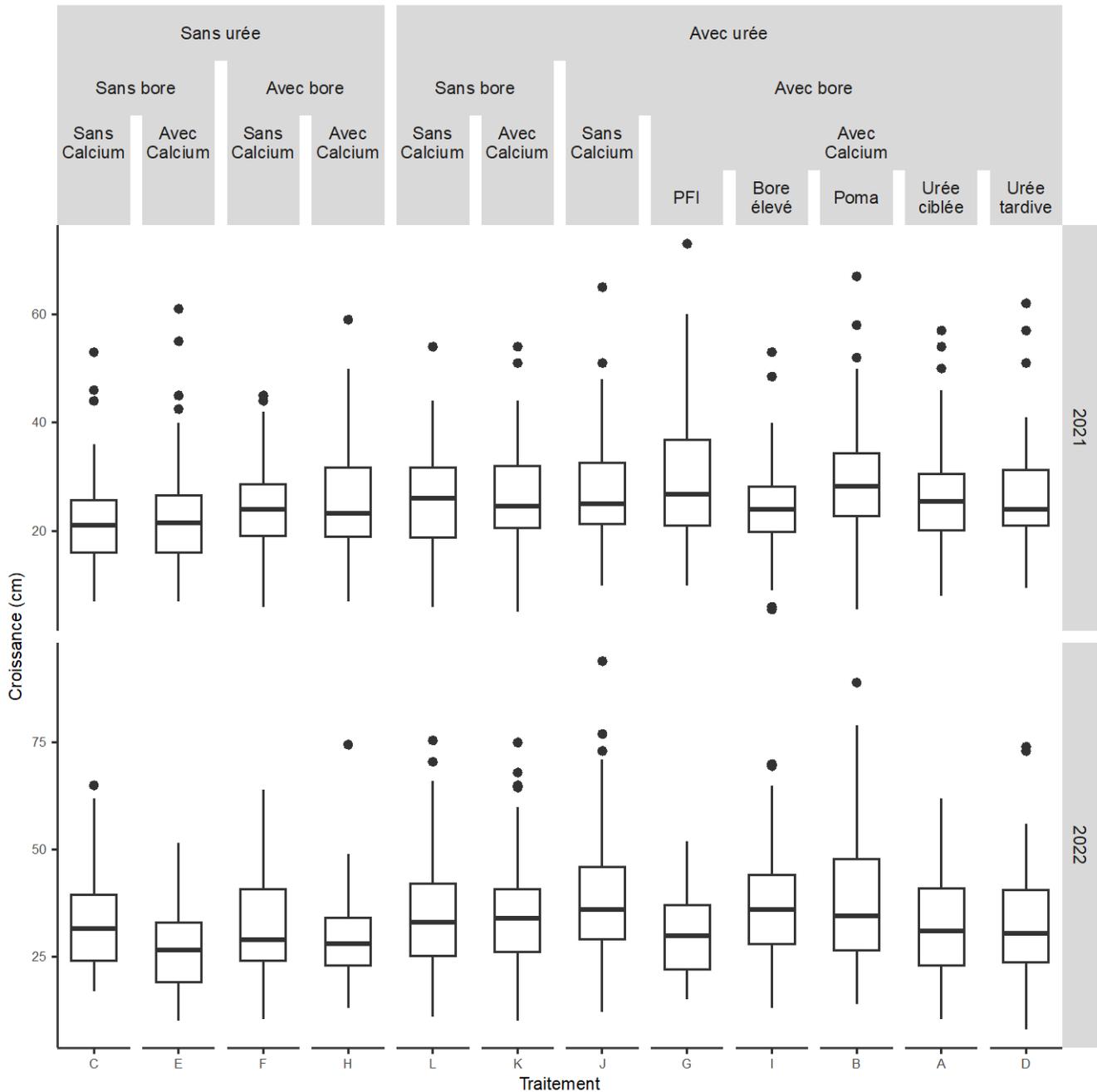


Figure 2. Croissance annuelle des pousses végétatives suivant un régime de fertilisation foliaire.

Pour les indicateurs de santé des plantes, le rapport  $F_v/F_m$  de la fluorescence de la chlorophylle (Figure 3) a permis de constater selon l'année un effet de l'azote, du bore et du Poma. En 2022 un échantillonnage plus intensif par parcelle a révélé que la distribution comportait davantage de valeurs inférieures à  $1.5 \times$  l'intervalle interquartile de chaque traitement. Comme la distribution des valeurs était visiblement asymétrique pour presque tous les traitements, différentes distributions et transformations ont été utilisées pour stabiliser la variance et corriger l'hétéroscédasticité dans les résidus de modèles. Pour le modèle sélectionné (lme), toutes les données de  $F_v/F_m$  ont été transformées. La valeur analysée ( $\log(-y+b)$ ) a été calculé à partir de  $y = F_v/F_m$  et  $b = 0.846$ . Le paramètre de décalage ( $b$ ) a été établi à

partir la valeur maximale observée (0.845). La variance différente entre 2021 et 2022 a été modélisée avec varIdent. Notre dispositif pour les deux années permettait de détecter une différence de 0.03 (puissance de 80% selon la fonction « powerSim ») entre traitements individuels, similaire à celle rapportée dans d'autres études et suffisante pour détecter les variations d'intérêt.

Les effets fixes retenus indiquent que l'effet de l'azote n'était pas indépendant du bore (LME:  $\chi^2 = 3.6$  (1 df),  $P=0.057$ ) et que l'effet de l'azote était différent selon l'année (LME:  $\chi^2 = 6.7$  (1 df),  $P=0.01$ ). L'effet du Poma était également détectable (LME:  $\chi^2 = 6.2$  (1 df),  $P=0.013$ ) et statistiquement similaire les deux années alors que le calcium n'a pas été retenu dans le modèle. En 2021 les traitements d'urée seul ou de bore seul n'ont pas eu d'effet, mais la combinaison d'urée et bore a fait augmenter le rapport Fv/Fm moyen (0.01,  $t=2.1$ ,  $P=0.04$ ) par rapport aux parcelles sans ces éléments, mais l'effet était plus fort en comparaison aux parcelles avec bore (0.015,  $t=2.1$ ,  $P=0.006$ ), qu'en comparant avec des parcelles traitées avec urée (0.007,  $t=1.9$ ,  $P=0.06$ ). En 2022, l'azote seul avait tendance à baisser le Fv/Fm (-0.029,  $t=1.6$ ,  $P=0.11$ ) et l'ajout de bore annulait l'effet négatif (0.017,  $t=1.9$ ,  $P=0.06$ ). Le bore seul, la combinaison bore et urée étaient similaires au témoin. Le Poma en 2022 avait la valeur moyenne de Fv/Fm la plus faible, soit 0.049 inférieure aux parcelles équivalentes sans calcium ( $t= -2.3$ ,  $P= 0.024$ ), la réduction de 2021 n'était pas statistiquement significative.

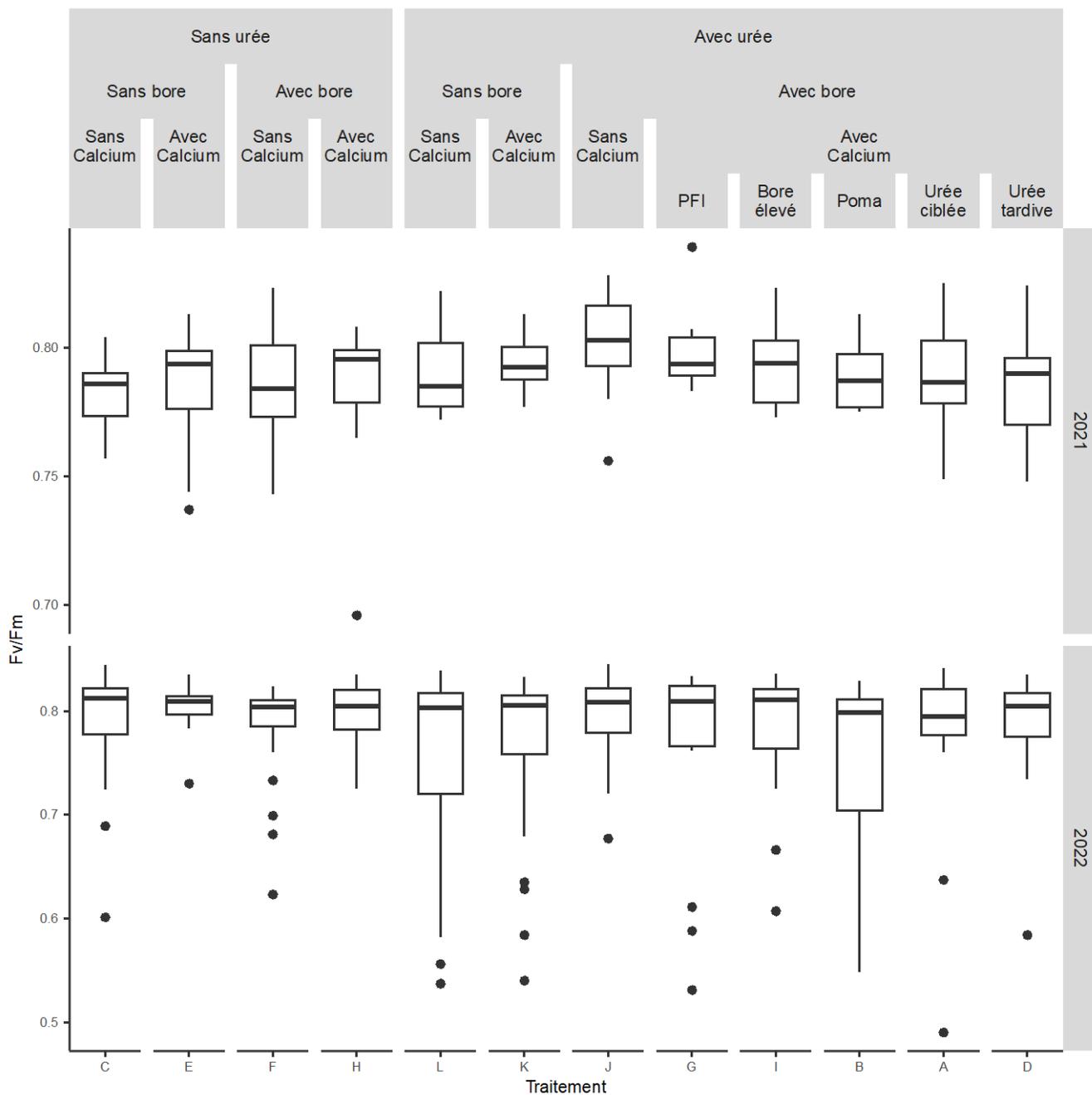


Figure 3. Ratio  $F_v/F_m$  de la fluorescence de la chlorophylle suivant un régime de fertilisation foliaire.

La concentration en chlorophylle des feuilles (Figure 4) était beaucoup plus élevée en 2022 (1666  $\text{mg}/\text{m}^2$ ) qu'en 2021 (905  $\text{mg}/\text{m}^2$ ) et l'effet des traitements foliaires était faible.

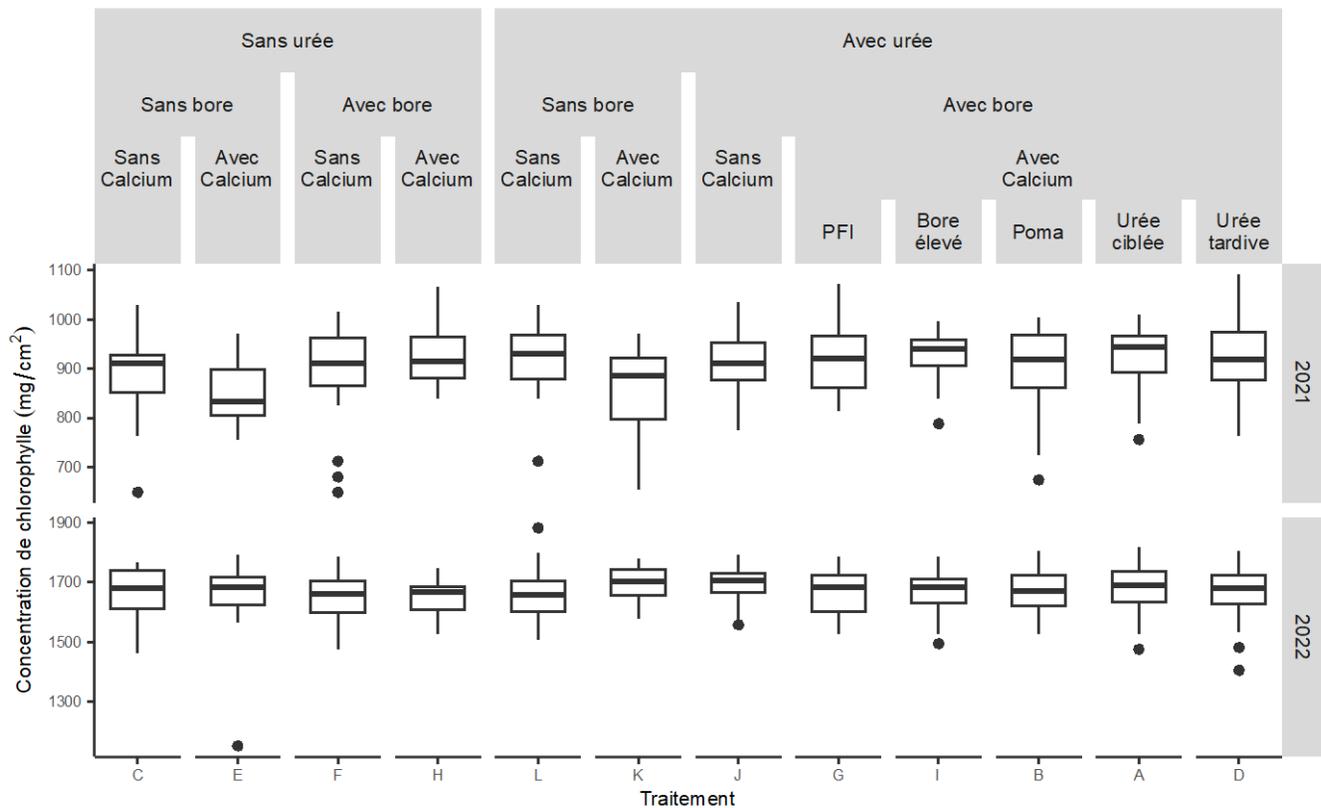


Figure 4. Concentration de chlorophylle mesurée par fluorescence suivant un régime de fertilisation foliaire.

Le calcium en interaction avec le bore ont influencé la concentration en chlorophylle des feuilles différemment selon l'année (LME:  $\chi^2 = 10$  (1 df),  $P=0.0016$ ). En 2021, le calcium appliqué sans bore a fait baisser la chlorophylle ( $-51 \text{ mg/cm}^2$ ,  $t=2.9$ ,  $P=0.006$ ), alors que la combinaison rétablissait la concentration de chlorophylle par rapport au calcium seul ( $+63 \text{ mg/cm}^2$ ,  $t=4.3$ ,  $P<0.001$ ) et la combinaison bore et calcium n'était alors pas différente du témoin. Le bore seul n'a eu aucun effet. En 2022, la résultante des interactions pour le bore et le calcium n'a eu aucun effet sur la chlorophylle. L'urée foliaire augmentait très légèrement la concentration de la chlorophylle ( $17 \text{ mg/m}^2$ , LME:  $\chi^2 = 3.5$  (1 df),  $P=0.06$ ) pour les deux années, mais cet effet n'était pas détectable à l'échelle des traitements individuels. L'utilisation du Poma ou augmenter la dose de bore n'ont pas eu d'effet perceptible sur la chlorophylle par rapport aux traitements normaux de calcium et de bore.

#### Pathologie :

Tavelure foliaire : À l'issue des infections primaires de 2021 et 2022, l'incidence de tavelure sur les feuilles de bouquets était trop faible pour dénombrer les feuilles infectées. Seule la tavelure sur pousses a été quantifiée en juillet lors des deux années du projet. En 2021, l'incidence de tavelure était faible dans toutes les parcelles et l'analyse du nombre de pousses infectées ou du nombre de feuilles infectées par pousse était similaire. En 2022, l'incidence de la tavelure était beaucoup plus élevée et la progression des infections secondaires sur les pousses infectées a eu pour effet de donner un portrait différent selon l'échelle considérée (feuille vs pousse). Comme le nombre de feuilles infectées par pousse n'a pas d'impact épidémiologique par rapport à l'incidence, c'est ce paramètre qui a été analysé

pour les deux années combinées. La figure 5 est une représentation des feuilles infectées par pousse et la proportion des pousses atteintes par traitement pour les deux années.

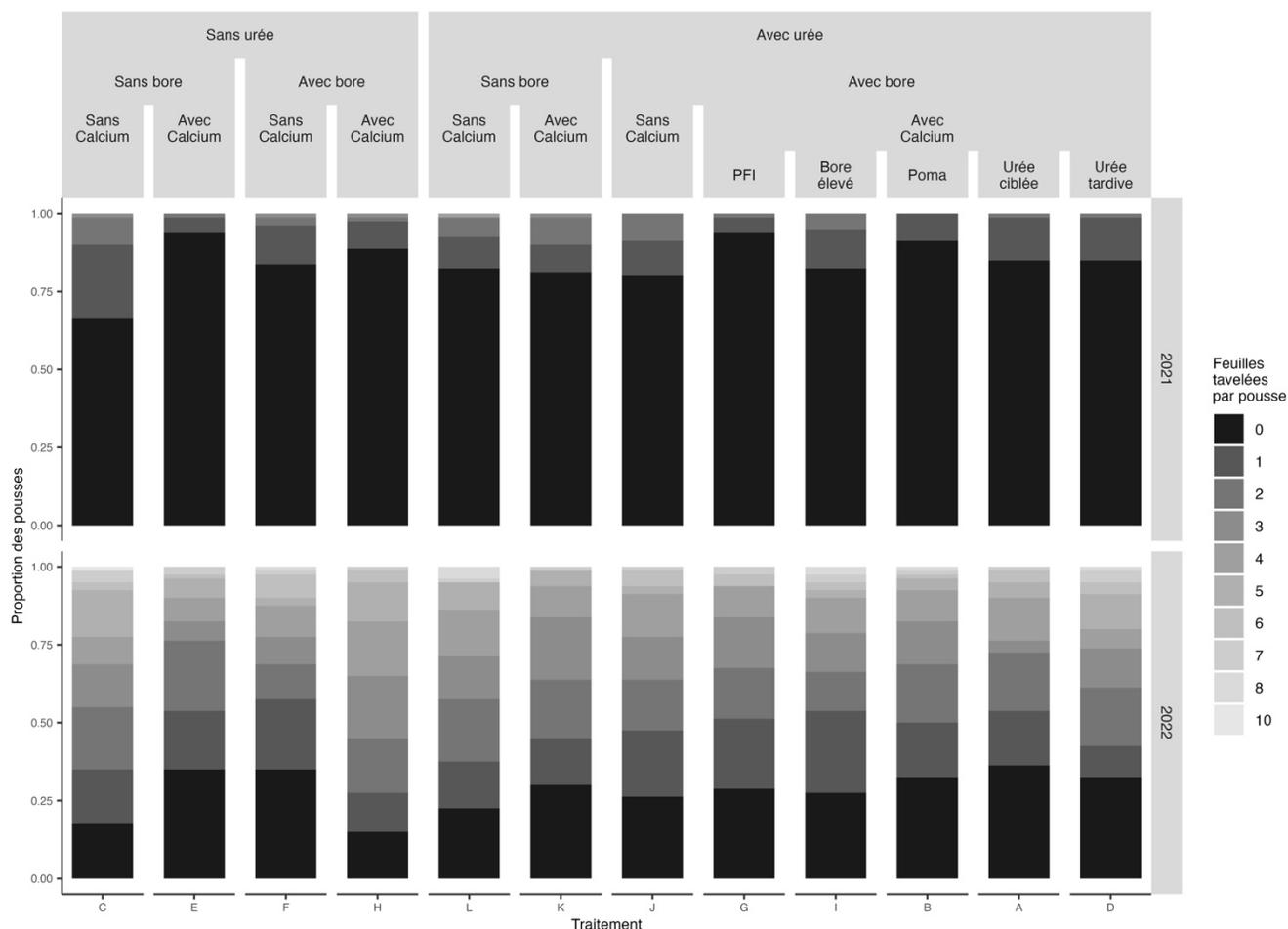


Figure 5. Incidence de la tavelure foliaire sur pousses végétatives selon le régime de fertilisation foliaire.

Globalement, les engrais foliaires ont eu un impact sur l'incidence des pousses végétatives infectées par la tavelure (GLMER:  $\chi^2 = 29$  (10 df),  $P = 0.001$ ). L'azote, le calcium et le bore et leur interaction triple (GLMER:  $\chi^2 = 8.6$  (1 df),  $P = 0.003$ ) ont eu un impact significatif sur l'incidence de la maladie. Seule l'interaction entre l'azote et le calcium était différente selon l'année (GLMER:  $\chi^2 = 4.7$  (1 df),  $P = 0.03$ ). Chaque élément appliqué seul en 2021 réduisait la tavelure par rapport au témoin et notamment le calcium. Mais comme l'effet n'était pas additif, chaque paire avait tendance à réduire l'effet des éléments individuels. La réduction de tavelure était cependant maximale avec le traitement PFI, avec un rapport de cote de 9x par rapport au témoin. En 2022, le portrait était légèrement différent en lien avec l'interaction et le niveau de tavelure plus élevé qui a masqué les effets. Néanmoins, le calcium seul et le bore seul ont réduit la tavelure, mais pas l'urée seul ni aucune des paires d'éléments. Le traitement PFI présentait moins de symptômes que le témoin en 2022, mais l'effet était moins prononcé qu'en 2021 avec un rapport de cote de 2x. En marge du modèle sélectionné, l'effet d'augmenter la dose de bore était différent chaque année, mais n'améliorait pas le modèle global d'incidence (GLMER:  $\chi^2 = 2.1$  (1 df),  $P = 0.14$ ). En incluant cet effet, le bore à dose élevée présentait davantage de tavelure que le traitement PFI

(OR=2.4, z=1.9, P=0.05) en 2021, ce qui a eu pour effet d'annuler la réduction de la tavelure par rapport au témoin (OR= 1.4, z =0.7, P= 0.6). Cet effet était plus évident avec un modèle du nombre de feuilles tavelées par pousse. Les feuilles des arbres traitées avec la double dose de bore étaient plus souvent tavelées que celles traitées à la dose normale (RR = 3.2, z = 2.5, P= 0.013). Cibler le moment pour appliquer l'urée n'améliorait pas non plus le modèle global (GLMER:  $\chi^2 = 2.7$  (1 df), P =0.1), mais l'inclure montrait que les traitements en post infection en 2021 n'étaient pas efficaces et ont annulé la réduction de la tavelure par rapport au témoin (OR= 1.4, z =0.6, P= 0.6), alors que les traitements préventifs ciblés d'urée (2022) n'ont pas réduit l'incidence de la tavelure par rapport aux traitements PFI normaux (OR=0.8).

Nonobstant les traitements foliaires appliqués, nous avons observé que l'incidence de la tavelure était fortement corrélée avec la teneur de certains éléments. Le zinc est présenté en exemple (Figure 6). L'incidence de la tavelure et la concentration de zinc étaient fortement liées à l'année d'observation, mais pas exclusivement. La probabilité qu'une pousse soit tavelée chutait avec l'augmentation du zinc jusqu'à l'atteinte d'une concentration seuil de 12 ppm environ.

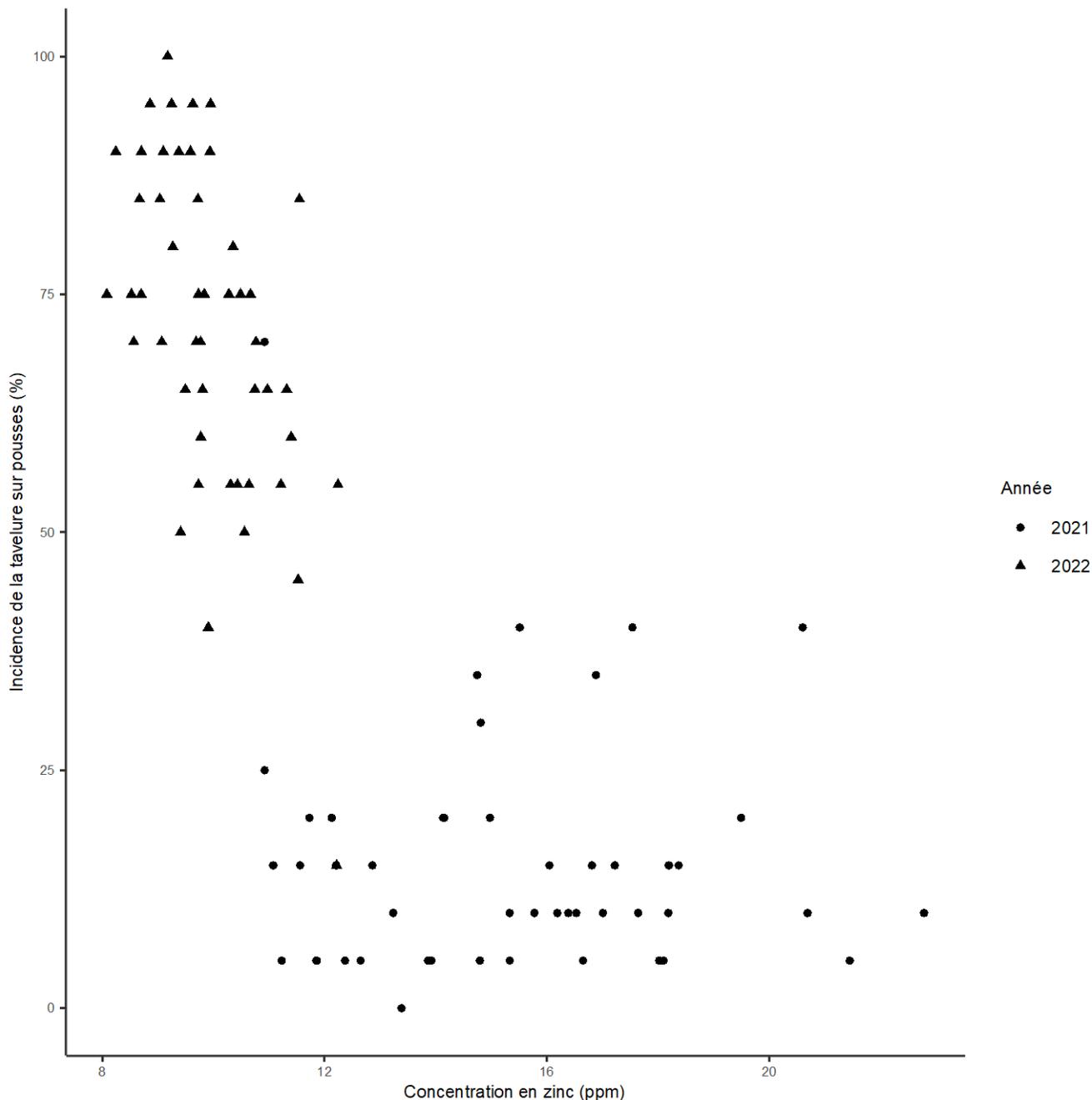


Figure 7. Relation entre la concentration foliaire de zinc dans toutes les parcelles et l'incidence de la tavelure sur pousses observée en juillet de chaque année.

Blanc : En 2021, l'incidence de blanc était beaucoup plus élevée qu'en 2022 (Figure 8). L'effet des engrais foliaires était significatif sur la maladie (GLMER:  $\chi^2 = 28$  (9 df),  $P < 0.001$ ). Le traitement d'azote tardif (OR = 1.8, GLMER:  $\chi^2 = 4.8$  (1 df),  $P = 0.03$ ) et le bore à dosée élevée (OR = 1.7, GLMER:  $\chi^2 = 3.1$  (1 df),  $P = 0.08$ ) augmentaient l'incidence de blanc par rapport à la recommandation PFI les deux années. La même chose a été constatée pour le Poma en 2021 (OR = 1.8), mais pas en 2022 (GLMER:  $\chi^2 = 3$  (1 df),  $P = 0.09$ ). Les traitements d'urée appliqués seuls n'ont pas eu d'effet sur la maladie, mais le chlorure de calcium seul (OR = 0.6,  $z = 3.2$ ,  $P = 0.001$ ), le bore seul (OR = 0.5,  $z = 2.8$ ,

P=0.006), leur combinaison (OR=0.3), la combinaison urée et calcium (OR=0.5) et la combinaison PFI (OR=0.5) ont pu réduire l'incidence en 2021. La combinaison urée et bore quant à elle présentait une interaction et n'avait pas d'effet sur la maladie (OR=0.9, GLMER:  $\chi^2 = 4.3$  (1 df), P =0.04). En 2022, l'effet du calcium était différent (GLMER:  $\chi^2 = 3.7$  (1 df), P =0.05) et son effet n'était pas détectable. En conséquence, seuls les traitements avec bore (avec ou sans calcium) ont montré une efficacité en 2022.

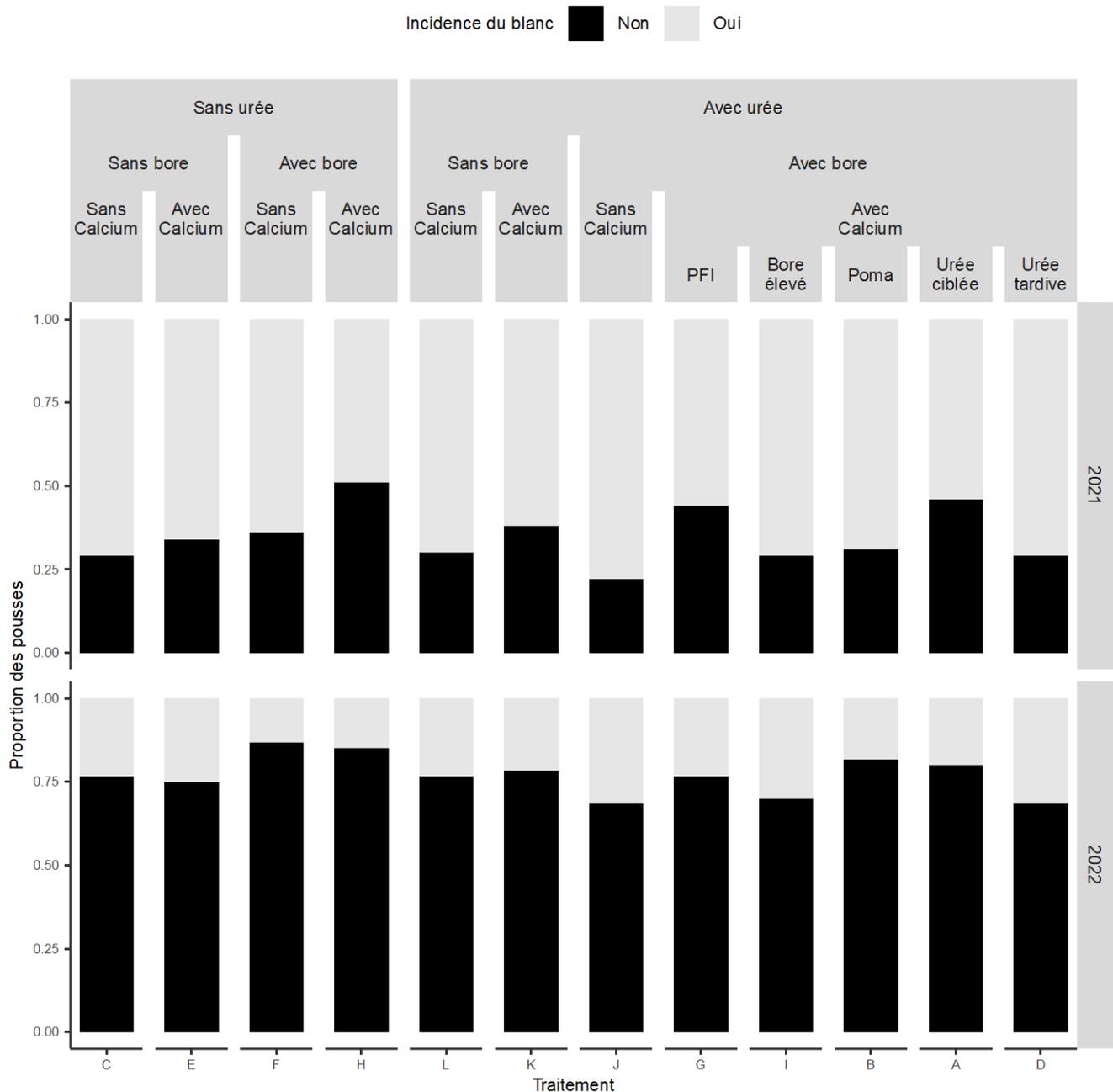


Figure 8. Incidence du blanc du pommier sur pousses végétatives selon le régime de fertilisation foliaire.

Rouilles : Le nombre de feuilles par pousses affectées par la rouille était beaucoup plus élevé en 2021 qu'en 2022 (Figure 9).

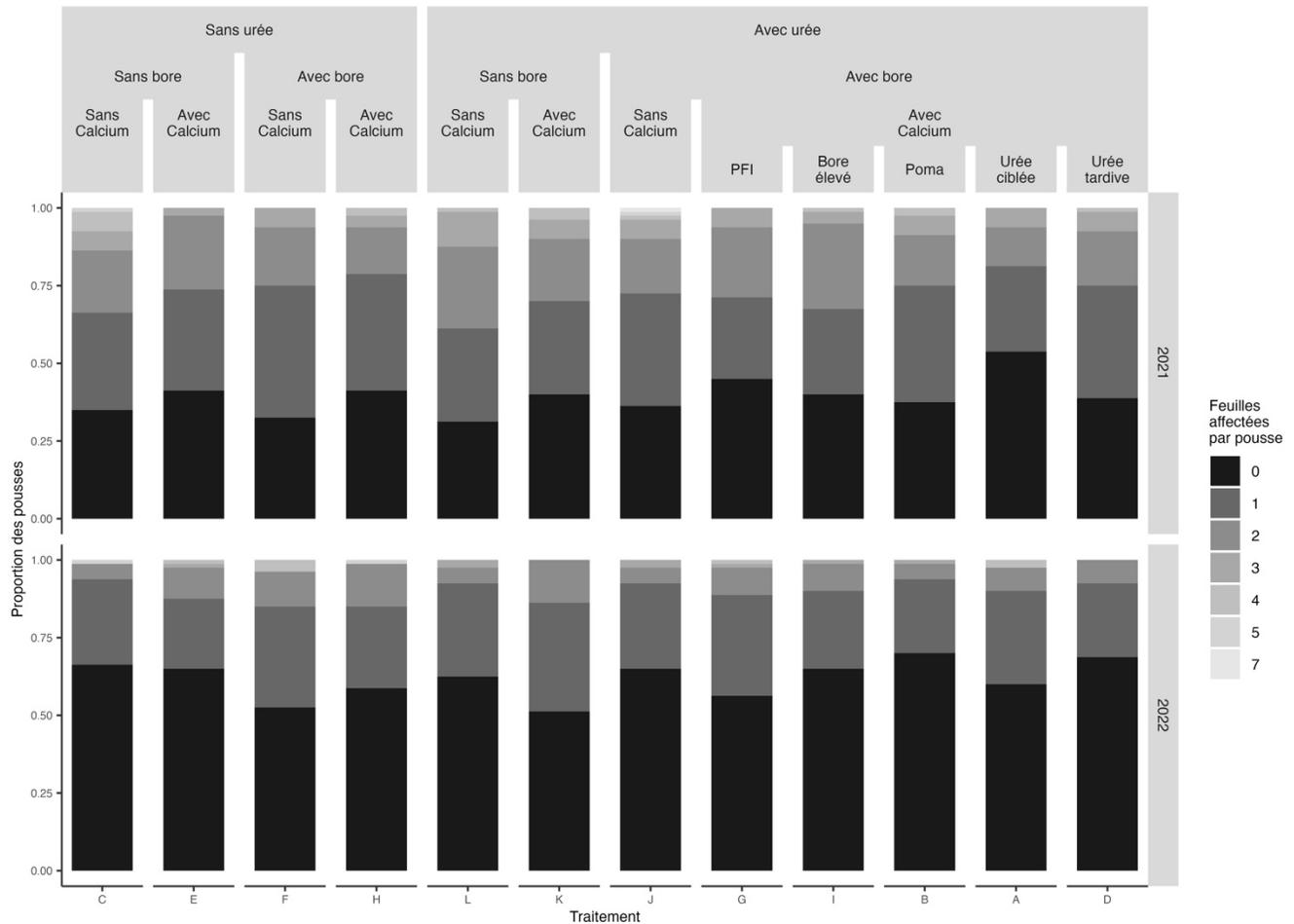


Figure 9. Distribution du nombre de feuilles par pousse présentant des symptômes de rouille selon le régime de fertilisation foliaire.

La maladie a été globalement affectée par les traitements d'engrais (GLMER:  $\chi^2 = 36$  (12 df),  $P < 0.001$ ), mais dans la plupart des cas la fertilisation augmentait le nombre de feuilles avec rouille. L'efficacité des engrais était surtout visible en 2022 alors que la maladie était beaucoup moins sévère. Dans le modèle retenu, l'interaction bore\*calcium (GLMER:  $\chi^2 = 13$  (1 df),  $P < 0.001$ ) et azote\*bore (GLMER:  $\chi^2 = 4.9$  (1 df),  $P = 0.03$ ) étaient différentes selon l'année. En 2021, la résultante des interactions a eu pour effet qu'aucun traitement n'avait moins de rouille que le témoin au seuil de  $P = 0.05$ . Au seuil  $P = 0.1$ , le calcium utilisé seul avait moins de rouille ( $RR = 0.76$ ). Les arbres avec des traitements dirigés d'urée étaient également moins atteints ( $RR = 0.72$ ,  $z = 1.67$ ,  $P = 0.09$ ), mais l'interaction avec l'année (GLMER:  $\chi^2 = 6.3$  (1 df),  $P = 0.01$ ) a masqué l'effet en 2022 ( $RR = 1.3$ ). En 2022, Tous les traitements à l'exception du traitement PFI et ses variantes ont augmenté le nombre de feuilles avec des lésions de rouille avec un risque relatif variant de 1.5 (calcium seul) à 2.6 (bore seul).

Feu bactérien : La progression du feu bactérien sur les pousses inoculées a été beaucoup plus importante en 2022 qu'en 2021 (Figure 10)

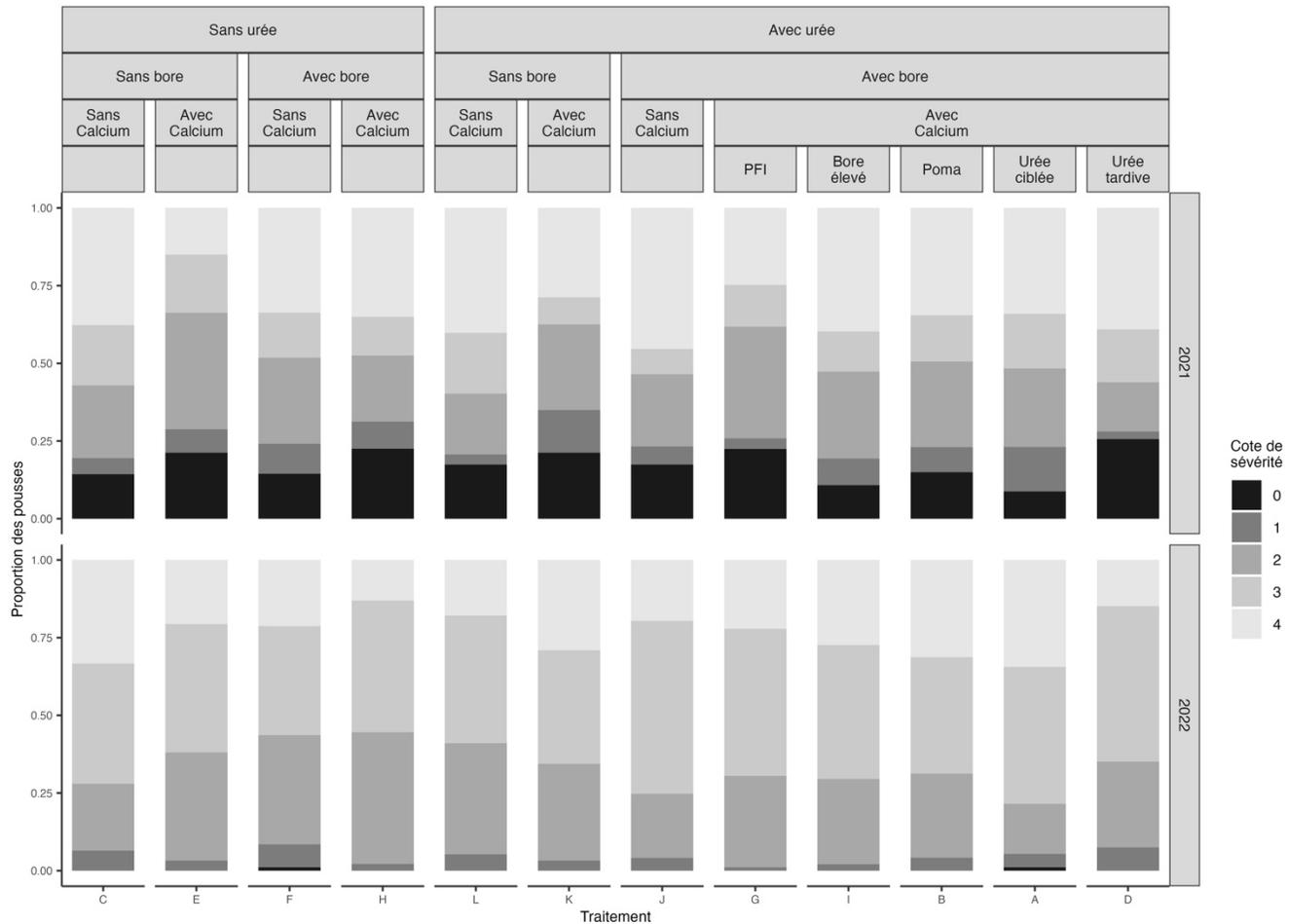


Figure 10. Distribution de la cote de sévérité par pousse du feu bactérien suivant une inoculation standardisée selon le régime de fertilisation foliaire.

La cote de sévérité de l'infection sur les pousses inoculées était surtout influencée par leur état de croissance au moment de l'observation. Les pousses encore en croissance active étaient plus fortement atteintes que les autres (CLM:  $\chi^2 = 104$  (4 df),  $P < 0.001$ ). Comme l'hypothèse des probabilités proportionnelles (ou des pentes égales) pour chaque niveau de sévérité n'était pas remplie pour la covariable de croissance, nous avons modéliser un seuil pour chaque cote. La probabilité que la sévérité soit plus élevée sur les pousses en croissance augmentait pour chaque niveau de sévérité (OR de 2 à 8). Une fois corrigée pour la croissance, nous avons observé en 2021 que la cote de sévérité était globalement plus faible sur les arbres traités avec du calcium (incluant azote et calcium) (OR = 0.6, CLM:  $z=2.7$ ,  $P=0.006$ ), mais comme une interaction bore et calcium était apparente (CLM:  $\chi^2 = 3.2$ , (1 df)  $P=0.08$ ), les traitements incluant du bore (comme PFI) n'étaient pas différents du témoin. Aucun autre effet des engrais n'était perceptible. En 2022, les interactions entre l'état de croissance et les traitements de fertilisation ont compliqué l'analyse ordinale. Comme seulement 9% des pousses étaient en croissance, nous avons opté pour une analyse séparée. Sur les pousses en croissance, aucun effet des traitements de fertilisation n'était détectable. Pour les pousses non en croissance, l'interaction de l'urée et du bore (CLM:  $\chi^2 = 9.6$  (1 df),  $P = 0.002$ ) et de l'urée et du calcium (CLM:  $\chi^2 = 8.1$  (1 df),  $P = 0.004$ ) ont eu pour effet que le calcium (OR=0.6,  $z=2.4$ ,  $P=0.01$ ), l'urée (OR=0.6,  $z=2.3$ ,  $P=0.02$ ) et le bore (OR=0.5,  $z=3.2$ ,  $P=0.001$ ) utilisés seuls réduisaient la sévérité du feu alors que les combinaisons de

d'engrais n'ont eu aucun effet à l'exception du traitement bore et calcium (OR=0.3, z=4, P<0.001) qui s'est avéré le plus efficace.

### Récolte

Physiologie : Les traitements d'engrais foliaires n'ont eu aucun intéressant sur le calibre des fruits à la récolte, ou leur poids, ou sur la proportion de bouquets à un fruit vs plusieurs et donc les analyses de rendement sont donc limitées. Les traitements n'ont pas eu non plus d'effet notable à la récolte sur l'indice de maturation, la pression, le taux de Brix, ni l'indice combiné de Streif des fruits individuels. Par contre, l'observation après entreposage (Figure 11) a révélé que les engrais foliaires et leurs interactions ont eu un effet important sur la fermeté des fruits en 2021 (LMER:  $\chi^2 = 43$  (12 df), P < 0.001)

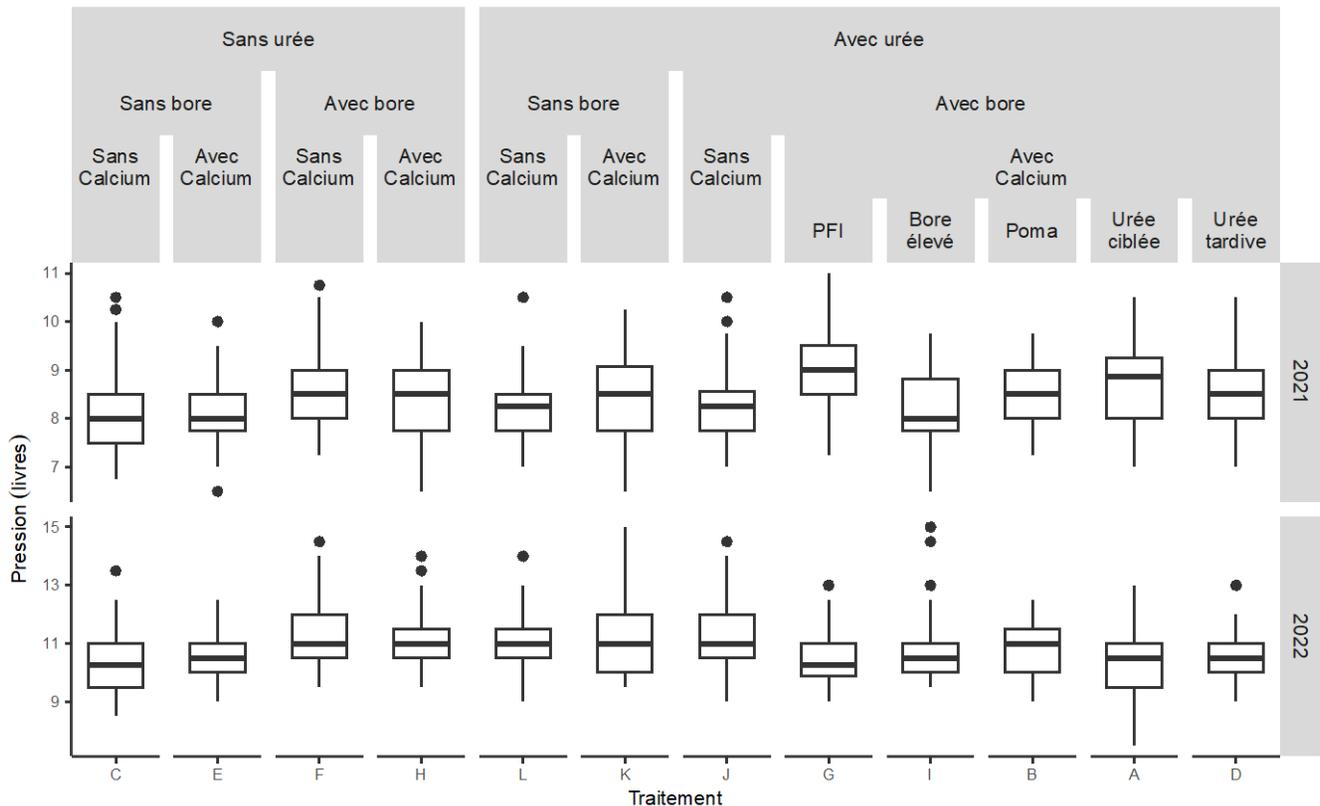


Figure 11. Fermeté résiduelle des fruits après entreposage prolongé selon le programme de fertilisation foliaire.

Le modèle retenu comprenait un ajustement pour le nombre de bouquets par arbre pour tenir compte que les pommes des arbres plus chargés étaient moins fermes dans tous les traitements. L'urée, le calcium, le bore et leur triple interaction (LMER: F= 9.5 (1 df), P = 0.004) ont eu pour effet que les fruits des arbres traités seulement avec l'urée (0.5 lbs, t=2.6, P=0.01), ou le bore (0.4 lbs, t=2.1, P=0.04) étaient plus fermes que ceux qui témoin, mais que les fruits des arbres traités seulement avec du calcium n'étaient pas plus fermes que ceux du témoin. Aucune paire d'engrais n'a eu d'effet, mais la pression mesurée était plus élevée sur les arbres traités selon la stratégie PFI que les arbres témoins en 2021 (0.8 lbs, t=5.1, P<0.001). Par ailleurs, les contrastes ont révélé que les pommes des arbres traités tardivement à l'urée (-0.4 lbs, t=-2.8, P = 0.007), avec POMA (-0.5 lbs, t= -3, P= 0.005), ou à la double dose de bore (-0.50 lbs, t=-3.6, P= 0.001) étaient en moyenne moins fermes que celles du programme PFI.

En 2022, les fruits étaient plus fermes à la sortie de l'entreposage qu'en 2021, mais l'effet des traitements foliaires étaient faibles. L'urée, le bore et leur interaction (LMER:  $F=7$  (1 df),  $P=0.01$ ) sont les seuls effets qui ont été retenus dans le modèle. Les arbres traités avec le bore seulement étaient plus fermes (0,6 livres,  $t=2$  (1 df),  $P=0.049$ ) que le témoin, mais les fruits des arbres traités avec l'urée seul ou la combinaison urée et bore étaient similaires au témoin. Comme le calcium n'a pas eu d'effet sur la fermeté des fruits en 2022, toutes les combinaisons avec calcium avaient une fermeté selon que le bore ou l'urée était présent dans le traitement.

La couleur des fruits était fortement influencée par l'année et le moment de leur observation (Figure 12). Les fruits ont été cueillis plus verts en 2022 qu'en 2021 et l'évolution du jaune a été moins intense pendant la conservation. Les fruits issus des arbres plus chargés étaient aussi moins colorés (moins jaunes).

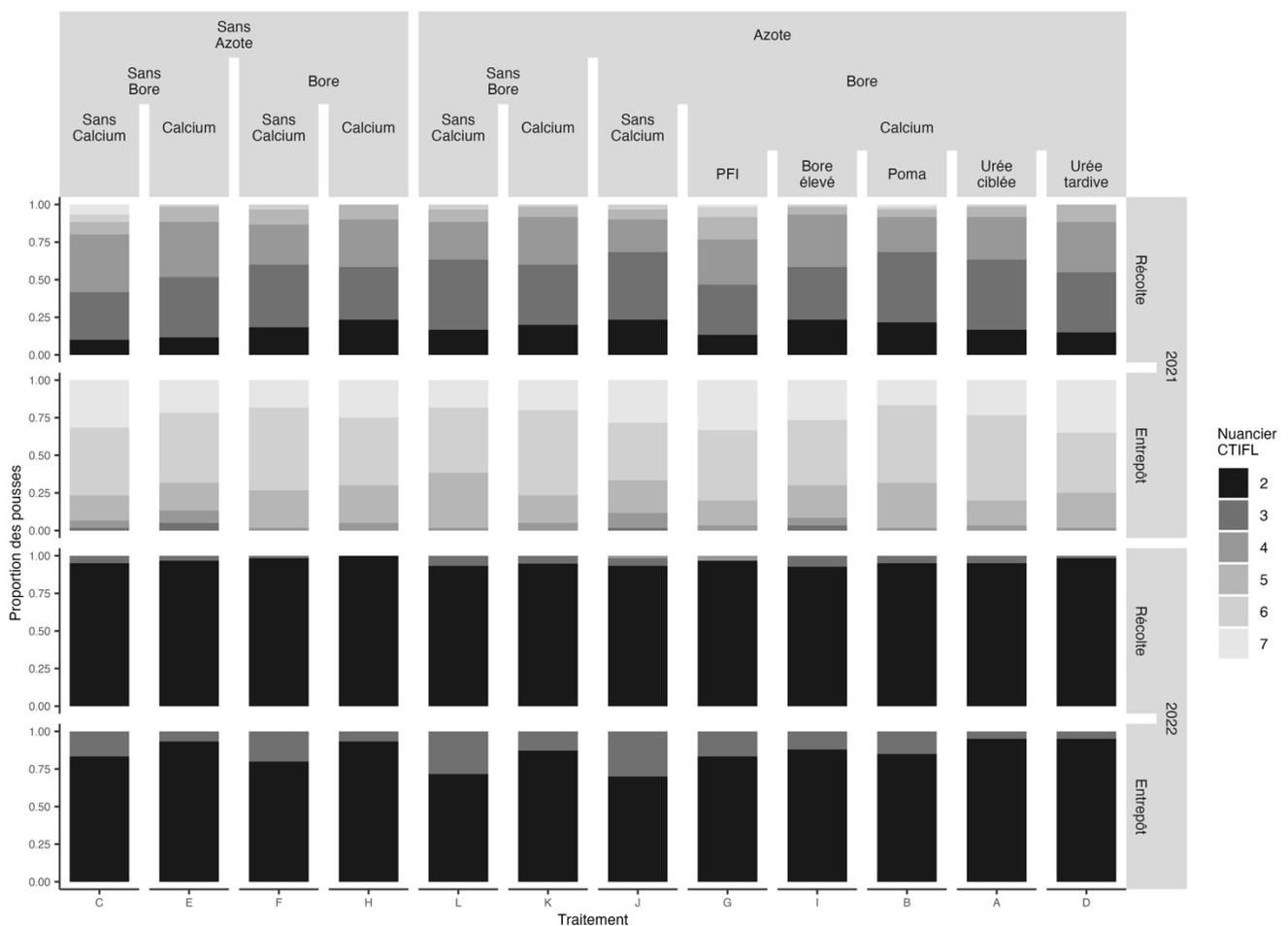


Figure 12. Distribution de la couleur des fruits à la récolte et après entreposage prolongé selon le programme de fertilisation foliaire.

Le modèle proposé pour expliquer la cote de couleur en 2021 incluait l'effet de l'azote, du bore, du calcium et l'interaction triple (CLMM:  $\chi^2 = 8$  (1 df),  $P = 0.004$ ). À la récolte, les fruits de tous les traitements avec étaient plus verts que le témoin, sauf le traitement avec calcium seul au seuil  $P=0.05$  ( $P=0.12$ ). Après entreposage, les traitements étaient similaires. Les contrastes ont révélé que les pommes

traitées avec du Poma étaient plus vertes que celles traitées avec le chlorure de calcium ( $z=2.4$ ,  $P=0.01$ ) et l'effet s'est maintenu durant l'entreposage. Les fruits des arbres traités avec le bore à dose élevée ( $z=2$ ,  $P=0.04$ ) ou traités tardivement avec l'urée ( $z=1.7$ ,  $P=0.09$ ) étaient plus vertes que la référence PFI à la récolte, mais l'effet est disparu en cours d'entreposage. En 2022, la couleur des fruits était similaire dans tous les traitements à la récolte. Après entreposage, seulement de faibles différences entre traitements étaient apparentes.

**Pathologie :** La tavelure sur fruits après entreposage (Figure 13) a suivi la même tendance annuelle que la tavelure sur pousses. En 2021, l'incidence était à un niveau très élevé par rapport aux critères commerciaux (5% à 20% selon le traitement), mais relativement faible pour un verger non traité aux fongicides. En 2022, l'incidence était élevée dans tous les traitements. La tavelure n'a pas évolué entre les deux dates d'échantillonnage et seule la tavelure cumulée sur tous les fruits récoltés a été analysée. L'analyse par régression binomiale a révélé que l'incidence de la tavelure sur fruits était plus faible dans les parcelles traitées avec du bore (GLMER:  $\chi^2 = 7.1$  (1 df),  $P = 0.008$ , OR = 0.57) ou du calcium (GLMER:  $\chi^2 = 4.2$  (1 df),  $P = 0.04$ , OR = 0.67) mais l'interaction n'était pas significative (GLMER:  $\chi^2 = 0.9$  (1 df),  $P = 0.35$ ). L'azote et ses interactions avec les autres éléments ainsi que les variations du moment d'application n'ont pas eu d'impact détectable sur la tavelure sur fruits ( $\chi^2 < 1$  dans tous les cas). Le calcium sous forme de Poma ou doubler la dose de bore ont donné des résultats intermédiaires, non différents de leurs témoins respectifs. En 2022, aucun traitement d'engrais individuel n'a eu d'effet. Cependant, les arbres traités avec n'importe quel engrais foliaire avaient moins de fruits tavelés que le témoin (OR=0.43,  $P=0.03$ ).

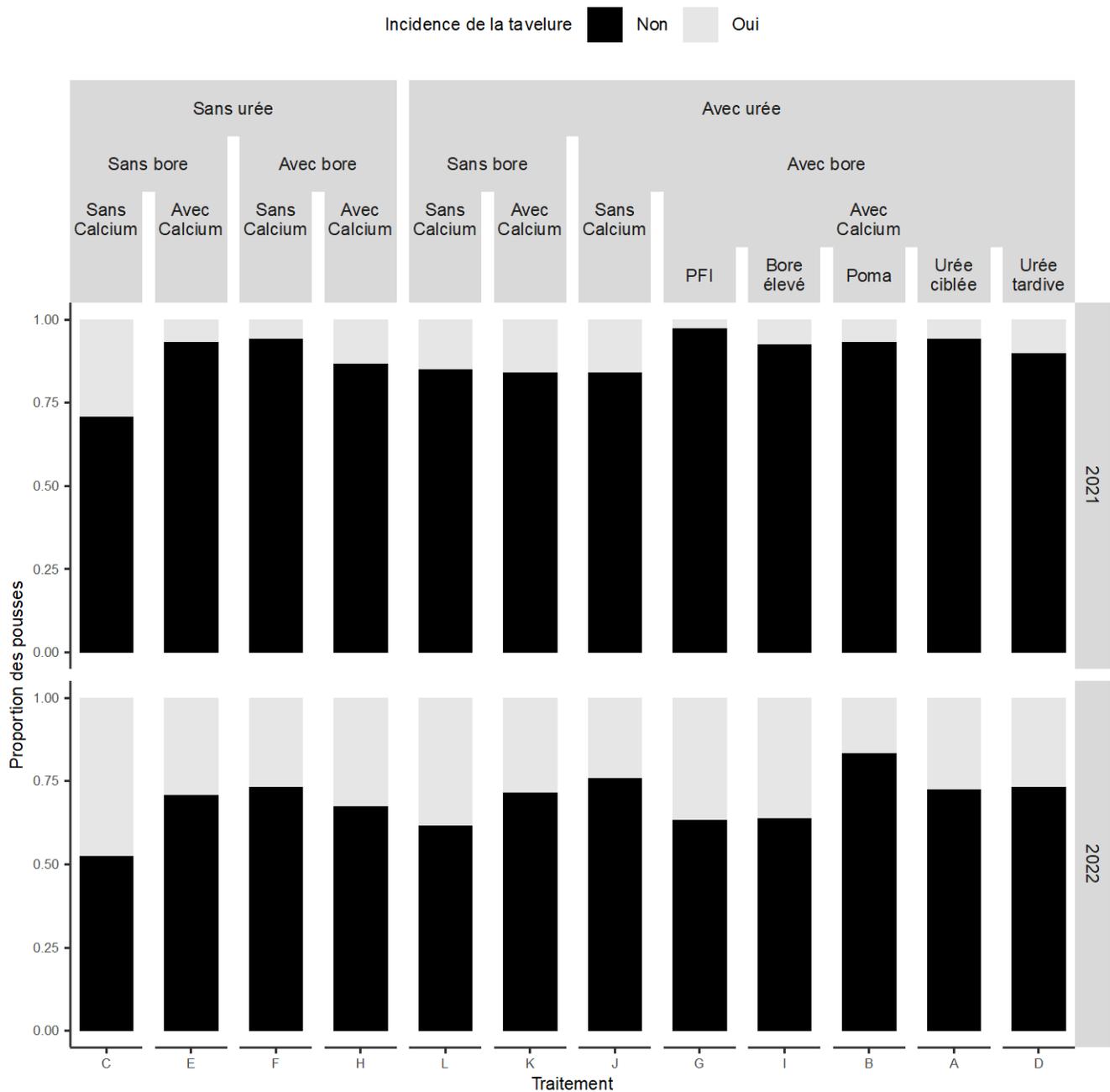


Figure 13. Incidence de la tavelure sur fruits après entreposage prolongé selon le programme de fertilisation foliaire.

En 2021, l'incidence de suie-moucheture a augmenté entre les dates d'échantillonnage en entrepôt. L'effet des engrais a été établi pour les fruits cumulés de toutes les observations. L'analyse a révélé que les trois éléments individuels (GLMER:  $\chi^2 = 44$  (3 df),  $P < 0.001$ ), mais aussi toutes leurs interactions (GLMER:  $\chi^2 = 11.5$  (4 df),  $P = 0.02$ ) avaient un effet sur la maladie. Tous les traitements avec engrais foliaire avaient moins de suie-moucheture que le témoin, à l'exception du traitement avec azote seul qui était similaire au témoin. Le traitement PFI avait le moins de fruits atteints par rapport témoin (OR=0.2,  $z = -5.81$  (1 df),  $P < 0.001$ ). Le calcium sous forme de Poma (OR=1.8,  $z = 1.97$  (1 df),  $P = 0.048$ ),

doubler la dose de bore (OR=2.5,  $z = 2.95$  (1 df),  $P = 0.003$ ) ou maintenir l'azote plus tardivement (OR=2.8,  $z = 3.57$  (1 df),  $P < 0.001$ ) ont eu pour effet d'augmenter la maladie par rapport à la stratégie standard (PFI). Par contre, la suie-moucheture sur les arbres traités en post infection avec l'urée n'étaient pas remarquables par rapport au traitement PFI (OR=1.6,  $z = 1.5$  (1 df),  $P = 0.13$ ). Les autres traitements étaient intermédiaires entre le témoin non traité et la stratégie PFI avec un niveau de suie-moucheture similaire dans les arbres qui ont reçu un seul élément (B, Ca), ou deux éléments (B et N, B et Ca, N et Ca) (OR entre 0.41 et 0.47). La suie n'a pas été observée en 2022.

Malgré une incidence faible de pourriture du cœur (2 à 5%), nous avons observé une légère baisse des symptômes sur les arbres plus chargés (GLMER:  $\chi^2 = 3.9$  (1 df),  $P = 0.049$ ) et possiblement sur les arbres traités avec du calcium (GLMER:  $\chi^2 = 2.4$  (1 df),  $P = 0.12$ , OR = 0.8). L'indice de roussissure était légèrement moindre sur les arbres les plus chargés (CLM: LRT = 6.6 (1 df),  $P = 0.01$ ) et sur les arbres traités avec l'azote (CLM: LRT = 9.6 (1 df),  $P = 0.002$ , OR = 0.5) quoique cet effet était atténué sur les arbres traités aussi avec le calcium (interaction) (CLM: LRT = 7.1 (2 df),  $P = 0.029$ , OR = 0.85).

Ravageurs : Les traitements d'engrais n'ont eu aucun effet notable sur les dommages dus à la mouche de la pomme, des punaises, du charançon ou des lépidoptères en 2021 et les dommages n'ont pas été évalués en 2022.

## DISCUSSION

Des apports annuels foliaires somme toutes assez modestes de N (11 kg/ha), B (0,6 kg/ha) et Ca (7,8 kg/ha) ont eu à la fois des effets sur la teneur minérale des feuilles, des effets physiologiques et des effets sur les maladies qui pouvaient être remarquables pour certains paramètres mesurés. L'observation des effets physiologiques des engrais foliaires n'était pas la motivation principale de ce projet. Cependant, notre objectif d'observer les effets des engrais sur les maladies était tributaire d'un effet normal attendu des engrais sur la physiologie de l'arbre. Pour s'assurer que les résultats des engrais sur les maladies soient applicables en conditions commerciales, les essais ont été faits dans un verger où les teneurs d'engrais étaient normales et où les écarts par rapport aux valeurs de référence (ex : magnésium) ne portaient pas préjudice à la culture. Dans ces conditions, le projet a confirmé que les apports d'engrais foliaire ont un impact mesurable sur la physiologie de l'arbre (ex : croissance) et sur l'incidence des maladies, même si les effets sur le rendement ont été masqués par la variabilité des arbres dans la parcelle. De même, nous avons anticipé voir un effet de l'azote sur les colonies de pucerons, mais il est possible que le niveau d'azote déjà élevé même dans le témoin sans engrais ait pu masquer l'effet classique rapporté dans la littérature.

Les effets observés dans le cadre du projet pour chaque fertilisant foliaire individuel ont pour la plupart été rapportés dans la littérature scientifique. Cependant, c'est la première fois à notre connaissance que l'effet combiné et les interactions issues des recommandations usuelles font l'objet d'un projet. Comme les interactions peuvent parfois annuler l'effet des traitements individuels, les inclure semble incontournable pour appuyer les recommandations agronomiques. Cependant, les relations sont compliquées et les circonstances annuelles comme la pluviométrie peuvent avoir une influence bien plus importante que l'effet des engrais.

En fait, une des hypothèses à l'origine du projet est que le régime de fertilisation foliaire avait un impact majeur sur la probabilité qu'une pousse soit en croissance en cours d'année. Optimiser l'application des fertilisants foliaires aurait pu alors permettre de diminuer la sensibilité des pousses au feu bactérien et à la tavelure. Même si un effet de l'azote et du calcium a été détecté sur ce paramètre en 2021, il s'est avéré mineur pour les quantités appliquées et inverse à celui attendu pour l'azote. Un apport plus élevé

ou plus tardif en azote aurait été nécessaire pour confirmer l'effet délétère, mais ça n'aurait pas été représentatif des pratiques. Il est vraisemblable que le déficit hydrique de 2021 a amplifié l'effet des engrais sur la probabilité qu'une pousse soit encore en croissance en cours de saison et de reprise de croissance quand la pluie est revenue. Si tel est le cas, modifier le régime de fertilisation foliaire pour moduler la fin de croissance n'a aucune utilité agronomique. Les années sèches ne sont pas problématiques pour les maladies et dans les années pluvieuses où il serait utile d'accélérer le bourgeon terminal, les engrais foliaires ne peuvent pas freiner le bourgeon terminal. En fait, la pluie a vraisemblablement eu beaucoup plus d'impact sur la croissance totale observée que les engrais foliaires. Une autre illustration de la complexité est que les mesures d'analyses minérales foliaires reflètent ce que la plante a fixé et nous n'avons pas observé de lien direct entre l'engrais appliqué tant au sol qu'au travers nos traitements foliaires sur le même élément présents dans les feuilles. L'absence de lien direct entre l'application d'un élément et l'analyse minérale foliaire explique probablement en partie pourquoi l'effet des engrais foliaires est parfois jugé négligeable.

Même si un apport ne se traduit pas dans l'analyse minérale, une corrélation très évidente a été mise en évidence entre l'analyse minérale et certains paramètres, comme l'incidence des maladies. Le projet était conçu pour établir un lien de cause à effet entre l'application d'engrais et la réaction de la plante. Les corrélations observées sans égard aux traitements imposés ne suffisent pas à établir la causalité, mais demeurent intéressantes dans la mesure où des projets ultérieurs pourraient les investiguer, notamment dans le cas du zinc. L'effet protecteur du zinc contre les maladies des plantes a déjà été rapporté<sup>13</sup> mais c'est à notre connaissance la première fois que cet effet soit observé pour la tavelure du pommier.

Comme il est possible de manipuler la concentration en zinc des feuilles par des traitements foliaires spécifiques<sup>14</sup>, cette avenue est à explorer. Certains fongicides (Polyram, zineb, ziram) contiennent du zinc et il est possible que l'interaction entre le zinc à la surface des feuilles et l'analyse minérale<sup>14</sup> ait pu masquer l'effet du zinc dans les études antérieures.

Malgré l'effet variable du climat et des interactions complexes entre les traitements de fertilisation, nous avons pu néanmoins dégager certains points. De façon générale, les applications de calcium sous forme de chlorure de calcium et les applications de bore à la dose usuelle avait tendance à réduire la sévérité des maladies, alors que les résultats sont plus mitigés pour l'azote. Les apports de calcium avec Poma ont eu moins d'effet bénéfiques que le chlorure de calcium. Ce résultat était attendu considérant que la quantité de calcium appliquée avec le Poma était moindre qu'avec le chlorure de calcium. En raison des coûts du produit il n'aurait pas été réaliste d'augmenter la quantité de calcium appliquée avec Poma, mais la formulation particulière et l'absence de chlore devaient compenser la moindre teneur en calcium (Baziramakenga, comm. Pers).

À l'inverse, augmenter la dose de bore était généralement néfaste. Le traitement avec applications de bore à dose élevée était inspiré de Arslan<sup>15</sup> qui appliquait l'équivalent de 2.5 kg/ha d'acide borique par hectare. Par contre, les traitements de bore dans leur étude commençaient à la chute des pétales alors que la première application de bore au Québec est recommandée avant la floraison. Comme les excès de bore sont reconnus toxiques, il est possible que les traitements de bore effectués avant la floraison dans notre projet ont pu contribuer à la moindre efficacité observée par rapport aux travaux de Arslan. Il pourrait être utile de tester une approche avec une application de bore à dose moindre avant floraison et à dose élevée après floraison dans un futur projet.

Notre hypothèse que l'urée ciblé diminuerait la tavelure ne s'est pas vérifiée. En 2021 nous avons opté pour des traitements en post infection, mais des essais en marge du projet<sup>16</sup> ont montré que des traitements avant les infections seraient préférables. Cette stratégie ne s'est pas avérée davantage efficace que la stratégie PFI en 2022. Il est possible que la réduction de tavelure obtenue par des applications régulières d'urée foliaire ne puisse pas être améliorée en ciblant les traitements. Finalement,

le projet a permis de confirmer certains des effets délétères des applications tardives d'urée foliaire. En conclusion, même si le programme PFI de référence n'était pas le plus optimal pour tous les paramètres mesurés au cours des deux années (Tableau 2), il s'est avéré le plus résilient. Aucune des variantes n'a présenté d'avantage et la plupart se sont avérées néfastes.

| Année   | Paramètre           | Urée     | Bore     | Calcium  | Bore + Urée | Bore + Calcium | Calcium + Urée | PFI      | Bore élevé | Poma     | Urée ciblée | Urée tardif |
|---|---------------------|----------|----------|----------|-------------|----------------|----------------|----------|------------|----------|-------------|-------------|
| 2021  | État végétatif      | Diminue  |          | Diminue  |             |                |                |          |            |          |             |             |
| 2021  | Croissance annuelle | Augmente | Augmente |          | Augmente    | Augmente       | Augmente       | Augmente | Diminue    |          |             |             |
| 2021  | Fv/Fm               |          |          |          | Augmente    |                |                |          |            |          |             |             |
| 2021  | Chlorophylle        | Augmente |          | Diminue  |             |                |                |          |            |          |             |             |
| 2021  | Tavelure de pousse  | Diminue  | Diminue  | Diminue  | Diminue     | Diminue        | Diminue        | Diminue  | Augmente   |          |             |             |
| 2021  | Blanc               |          | Diminue  | Diminue  |             | Diminue        |                | Diminue  | Augmente   | Augmente |             | Augmente    |
| 2021  | Rouille             |          |          |          |             |                |                |          |            |          |             |             |
| 2021  | Feu bactérien       |          |          | Diminue  |             |                | Diminue        |          |            |          |             |             |
| 2021  | Pression            | Augmente | Augmente |          |             |                |                | Augmente | Diminue    | Diminue  |             | Diminue     |
| 2021  | Couleur             |          |          |          |             |                |                |          |            | Diminue  |             |             |
| 2021  | Tavelure du fruit   |          | Diminue  | Diminue  |             | Diminue        |                | Diminue  |            |          |             |             |
| 2021  | Roussissure         |          |          |          |             |                |                |          |            |          |             |             |
| 2021  | Suie-Moucheture     |          | Diminue  | Diminue  | Diminue     | Diminue        | Diminue        | Diminue  | Augmente   | Augmente |             | Augmente    |
| 2021  | Pourriture du cœur  |          |          |          |             |                |                |          |            |          |             |             |
| 2022  | État végétatif      |          |          |          |             |                |                |          |            |          |             |             |
| 2022  | Croissance annuelle | Augmente |          |          | Augmente    |                | Augmente       | Augmente |            |          |             |             |
| 2022  | Fv/Fm               | Diminue  |          |          |             |                |                |          |            | Diminue  |             |             |
| 2022  | Chlorophylle        | Augmente |          |          |             |                |                |          |            |          |             |             |
| 2022  | Tavelure de pousse  |          | Diminue  | Diminue  |             |                |                | Diminue  |            |          |             |             |
| 2022  | Blanc               |          | Diminue  |          |             | Diminue        |                |          | Augmente   |          |             | Augmente    |
| 2022  | Rouille             | Augmente | Augmente | Augmente | Augmente    | Augmente       | Augmente       |          |            |          |             |             |
| 2022  | Feu bactérien       | Diminue  | Diminue  | Diminue  |             | Diminue        |                |          |            |          |             |             |
| 2022  | Pression            |          | Augmente |          |             | Augmente       |                |          |            |          |             |             |
| 2022  | Tavelure du fruit   |          |          |          |             |                |                |          |            |          |             |             |
| 2022  | Roussissure         |          |          |          |             |                |                |          |            |          |             |             |
| 2022  | Suie-Moucheture     |          |          |          |             |                |                |          |            |          |             |             |
| 2022  | Pourriture du cœur  |          |          |          |             |                |                |          |            |          |             |             |
| Total favorable   |                     |          | 8        | 10       | 8           | 5              | 8              | 5        | 8          | 0        | 0           | 0           |
| Total défavorable   |                     |          | 2        | 1        | 2           | 1              | 1              | 1        | 0          | 6        | 5           | 0           |
| Total neutre  |                     |          | 17       | 16       | 17          | 21             | 18             | 21       | 19         | 21       | 22          | 27          |
| Total neutre ou favorable   |                     |          | 25       | 26       | 25          | 26             | 26             | 26       | 27         | 21       | 22          | 27          |
| La notation pour les traitements de la factorielle est en référence au témoin sans engrais correspondant.                             |                     |          |          |          |             |                |                |          |            |          |             |             |
| La notation pour les 4 traitements en marge de la factorielle sont en comparaison au traitement PFI                                   |                     |          |          |          |             |                |                |          |            |          |             |             |
| L'absence de notation indique que le traitement était neutre, soit qu'il ne se démarquait pas par rapport au traitement de référence. |                     |          |          |          |             |                |                |          |            |          |             |             |
| La notation en caractères gras indique une action favorable.  |                     |          |          |          |             |                |                |          |            |          |             |             |

Tableau 2. Récapitulatif des effets des combinaisons d'engrais foliaires sur les paramètres analysés en cours de projet.

Diffusion :

Un sommaire des résultats de 2021 a été présenté aux journées de la recherche en pomiculture (JARIT) en 2022.

Les faits saillants des deux années ont été présentés lors des journées horticoles de Saint-Rémi en 2022.

<https://www.agrireseau.net/reseaupommier/documents/110108/la-fertilisation-sans-nuire-a-la-phytoprotection>

## RÉFÉRENCES

1. Philion V. La fertilisation sans nuire à la phytoprotection. Réseau-pommier: production fruitière intégrée. 2019. Disponible sur : <https://reseaupommier.irda.qc.ca/?p=19671>.
2. Triloff P, Knoll M, Lind K, Herbst E, Kleisinger S. Low-Loss Spray Application - The scientific basis. In: Julius-Kühn-Archiv Internet 2013.127-34. Disponible sur : <https://ojs.openagrar.de/index.php/JKA/article/view/2354>.
3. Deveau J, Ledebuhr M, Manketel D. Airblast 101. Your guide to effective and efficient spraying. Second edition. Deveau JEd 2021;306 pages.
4. Mehri H, Crabbé J. Processus de croissance et d'organogenèse chez le pommier cv Golden Delicious. BASE 2002;
5. Bounfour M, Tanigoshi LK, Chen C, Cameron SJ, Klauer S. Chlorophyll Content and Chlorophyll Fluorescence in Red Raspberry Leaves Infested with *Tetranychus urticae* and *Eotetranychus carpini borealis* (Acari: Tetranychidae). *Environ Entomol* 2002;31:215-20.
6. Percival GC, Boyle S. Evaluation of film forming polymers to control apple scab (*Venturia inaequalis* (Cooke) G. Wint.) under laboratory and field conditions. *Crop Prot* 2009;28:30-5.
7. Neocleous D, Vasilakakis M. Effects of NaCl stress on red raspberry (*Rubus idaeus* L. 'Autumn Bliss'). *Sci Hortic* 2007;112:282-9.
8. Philion V, Joubert V. Use of a growth regulator (prohexadione-Ca) and summer pruning as post symptom rescue treatments following a fire blight infection during bloom. *J Plant Pathol Springer*, 2021;1-12.
9. Chouinard G, Veilleux J, Pelletier F, et al. Impact of exclusion netting row covers on 'Honeycrisp' apple trees grown under northeastern North American conditions: Effects on photosynthesis and fruit quality. *Insects* 2019;10:214.
10. DeLong JM, Prange RK, Harrison PA, Schofield RA, DeEll JR. Using the Streif Index as a final harvest window for controlled-atmosphere storage of apples. *HortScience American Society for Horticultural Science*, 1999;34:1251-5.
11. Philion V, Joubert V. Use pattern and limits of potassium bicarbonate for apple scab control in Quebec orchards. *IOBC-WPRS Bull* 2015;110:199-212.
12. Legendre P, Legendre L. *Numerical Ecology*. Elsevier, 2012.
13. Cabot C, Martos S, Llugany M, Gallego B, Tolrà R, Poschenrieder C. A Role for Zinc in Plant Defense Against Pathogens and Herbivores. *Front Plant Sci* 2019;10:1171.
14. Peryea FJ. Phytoavailability of Zinc in Postbloom Zinc Sprays Applied to Golden Delicious' Apple Trees. *HortTechnology* 2006;16:60-5.
15. Arslan U. Efficacy of Boric Acid, Monopotassium Phosphate and Sodium Metabisulfite on the Control of Apple Scab. *J Phytopathol* 2016;164:678-85.
16. Philion V, Joubert V, Trapman M, Stensvand A. Physical Modes of Action of Fungicides Against Apple Scab: Timing is Everything, but Dose Matters. *Plant Dis Internet Scientific Societies*, 2023; Disponible sur : <https://apsjournals.apsnet.org/doi/abs/10.1094/PDIS-11-22-2758-RE>.