

PoirOAD

Suivre et orienter la nutrition du poireau normand et sa
qualité par la mise en place d'outils d'aide aux
diagnostics innovants

2020-2023

Rapport de synthèse

PROJET REALISE DANS LE CADRE DE LA MISE EN ŒUVRE ET DEVELOPPEMENT DE COOPERATIONS

Sous-mesure 16.02

Projets pilotes, nouveaux produits, pratiques, procédés et techniques dans les secteurs agricoles,
alimentaires et sylvicoles/ soutien aux groupes opérationnels dans le cadre du Partenariat Européen
pour l'Innovation (PEI)

Programmes de Développement Rural FEADER 2014-2020

Calvados, Manche, Orne

Philippe D'HOOGHE, Docteur en Sciences Agronomiques, Biotechnologies Agroalimentaires de
l'Université de Caen – Ingénieur SILEBAN

2022

Sommaire

Résumé.....	3
I. Introduction.....	4
II. Essais en conditions contrôlées	6
II.1. Matériel et méthodes	6
II.1.a. Démarche expérimentale	6
II.1.b. Culture de poireaux en conditions contrôlées.....	6
II.1.c. Suivi par les appareils de mesure.....	8
II.1.d. Récoltes et échantillonnage.....	9
II.1.e. Analyses élémentaires et biochimiques des échantillons	9
II.1.f. Traitement des données	10
II.2. Résultats.....	11
II.2.a. Croissance et symptômes de carence	11
II.2.a. Impact des traitements sur la composition élémentaire et biochimique des poireaux.....	12
II.2.b. Le Multiplex : évolution et réponse des indices aux situations nutritionnelles contrastées imposées	14
II.2.c. L'analyseur XRF.....	16
II.2.d. Le NIRS : suivi de la réflectance et calibration aux données élémentaires et biochimiques.....	23
III. Essais en conditions de production	29
III.1. Matériel et méthodes	29
III.1.a. Démarche expérimentale	29
III.1.b. Cultures de poireaux en conditions de production.....	29
III.1.c. Collecte d'échantillons, suivi et analyse de données.....	33
III.1.d. Analyse des données collectées.....	34
III.2. Résultats.....	36
III.2.a. Suivi météorologique	36
III.2.b. Impact des modalités sur le rendement total, commercialisable et la qualité sanitaire	38
III.2.c. Impact des modalités de fertilisation sur la composition élémentaire et biochimique des poireaux.....	42
III.2.d. Le Multiplex : évolution et réponse des indices aux situations nutritionnelles contrastées (Essai 2021).....	48
III.2.e. Le XRF (Essai 2021)	49
III.2.f. Le NIRS.....	53
IV. Conclusion, discussion et perspectives.....	62
IV.1. Les essais ont amélioré les connaissances concernant la gestion des nutriments par le poireau cultivé.....	62
IV.2. Suivi du statut nutritionnel du végétal par les outils évalués	65
IV.3. Ajuster les apports aux besoins de la culture par le fractionnement et avec l'aide des outils évalués.....	66
IV.4. Optimiser l'utilisation des outils évalués afin de développer des outils fiables à moyen ou long terme pour ajuster la fertilisation.....	67
V. Annexes.....	69
V.1. Figures supplémentaires	69
V.2. Annexe 1 : Indicateurs de réalisation des actions du projet.....	72

Résumé

La fertilisation du poireau doit être adaptée selon les besoins de la culture, et à ce jour, la méthode du bilan demeure la seule permettant d'estimer ces besoins à la mise en place de la culture. Nous savons depuis maintenant longtemps que des apports excessifs de fertilisants ont des impacts négatifs majeurs sur l'environnement, le sol et les cultures. De plus, le prix des fertilisants atteint des sommets ces dernières années, et pèse toujours davantage sur le coût de production. Dans ce contexte, raisonner la fertilisation au plus juste des besoins de la culture doit se faire afin de satisfaire à l'exigence d'une agriculture durable. Le projet PoirOAD a permis d'apporter des résultats fondamentaux pour atteindre cet objectif. Des essais en conditions contrôlées et en conditions de production impliquant des apports de nutriments contrastés ont été suivis afin d'étudier la gestion des éléments nutritifs par le poireau et d'évaluer le potentiel d'appareils de mesures basés sur des technologies récentes pour qualifier le statut nutritionnel de la plante en cours de culture.

Ajuster la fertilisation aux besoins permet de gagner en rendement et en qualité

L'azote demeure l'élément essentiel à considérer dans le cadre d'une fertilisation ajustée aux besoins du poireau, même si les autres éléments ne sont pas à négliger. Un fractionnement de la fertilisation est à privilégier par rapport à un seul apport à la plantation, le rendement sera maintenu voire augmenté et l'azote apporté sera mieux valorisé dans le produit récolté. Une légère réduction de dose par rapport à la préconisation de la méthode du bilan est même envisageable avec cette technique sans affecter le rendement.

S'aider des outils évalués en soutien de la méthode du bilan pour optimiser la fertilisation

Le XRF et le NIRS évalués dans le cadre du projet PoirOAD ont révélé des potentiels très intéressants pour piloter la fertilisation du poireau. Le XRF employé sur tissus séchés permet de déterminer les teneurs en de nombreux éléments de manière fiable, et a démontré avec ce mode d'usage son potentiel pour le suivi de la nutrition en P, K, S mais aussi en oligoéléments. Le NIRS employé sur tissus séchés en cours de culture peut constituer un excellent moyen pour évaluer le niveau de nutrition azotée de la culture et statuer sur l'éventualité d'une fertilisation supplémentaire. Selon nos observations, la fenêtre d'analyse optimale se situe pour cet appareil après 2 mois de culture environ, pour un apport de fertilisant éventuel au début du troisième mois. Le NIRS pourrait également être employé afin de sélectionner les variétés adaptées aux situations de disponibilité en azote limitante, via un référencement des variétés dans des conditions de fertilisation contrastées.

Au terme de ce projet, la gestion des nutriments par le poireau est désormais mieux connue, des outils de suivi du statut nutritionnel utilisables de manière simple et à moindre coût sont maintenant à portée de déploiement en plein champ et les résultats obtenus permettent déjà d'émettre des propositions d'améliorations par rapport à l'existant.

I. Introduction

Les producteurs de légumes s'appuient principalement sur des méthodes statiques pour gérer leurs fertilisations (analyses de sol et bilan N avant culture). En cours de culture, des méthodes basées sur des analyses de terre (ex. Grille Zénith sur poireau) ou sur l'analyse du jus pétioleaire (ex. Pilazo®) peuvent être employées, mais ces outils présentent de nombreux inconvénients (mise en œuvre difficile, imprécision, manque de références fiables...) et ne sont pas adaptés à toutes les cultures. Les grilles Zénith développées pour le poireau apportent des conseils de fertilisation azotée fonction du stade de développement de la culture à partir d'une analyse du reliquat N au sol à ce stade. Cependant, sa mise en œuvre dans des conditions de production demeure difficile. Dans ce contexte, le projet PoirOAD vise à évaluer, sur des cultures de poireaux, différents appareils portables afin de développer de nouveaux outils d'aide à la décision permettant aux producteurs de légumes d'améliorer la gestion de leurs engrais N, P, K, S, Mg.

Différents capteurs et appareils de mesures sont actuellement employés sur grandes cultures et plus rarement sur cultures légumières. Parmi ces appareils, on retrouve par exemple des outils de mesure de la réflectance du végétal, tel les capteurs multispectraux (e.g. : Parrot Sequoia de Parrot Drones SAS, Yara N-Sensor® de Yara) – pouvant être fixés sur un drone ou une aile volante, ou encore un satellite – qui permettent de collecter sur des parcelles en cours de culture des indices de végétation (NDVI, NDRE...) pouvant être associés à un niveau de biomasse ou à des paramètres physiologiques de la culture comme sa teneur en chlorophylles. Ces capteurs, généralement employés afin d'ajuster les apports en azote en cours de culture ne sont cependant pas adaptés à tous types de cultures, et les relations présentées entre les indices collectés et l'état nutritionnel du végétal peuvent être remises en cause : les différences d'indices observées peuvent en réalité ne pas être associées à la nutrition azotée. Sur certaines cultures légumières, la méthode Pilazo® - développée par le CTIFL et l'INRAE¹ - reposant sur des mesures du nitrate contenu dans le jus pétioleaire, peut être employée afin d'ajuster la nutrition azotée en cours de cultures.

D'autres appareils transportables en plein champ sont disponibles actuellement et pourraient être potentiellement utilisés pour optimiser la fertilisation des cultures légumières. Le projet PoirOAD, dans sa 1^{ère} action, avait pour objectif d'identifier des appareils présentant un potentiel intéressant pour optimiser la fertilisation du poireau. Trois appareils, reposant sur des technologies différentes, ont ainsi été identifiés et sélectionnés afin d'être évalués dans le cadre du projet : deux capteurs optiques, un fluorimètre (Multiplex® de Force A) ainsi qu'un spectrophotomètre proche infrarouge (NIRS pour "Near InfraRed Spectrometer", ASD LabSpec® 4 haute résolution de Malvern Panalytical) et un analyseur élémentaire, fluorimètre à rayons X (S1 Titan® de Bruker).

Ces trois appareils sont basés sur des technologies différentes et sont utilisés pour des problématiques variées. Alors que le Multiplex a été développé pour apporter spécifiquement des informations sur la végétation, le capteur NIRS et l'analyseur XRF trouvent surtout des utilisations dans d'autres domaines

¹ PILazo® - GESTION PRATIQUE DE L'AZOTE - Christiane RAYNAL-LACROIX (CTIFL) - Patricia ERARD (CTIFL) - Jacques LE BOT (Inra). ISBN : 2-87911-226-5

d'application (géologie, pédologie, environnement), mais ne sont actuellement pas ou peu utilisés à des fins agronomiques. Par rapport aux méthodes actuelles, les mesures réalisées par ces trois appareils pourraient être complémentaires afin d'évaluer de manière plus rapide, exhaustive et fiable le statut nutritionnel du végétal. De plus, l'analyseur XRF et le NIRS pourraient potentiellement être employés afin d'analyser le contenu élémentaire des sols cultivés et/ou des apports de fertilisants d'origine organique et permettre ainsi de maîtriser les apports de macro- et micro-éléments utiles au bon développement de la culture. Le développement d'outils d'aide à la décision à partir des données collectées par ces appareils repose sur (i) leur facilité d'utilisation et de prise en main, (ii) leur capacité à identifier des statuts nutritionnels contrastés et à détecter une carence nutritionnelle de manière précoce et fiable, à différents stades de culture et dans différentes conditions, (iii) la fiabilité, la précision et la facilité d'utilisation des outils mathématiques et informatiques associés permettant une prise de décision sans risque.

Afin d'apporter les premières pierres à ce développement méthodologique, un essai en conditions contrôlées a été mené sur une culture de poireaux. Les impacts des restrictions en N, P, K ou S après une période de nutrition pléthorique ont été suivis par l'apparition de symptômes de stress visuels pendant le développement des plantes et par l'analyse des données collectées en cours de culture par les appareils évalués. A différents temps de récolte, des analyses du contenu élémentaire ont été réalisées par des méthodes destructives classiques (IRMS, ICP-MS²) et comparées aux mesures collectées par les appareils évalués. Ces essais ont pour objectif d'évaluer les potentialités de chacun de ces appareils, d'identifier des indices et variables d'intérêt et d'établir pour certaines d'entre elles des premiers référentiels nécessaires à l'élaboration des outils d'aide à la décision visés par le projet. Des essais en condition de production ont ensuite été réalisés afin de valider les observations réalisées en conditions contrôlées et d'évaluer le potentiel de ces outils à suivre et à piloter la fertilisation du poireau en plein champ.

² Nous remercions la plateforme PLATIN' (PLATeau d'Isotopie de Normandie), pour la réalisation des analyses élémentaires et isotopiques utilisées dans cette étude.

II. Essais en conditions contrôlées

II.1. Matériel et méthodes

II.1.a. Démarche expérimentale

Afin d'évaluer la capacité des outils identifiés à détecter de manière spécifique et précoce une carence nutritionnelle en un élément donné dans le but d'ajuster les apports en cet élément, un essai a été réalisé en conditions contrôlées. Des carences minérales en N, P, K et S ont été appliquées à une culture de poireaux après une période d'alimentation pléthorique et les plantes ont ensuite été suivies à l'aide des outils évalués. L'essai a également permis de caractériser les symptômes visuels et les altérations de croissance et de développement associés à chaque carence nutritionnelle. Deux récoltes ont été effectuées en cours de carence afin de mettre en évidence ces différences de croissance et de générer des échantillons aux contenus contrastés en minéraux. Ces échantillons, analysés par les outils testés dans le cadre du projet, ont également été analysés par IRMS et ICP-MS afin d'en déterminer leur contenu élémentaire. La comparaison et l'exploitation des données collectées, étapes particulièrement importantes dans le cadre du projet, permettent l'évaluation et la calibration des outils testés.

II.1.b. Culture de poireaux en conditions contrôlées

Les poireaux (cv. Poulton) placés en conditions contrôlées ont été semés et cultivés dans un premier temps dans des conditions optimales d'apport en minéraux puis soumis à des carences nutritionnelles en N, P, K ou S et récoltés aux dates et temps indiquées dans le Tableau 1. Les plantes ont été cultivées dans la serre de l'INRAe (Campus 1, Université Caen Normandie) dans des conditions de températures et d'éclairement contrôlées (photopériode de 16h, températures de 20°C le jour et 15°C la nuit).

Tableau 1 : Dates des semis, des applications de traitements et des récoltes effectués pour les cultures de poireaux en condition contrôlées.

Action	Date	Temps depuis semis en jours	Temps depuis carence en jours
Semis	15/10/2020	0	-95
Repiquage	16/12/2020	62	-33
« Buttage n°1 »	04/01/2021	81	-14
Application carences	18/01/2021	95	0
« Buttage n°2 » avec manchons	01/02/2021	109	14
Récolte n°1	18/02/2021	126	31
Récolte n°2	16/03/2021	152	57

L'essai a été mené durant 152 jours (Tableau 1). Les poireaux ont d'abord été semés en terrine dans un terreau de semis pendant 62 jours avant d'être repiqués (Figure 1A). Les jeunes plants ont été repiqués au stade 4 feuilles à raison de 2 poireaux par pot de 4L, espacés régulièrement (Figure 1B). Afin d'assurer le bon développement d'un blanc de poireau, les plants ont été buttés à deux reprises : à l'aide de sable 81 jours après le semis et avec des manchons en PVC 109 jours après le semis (Figure 1C,D). La culture a été alimentée avec une solution nutritive contenant l'ensemble des éléments

nécessaires au bon développement des plantes (Control) depuis le semis et durant une période de 95 jours, avant d'atteindre le stade 8 feuilles. A ce stade, des carences en N, P, K ou S ont été appliquées selon un dispositif en blocs aléatoires complets durant 57 jours (Figure 1E,F). La composition des solutions nutritives employées est donnée dans le Tableau 2.

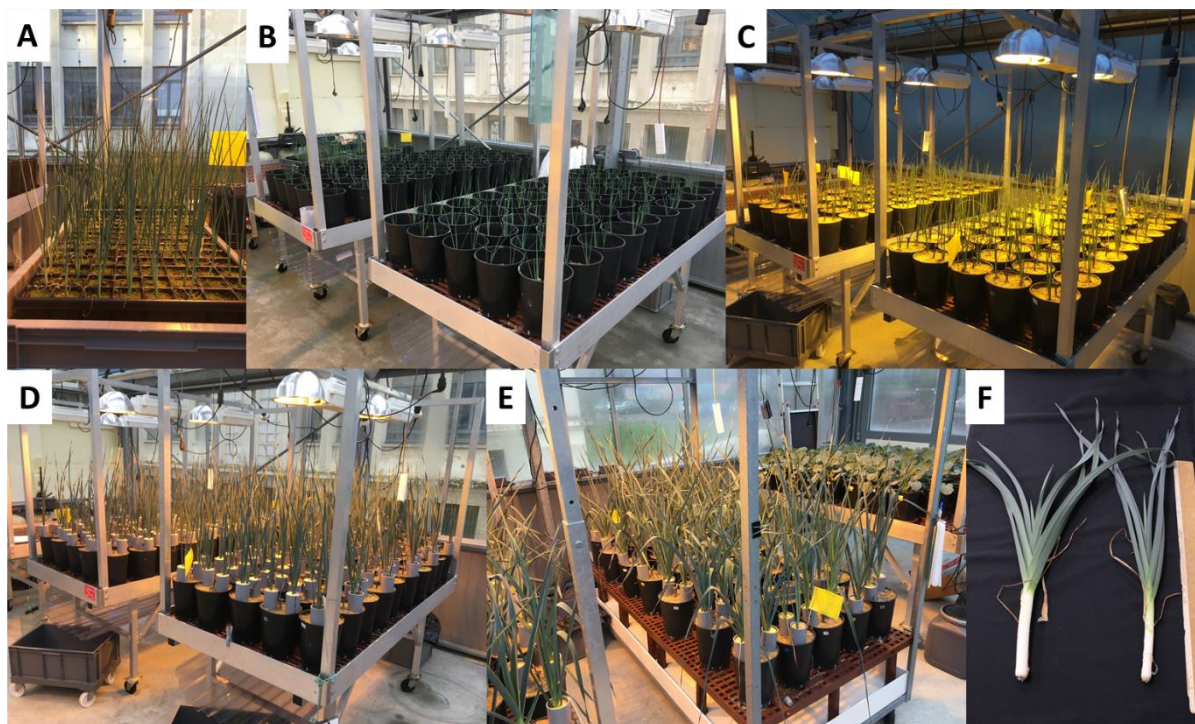


Figure 1 : Photographies de l'essai à des étapes clés de son suivi. A : plants de poireaux en terrine le 16/12/2020, jour du repiquage. B : le 16/12/2020, après repiquage. C : le 04/01/2021, jour du premier buttage. D : le 18/02/2021, jour de la première récolte (31 jours après application des carences). E : le 16/03/2021, jour de la seconde récolte (57 jours après application des carences). F : poireaux cultivés en condition Control, le 16/03/2021, jour de la seconde récolte.

Tableau 2 : Composition des solutions nutritives utilisées pour alimenter la culture de poireaux en conditions contrôlées. La solution « Control » est basée sur un ratio N-P-K est de 15-5-20. La teneur en Cl diffère en fonction des solutions nutritives car cet élément est apporté par les sels permettant l'ajustement de la solution (ex : le $MgSO_4$ est remplacé par du $MgCl_2$ dans la solution carencée en S, permettant de maintenir la concentration en Mg).

Element apporté	Traitement					Unité
	Control	N	P	K	S	
N	3,75	0	3,75	3,75	3,75	mM
P	0,55	0,55	0	0,55	0,55	mM
K	1,8	1,8	1,8	0	1,8	mM
S	0,5	0,5	0,5	0,5	0	mM
Cl	0,2	1,45	0,75	0,2	0,7	μ M
Mg	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	mM
Ca	2,13	2,13	2,13	2,15	2,13	mM
B	14	14	14	14	14	μ M
Mn	5	5	5	5	5	μ M
Fe	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	μ M
Cu	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	μ M
Zn	3	3	3	3	3	μ M
Mo	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	μ M
Na	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	μ M
Co	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	μ M

II.1.c. Suivi par les appareils de mesure

La culture a régulièrement été suivie par les appareils de mesure évalués dans le cadre du projet. Le principe de fonctionnement de ces appareils est décrit dans les « fiches techniques » réalisées dans le cadre du projet Nutrinov et présentées en Annexe 1. Alors que le Multiplex a été utilisé sur plantes entières (positionné à 5-10 cm de la canopée), le XRF ainsi que le NIRS ont été employés afin de suivre spécifiquement les rangs foliaires 6 (feuille présente et pleinement développée à la date de début de carence) et 8 (feuille jeune à la date de début de carence), ainsi que sur le blanc aux deux dates de récolte. Le nombre de mesures effectuées par chacun de ces appareils sur tissu frais en cours de culture et sec après récolte est indiqué dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Nombre de mesures effectuées par les appareils évalués sur tissu frais et secs de poireaux Chaque analyse réalisée par le Multiplex correspond dans les faits à la moyenne de 3 mesures ponctuelles. Feuille âgée : rang foliaire n°6 ; feuille jeune : rang foliaire n°8

	Multiplex	XRF						NIRS					
		Frais			Sec*			Frais			Sec		
		Feuille agée	Feuille jeune	Blanc	Feuille agée	Feuille jeune	Blanc	Feuille agée	Feuille jeune	Blanc	Feuille agée	Feuille jeune	Blanc
05/01/2021	35	5						5					
12/01/2021	35	10						5					
19/01/2021	40	5	5					5	5				
26/01/2021	35	25	25					25	25				
01/02/2021	25	25	25					25	25				
09/02/2021	35	25	25										
18/02/2021	25	25	25		50	50	50	25	25	25	25	25	25
08/03/2021	30												
15/03/2021	25												
16/03/2021	25	25	25		50	50	50	25	25	25	25	25	25
Total	310	145	130	0	100	100	100	115	105	50	50	50	50
Total appareil	310	575						420					

*Les mesures XRF sur matériel sec ont été répétées 2 fois sur chaque échantillon

Le Multiplex a été employé en mode « Mesure simple », entre 10h et 13h et après extinction des lampes de la serre. Après 7 à 10 mesures du bruit de fond sur tissu noir, 3 mesures ont été réalisées pour chaque plante de l'essai, le capteur étant placé à 5-10 centimètres de la végétation.

Les mesures XRF et NIRS sur feuilles de poireaux sont réalisées au milieu du limbe. Le stand de protection portable ne permettant pas de placer les feuilles de poireaux devant le détecteur du système XRF, un support a dû être spécialement conçu afin de réaliser les mesures. Des mesures XRF et NIRS ont également été effectuées sur les blancs de poireaux les jours de récoltes.

II.1.d. Récoltes et échantillonnage

Les poireaux ont été récoltés après 31 et 57 jours de traitement (n=5 répétitions par traitement à chaque date de récolte). A chaque récolte, l'impact des carences sur le développement des plantes a été évalué par des mesures de surface foliaire et de biomasse fraîche et sèche des différents organes.

Voici la liste des opérations effectuées à ces temps de récoltes :

- Mesure Multiplex (Figure 2A)
- Photos des plantes avant récolte
- Comptage du nombre de feuilles
- Séparation des organes (Rangs foliaires 5, 6, 7, 8 et pool des rangs foliaires n°9 et au-delà, vert, blanc, racines)
- Détermination de la surface des différents rangs foliaires (Figure 2B)
- Pesées de la matière fraîche des différents organes
- Mesure XRF et NIRS sur les rangs foliaires 6 et 8 ainsi que sur des rondelles de blanc fraîches (Figure 2C,D).
- Séchage des différents organes ou d'un aliquote des différents organes (lyophilisation des rangs foliaires 6, 8 et du blanc et séchage à l'étuve des autres organes)
- Pesées de la matière sèche.

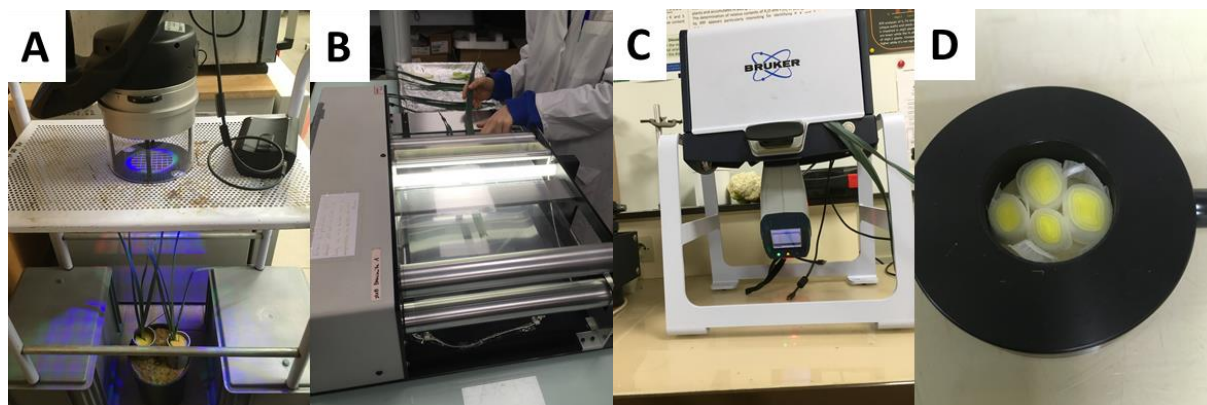


Figure 2 : Photographies des appareils en cours de mesure à la première récolte. A : le Multiplex en cours de mesure sur un pot de poireaux, positionné à 5-10 cm de la végétation. B : les feuilles séparées sont passées au planimètre afin d'en déterminer la surface. C : l'analyseur XRF en cours de mesure sur un limbe de poireau, positionné dans son stand de protection portable. D : des rondelles de blanc de poireau positionnées dans le système NIRS de paillasse.

II.1.e. Analyses élémentaires et biochimiques des échantillons

Des échantillons séchés et broyés au broyeur à bille (fréquence 30, 2 min) de feuilles 6, 8 et de blancs de poireaux ont été analysées par ICP-MS et IRMS³. Alors que la teneur en N a été déterminée par IRMS, de nombreux autres éléments ont pu être quantifiés par ICP-MS dans ces échantillons, parmi lesquels le P, le K, le S, le Mg et le B. Des analyses de teneurs en acide ascorbique, polyphénols et de capacité antioxydantes par méthode ORAC et FRAP ont également été réalisées sur des échantillons de blancs de poireaux lyophilisés⁴.

³ Analyses réalisées sur la plateforme PLATIN' - de l'Université de Caen Normandie

⁴ Analyses réalisées par le laboratoire CEDEVIT de l'Université de Liège

II.1.f. Traitement des données

Les données ont été analysées à l'aide du logiciel R (version 4.1.2, 2021-11-01). Des tests de Wilcoxon et de Newman-Keuls ont été réalisés afin de mettre en évidence les différences entre traitements. Les relations entre les données acquises par les appareils évalués et les analyses effectuées par IRMS et ICP-MS ont été mises en évidence par des régressions linéaires. Les équations issues des relations établies de manière suffisamment fiable (coefficient de corrélation arbitrairement fixé à $R \geq 0.6$ ou $R \leq -0.6$ avec une probabilité $p < 0.05$), qui peuvent servir de bases au développement des outils d'aide à la décision visés par le projet, nécessitent d'être validées, affinées, voire adaptées pour d'autres conditions (variétés, terroirs, pratiques culturales).

II.2. Résultats

II.2.a. Croissance et symptômes de carence

Les symptômes de carences élémentaires ont été peu visibles au niveau foliaire, excepté pour la carence en N qui s'est rapidement traduit par une limitation de la croissance foliaire et une altération du développement de nouvelles feuilles (Figure 3).

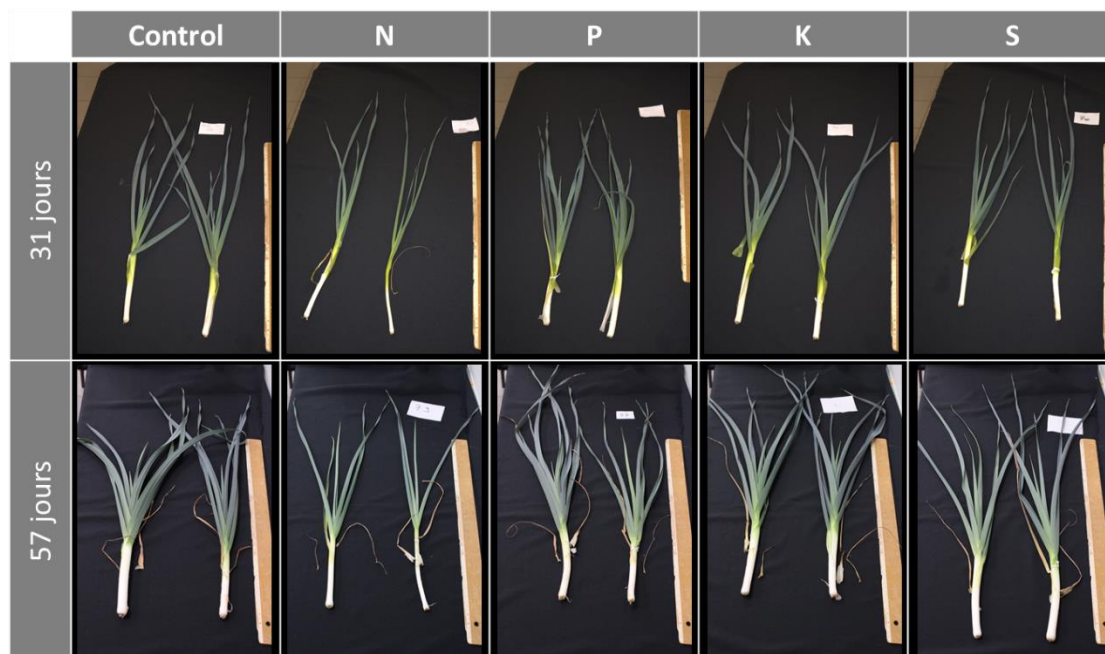


Figure 3 : Photographies des poireaux récoltés après 31 et 57 jours de carences en N, P, K ou S en conditions contrôlée

La carence en N a en effet eu un impact significatif sur le nombre de feuilles et la longueur des poireaux après 57 jours de traitement et sur le diamètre des poireaux récoltés après 31 et 57 jours de traitement (Figure 4). Les carences en P, K ou S n'ont pas significativement affectés ces variables.

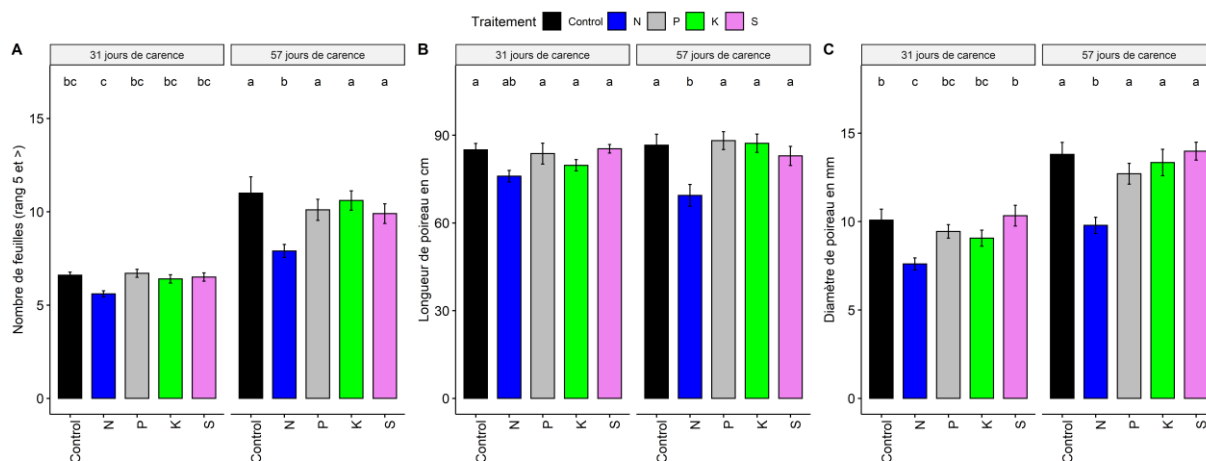


Figure 4 : Impact des carences en N, P, K ou S sur le nombre de feuilles par plante (A), la longueur (B) et le diamètre du fût (C) des poireaux cultivés en condition contrôlée

De façon plus détaillée, la carence en N a eu un impact significatif sur la biomasse et la surface foliaire, principalement associé au développement des feuilles les plus jeunes. La biomasse racinaire n'a

cependant pas été affectée par la carence en N. Les poireaux cultivés dans des conditions de carence en P, K ou S durant 57 jours ne présentent pas de différence significative de développement par rapport au témoin.

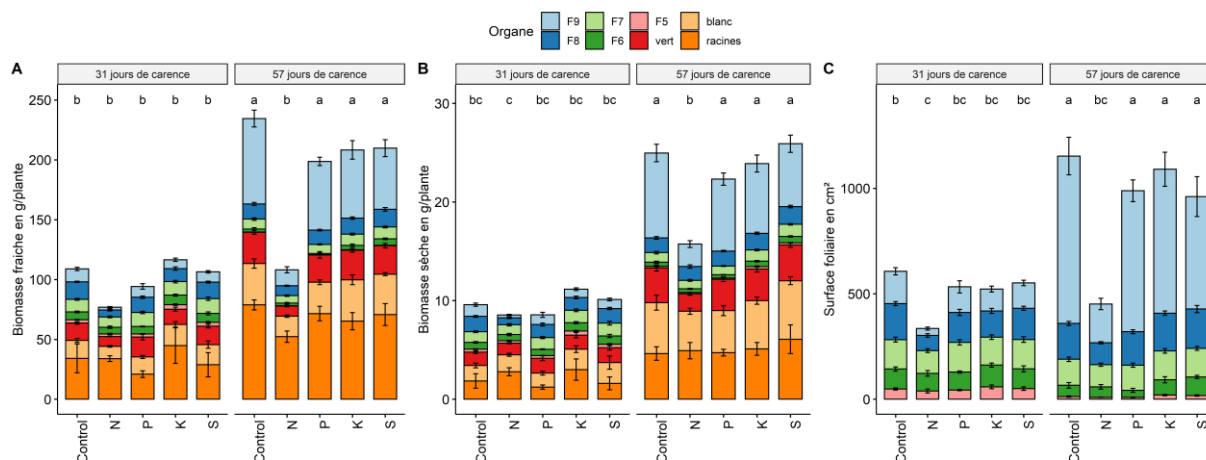


Figure 5 : Impact des carences en N, P, K ou S sur la biomasse fraîche (A), sèche (B) et la surface foliaire (C) des différents organes des poireaux cultivés en condition contrôlée.

11.2.a. Impact des traitements sur la composition élémentaire et biochimique des poireaux

Les analyses réalisées sur les échantillons de feuilles et de blancs récoltés ont permis de caractériser l'impact des traitements sur la composition élémentaire et biochimique des poireaux cultivés en conditions contrôlées (Figures 6 et 7). Les carences en N, P, K ou S ont respectivement impacté les teneurs en N, P, K et S au niveau des différentes parties analysées (Figure 6). Les traitements appliqués affectent davantage les teneurs en éléments au niveau des feuilles jeunes (rang foliaire n°8) qu'au niveau des feuilles âgées (rang foliaire n°6). La carence en N a également diminué les teneurs en P et S au niveau du blanc et des feuilles. De façon intéressante, la carence en S a eu un impact négatif sur les teneurs en S au niveau du blanc, alors que les teneurs mesurées au niveau foliaire sont maintenues à des valeurs comparables au Control. A contrario, la carence en P a réduit les teneurs en S au niveau foliaire, sans modifier les teneurs mesurées au niveau du blanc de poireau qui sont comparables au Control au niveau du blanc.

Des différences de teneurs en acide ascorbique, polyphénols et de capacité antioxydante (mesurée par méthode ORAC et FRAP) ont également été mis en évidence au niveau des blancs de poireaux en réponse à certains traitements appliqués en conditions contrôlées (Figure 7). Alors qu'on observe une accumulation d'acide ascorbique après 31 jours de carence en P, les carences en N et S ont abaissé la capacité antioxydante (mesurée par la méthode ORAC) à 31 jours et la teneur en polyphénols à 57 jours. La capacité antioxydante (mesurée par la méthode FRAP) est également réduite au niveau du blanc après 57 jours de carence en N.

Ainsi, l'essai a bien permis de générer des échantillons au contenu contrasté en N, P, K et S, correspondant aux différents traitements appliqués et de mettre en évidence les déséquilibres physiologiques générés par des carences élémentaires spécifiques.

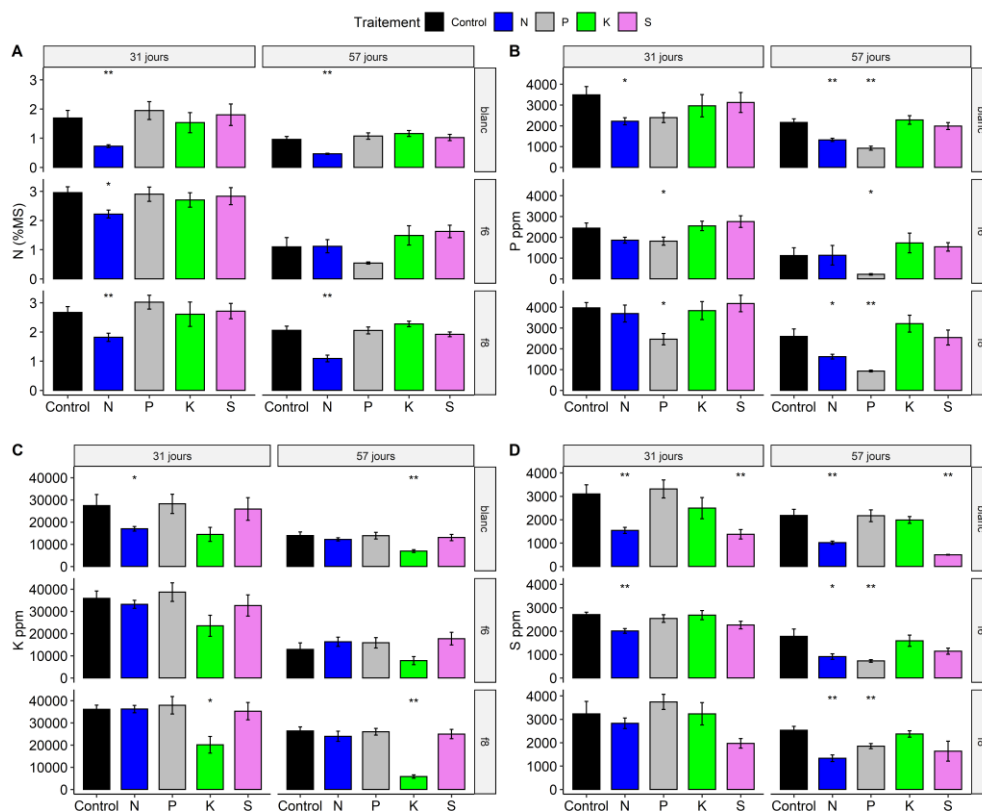


Figure 6 : Teneurs en azote (A), phosphore (B), potassium (C) et soufre (D) analysées par IRMS et ICP-MS dans les échantillons de blancs et de feuilles de poireaux récoltés après 31 et 57 jours de carence.

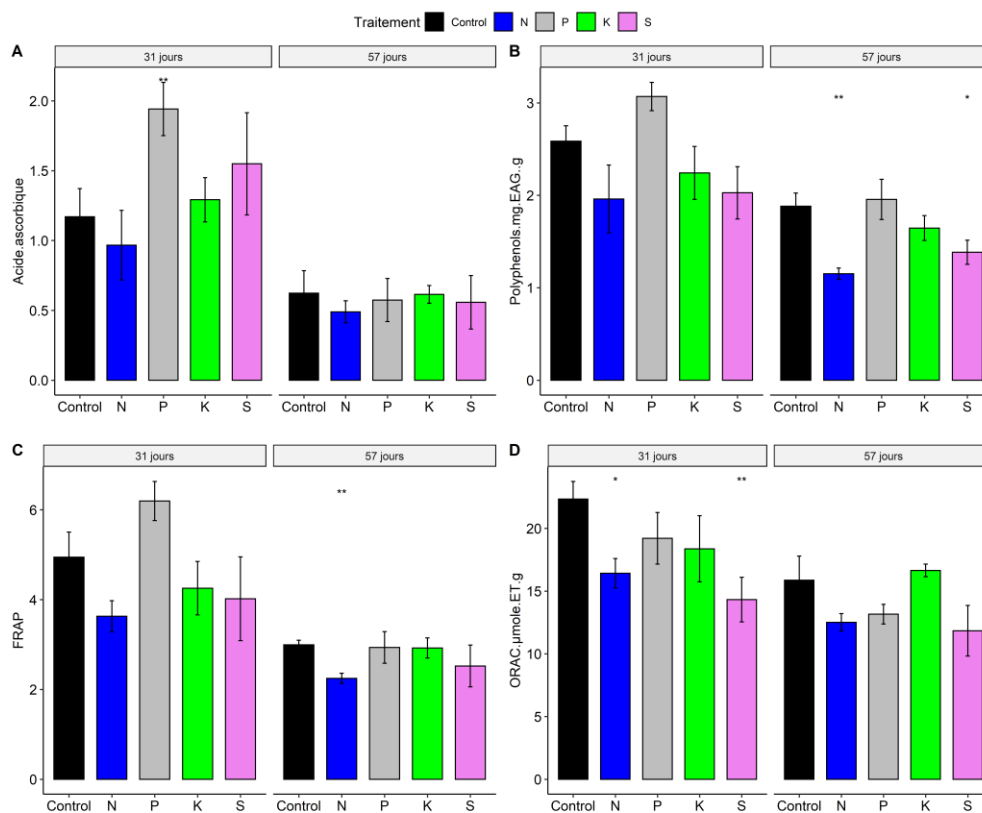


Figure 7 : Teneurs en acide ascorbique (A), en polyphénols (B) et capacité antioxydante mesurée par la méthode FRAP (C) et ORAC (D) déterminées dans les échantillons de blancs de poireaux récoltés après 31 et 57 jours de carence.

II.2.b. Le Multiplex : évolution et réponse des indices aux situations nutritionnelles contrastées imposées

La figure 8 présente l'évolution des indices donnés par le Multiplex (SFR : indice de chlorophylles, ANTH : indice d'anthocyanes, FLAV : indice de flavonols, NBI : Nitrogen Balance Index ou indice du statut azoté). Les indices répondent de manière relativement tardive aux carences, et de manière plus spécifique à la carence en N mais ne présentent pour autant aucune différence significative en fonction du traitement (Figure 8, Tableau 4). Le Multiplex a tout de même fait l'objet d'une évaluation sur le premier essai en condition de plein champ en 2021 afin de valider ou non les observations réalisées en conditions contrôlées.

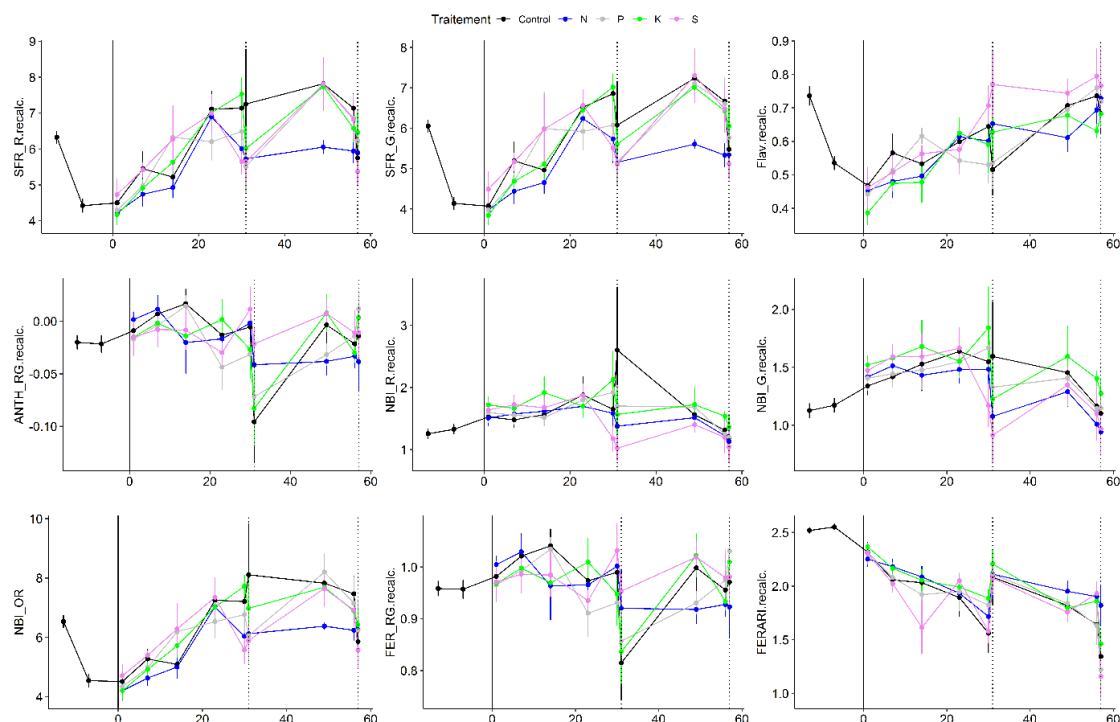


Figure 8 : Evolution des indices calculés à partir des données acquises par le Multiplex durant la culture de poireaux menée en condition contrôlée. La ligne verticale pleine indique le jour de début des carences, soit 95 jours après le semis. Les lignes pointillées indiquent les jours auxquels des récoltes ont été effectuées, soit après 31 et 57 jours de carences. Les indices « SFR_R » et « SFR_G » sont associés théoriquement à une teneur relative en chlorophylles, l'indice « Flav. » à une teneur relative en Flavonols, l'indice « ANTH_RG » à une teneur relative en anthocyanes, les indices « NBI » (pour « Nitrogen Balance Index ») à différents indices de nutrition azotée et l'indice « FER » à une teneur relative en Ferrédoxine.

Tableau 4 : Résultats des tests de Newman-Keuls réalisés sur les indices du Multiplex déterminés au cours du temps dans les différentes conditions de nutrition appliquées sur la culture de poireau menée en condition contrôlée.

Indices	Traitement	Temps en condition de carence en jours								
		1	7	14	23	30	31	49	56	57
SFR_R.recalc.	Control	bc	abc	abc	abc	abc	abc	a	abc	abc
	N	c	abc	abc	abc	abc	abc	abc	abc	abc
	P	c	abc	abc	abc	abc	abc	a	abc	abc
	K	c	abc	abc	abc	ab	abc	a	abc	abc
	S	abc	abc	abc	abc	abc	abc	a	abc	abc
SFR_G.recalc.	Control	de	abcde	abcde	abcde	abc	abcde	ab	abcd	abcde
	N	de	cde	abcde	abcde	abcde	abcde	abcde	abcde	abcde
	P	de	abcde	abcde	abcde	abcde	abcde	abc	abcde	abcde
	K	e	abcde	abcde	abcde	abc	abcde	abc	abcde	abcde
	S	bcde	abcde	abcde	abcde	abcde	abcde	a	abcde	abcde
Flav.recalc.	Control	efg	abcdefg	abcdefg	abcdefg	abcdefg	abcdefg	abcdef	abcde	abcdef
	N	efg	bcdefg	bcdefg	abcdefg	abcdefg	abcdefg	abcdefg	abcdef	abcdef
	P	fg	abcdefg	abcdefg	abcdefg	abcdefg	abcdefg	abcdef	abcd	abcdef
	K	g	defg	cdefg	abcdefg	abcdefg	abcdefg	abcdef	abcdefg	abcdef
	S	efg	abcdefg	abcdefg	abcdefg	abcdef	ab	abcde	a	abc
ANTH_RG.recalc.	Control	ab	ab	a	ab	ab	b	ab	ab	ab
	N	ab	ab	ab	ab	ab	ab	ab	ab	ab
	P	ab	ab	a	ab	ab	ab	ab	ab	ab
	K	ab	ab	ab	ab	ab	ab	ab	ab	ab
	S	ab	ab	ab	ab	ab	ab	ab	ab	ab
NBI_R.recalc.	Control	ab	ab	ab	ab	ab	a	ab	ab	b
	N	ab	ab	ab	ab	ab	ab	ab	b	b
	P	ab	ab	ab	ab	ab	ab	ab	b	b
	K	ab	ab	ab	ab	ab	ab	ab	ab	ab
	S	ab	ab	ab	ab	b	b	ab	b	b
NBI_G.recalc.	Control	a	a	a	a	a	a	a	a	a
	N	a	a	a	a	a	a	a	a	a
	P	a	a	a	a	a	a	a	a	a
	K	a	a	a	a	a	a	a	a	a
	S	a	a	a	a	a	a	a	a	a
NBI_OR	Control	cde	abcde	abcde	abcde	abcde	ab	abc	abcde	abcde
	N	e	cde	abcde	abcde	abcde	abcde	abcde	abcde	abcde
	P	de	abcde	abcde	abcde	abcde	abcde	a	abcde	abcde
	K	e	abcde	abcde	abcde	abcd	abcde	abcd	abcde	abcde
	S	bcde	abcde	abcde	abcde	abcde	abcde	abcde	abcde	abcde
FER_RG.recalc.	Control	a	a	a	a	a	a	a	a	a
	N	a	a	a	a	a	a	a	a	a
	P	a	a	a	a	a	a	a	a	a
	K	a	a	a	a	a	a	a	a	a
	S	a	a	a	a	a	a	a	a	a
FERARI.recalc.	Control	ab	abcd	abcd	abcde	bcdef	abcd	abcdef	abcdef	def
	N	ab	abc	abcd	abcde	abcdef	abc	abcd	abcde	abcdef
	P	ab	abcd	abcde	abcd	abcdef	abc	abcdef	abcdef	ef
	K	a	abc	abcd	abcd	abcde	abc	abcdef	abcde	cdef
	S	ab	abcd	abcdef	abcd	bcdef	abcd	abcdef	abcde	f

II.2.c. L'analyseur XRF

II.2.c.i. Capacité de détection des éléments et calibration sur matériel frais et sec

La capacité de détection des éléments mesurés par le XRF a été évaluée sur matériel frais (sur les feuilles suivies régulièrement en cours de culture et sur les blancs aux dates de récoltes) et sur matériel séché et broyé (feuilles et blancs aux dates de récoltes). Les taux de données non acquises par cet appareil pour les principaux éléments dans les différentes conditions de mesure (feuille ou blanc frais ou sec) sont indiqués dans le tableau 5.

Tableau 5 : Taux de données non acquises par le XRF pour différents éléments lors de mesures réalisées sur feuilles ou blanc de poireau frais ou séché et broyé. Les éléments ayant été carencés dans une modalité de cet essai sont indiqués en gras. Les données obtenues pour l'ensemble des éléments sont présentées en annexe (Tableau S1)

% de données non acquises	Feuilles fraîches	Feuilles sèches	Blanc frais	Blanc secs
CaO	2	1	0	0
Cl	32	6	50	10
Co	100	96	100	98
Cu	8	29	70	41
Fe	0	1	0	0
K₂O	3	2	6	0
MgO	0	5	0	0
Mn	82	9	82	48
Mo	97	12	94	76
Ni	95	99	100	100
P₂O₅	13	1	66	9
S	78	1	26	7
Sb	100	100	100	100
SiO ₂	96	100	94	100
Zn	79	23	90	8

Les différents éléments potentiellement quantifiables par le XRF se distinguent en 3 groupes selon leur capacité de détection sur matériel frais et/ou sec. Pour 34 des 45 éléments potentiellement détectables par XRF, parmi lesquels on retrouve le Co, le Ni, le Sb, le SiO₂, les taux de données non acquises sont très élevés, que la mesure soit réalisée sur feuille ou blanc frais ou sec, ce qui semble simplement mettre en évidence l'incapacité de l'appareil à quantifier ces éléments sur les différentes matrices testées (en dessous du seuil de détection de l'XRF, Tableau 5 et Tableau S1). *A contrario* pour le K₂O, le CaO, le MgO ou le Fe, les taux de données non acquises restent très faibles, que les mesures soient réalisées sur des feuilles ou du blanc, frais comme secs, ce qui pourrait être le signe d'une abondance suffisante de ces éléments pour permettre leur détection, et peut être leur quantification sur les différentes matrices évaluées. Enfin, pour un troisième groupe d'éléments, comme le Cl, le Mn, le Mo, le P₂O₅ et le S, le taux de données non acquises, relativement important sur tissus frais, et comparativement fortement diminué lorsque les mesures sont réalisées sur matériel séché et broyé, ce qui suggère une quantification plus fiable de ces éléments sur matériel sec.

Nos investigations se sont donc orientées sur ces deux derniers groupes d'éléments, pour lesquels nous avons obtenus des données sur l'une ou l'autre des matrices évaluées.

Afin de calibrer l'appareil aux teneurs en éléments retrouvées dans le végétal, les données obtenues

sur matériel frais et sec ont été mises en relation avec les analyses ICP-MS réalisées sur les échantillons récoltés (Figure 9, Figure 10).

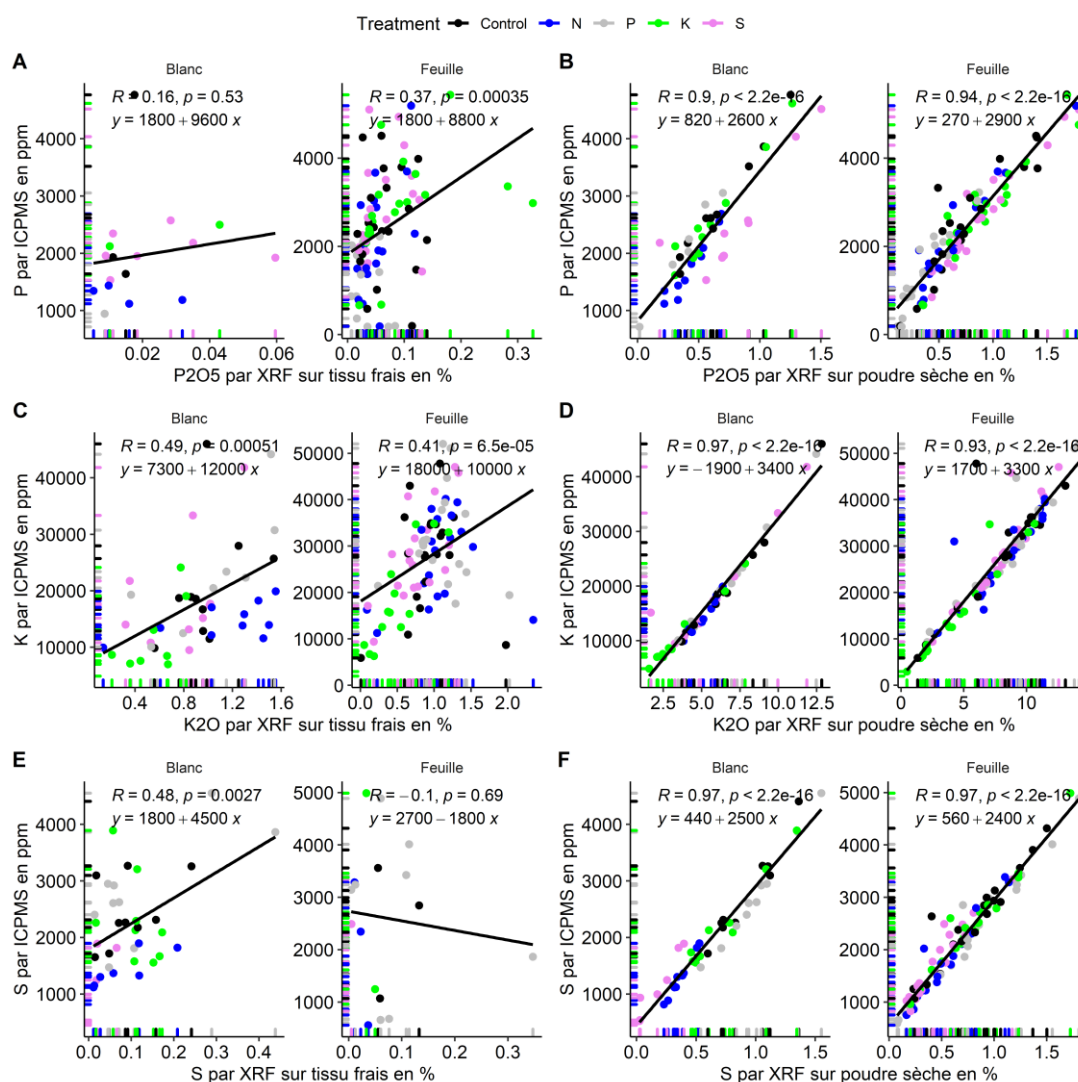


Figure 9 : Relations entre les teneurs en P₂O₅ (A, B), K₂O (C, D) et S (E, F) déterminées par XRF sur tissus frais (A, C, E) ou secs (B, D, F) et les teneurs en P, K et S analysées par ICP-MS sur les échantillons récoltés après 31 et 57 jours de carence. Des coefficients de corrélations R proches de 1 mettent en évidence de très bonnes corrélations entre les deux types d'analyses.

Pour le P, le K et le S, les coefficients de corrélations mis en évidence sont excellents pour les analyses XRF réalisées sur poudre sèche ($R > 0,9$) et plus faibles pour les analyses XRF réalisées sur tissus frais. Ces différences, qui ont déjà été observées sur carotte et chou dans le cadre du projet Nutrinov, peuvent être associées à la présence d'eau en grande quantité dans les tissus frais, diluant les éléments détectables par le XRF dans les échantillons analysés. Les différences d'échelles entre les données XRF obtenues sur matériel frais et sec et les taux de données non acquises plus importants sur matériel frais vont dans le sens de cette hypothèse. Cependant, des tendances intéressantes sont mises en évidence sur tissu frais pour le P et le K au niveau foliaire et pour le K et le S au niveau du blanc. En effet, dans ces cas, les échantillons carencés en ces éléments se retrouvent bien avec des niveaux de P ou de K analysés par XRF sur tissus frais réduits par rapport aux échantillons des autres traitements. Dans notre expérimentation, une seule mesure a été réalisée sur chaque échantillon. Répéter les mesures sur matériel frais pourrait permettre d'augmenter la fiabilité de la quantification, à condition

que l'élément soit détectable. Sur poudre sèche, les niveaux de corrélations très élevés mettent en évidence la fiabilité de l'analyseur XRF pour quantifier ces éléments.

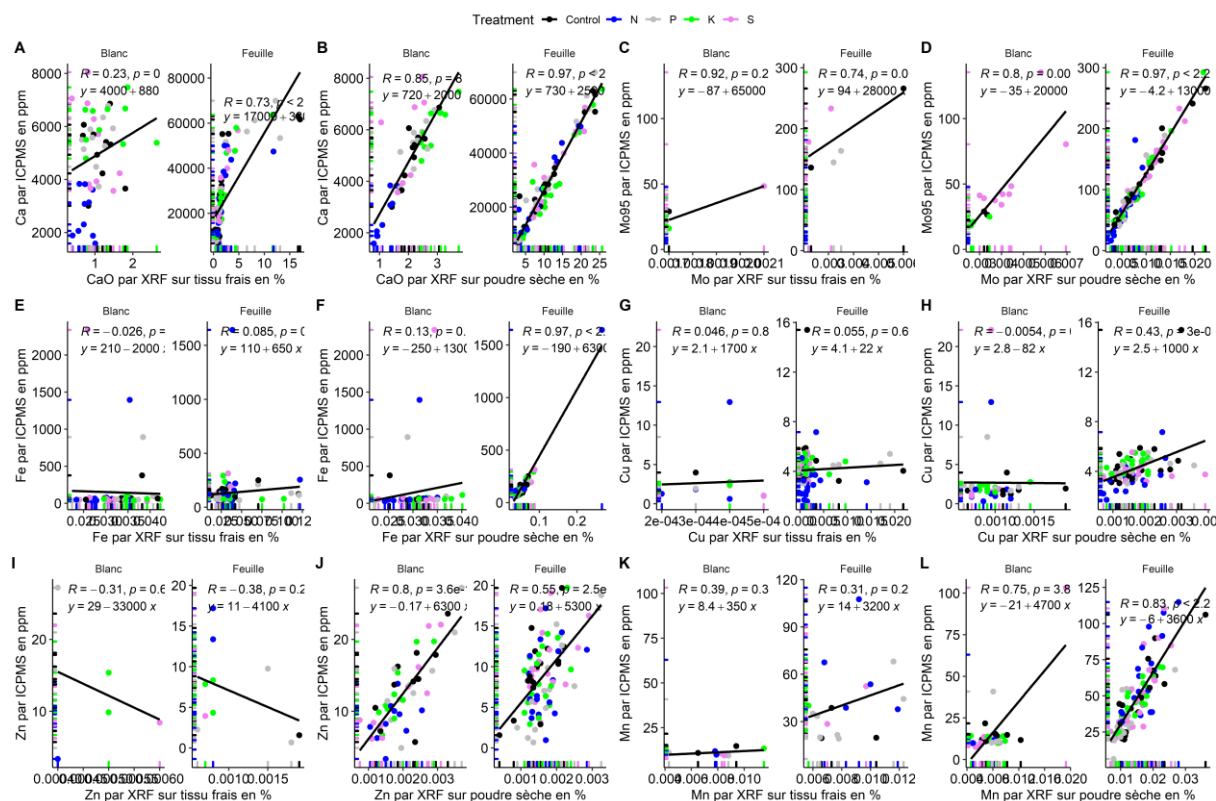


Figure 10 : Relations entre les teneurs en CaO (A, B), Mo (C, D), Fe (E, F), Cu (G, H), Zn (I, J) et Mn (K, L) déterminées par XRF sur tissus frais (A, C, E, G, I, K) ou secs (B, D, F, H, J, L) et les teneurs en Ca, Mo, Fe, Cu, Zn et Mn analysées par ICP-MS sur les échantillons récoltés après 31 et 57 jours de carence. Des coefficients de corrélations R proches de 1 mettent en évidence de très bonnes déterminations des teneurs en éléments par le XRF.

Pour le Ca, Mo, Zn et le Mn les coefficients de corrélations mis en évidence sont très bons pour les analyses XRF réalisées sur poudre sèche ($R > 0.8$) et plus faibles pour les analyses XRF réalisées sur tissus frais. Cependant, des tendances intéressantes sont mises en évidence sur tissu frais pour le Ca au niveau foliaire. Sur poudre sèche, les niveaux de corrélations très élevés mettent en évidence la fiabilité de l'analyseur XRF pour quantifier ces éléments. A l'inverse, pour le Fe et le Cu, aucune corrélation claire n'est mise en évidence sur tissu frais comme sur poudre sèche (un seul échantillon de feuille très riche en Fe serait à repasser ou à éliminer de l'analyse, car il participe fortement à la relation).

Considérant ces résultats, nous avons orienté notre évaluation du XRF sur tissus frais pour le P et le K au niveau foliaire et pour le K et le S au niveau du blanc. Les résultats très positifs obtenus sur poudre sèche nous ont permis d'aller comparer avec une certaine confiance les données obtenues par XRF pour le P, le K, le S, le Ca, le Mo, le Zn et le Mn. Nous avons également suivi les teneurs en Cl déterminées par XRF car, bien que cet élément ne soit pas quantifié par ICP-MS, il a été apporté de manière contrastée aux poireaux cultivés (Cf. II.1.b).

II.2.c.ii. Evolution des quantifications relatives théoriques en éléments : les mesures sur matériel frais

L'évolution des teneurs théoriques relatives en P_2O_5 et K_2O déterminées par XRF sur tissu frais au niveau des feuilles 6 et 8 et en K_2O et S déterminées au niveau du blanc de poireau sont présentées dans la figure 11.

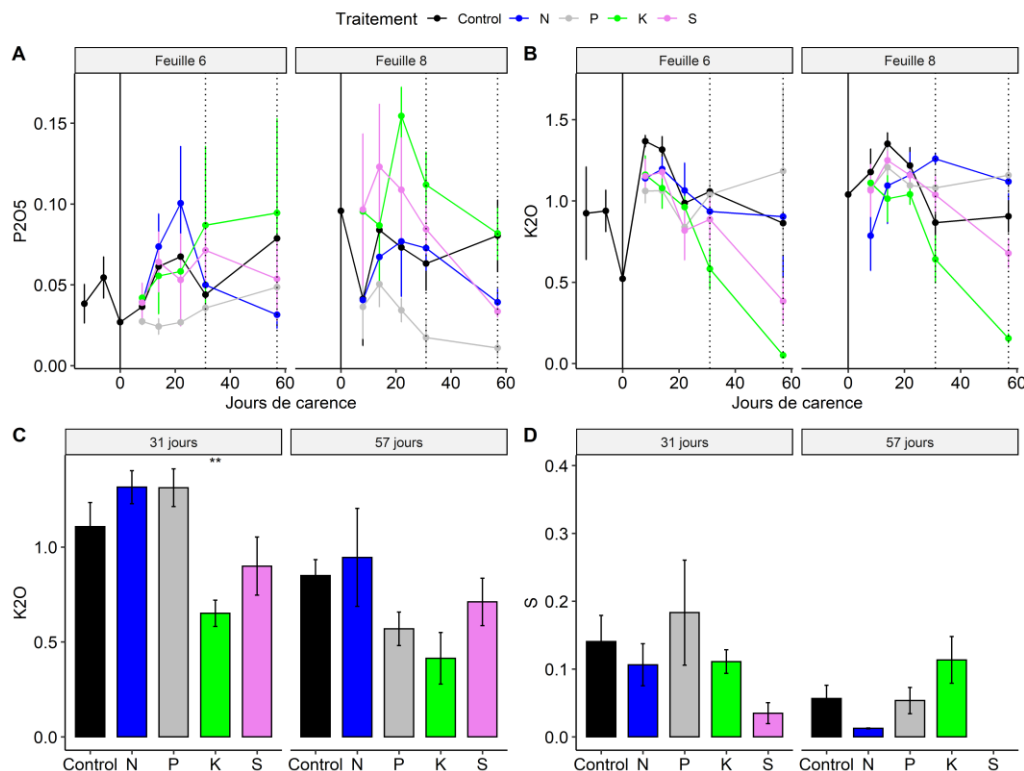


Figure 11 : Evolution des teneurs relatives (valeurs brutes) en éléments déterminées directement par le XRF sur tissus frais durant la culture de poireaux menée en condition contrôlée. A, B : Les teneurs en P_2O_5 et en K_2O des rangs foliaires 6 et 8 ont été suivies sur des plantes en croissance sans avoir recouru à une destruction des organes. La ligne verticale pleine indique le jour de début des carences, 95 jours après le semis. Les lignes pointillées indiquent les 2 dates auxquelles des récoltes ont été effectuées, soit après 31 et 57 jours de carences. C, D : les teneurs en K_2O et S ont été mesurées sur des rondelles de blancs de poireaux fraîches récoltées après 31 et 57 jours de carences ($n=5$).

La capacité de cet appareil à quantifier de manière fiable chacun des éléments sur du tissu végétal frais repose sur la validation et la calibration des données brutes de l'XRF avec des données déterminées par ICP-MS, présentées plus haut. Une teneur théorique relative en P_2O_5 sensiblement plus faible est observée dans les feuilles des plantes carencées en P par rapport au Control. Une accumulation transitoire de P_2O_5 est au contraire observée dans les premières semaines suivant l'application de carences en S ou en K. De même que pour le P, on observe une réduction de la teneur théorique relative en K_2O dans les feuilles de plantes carencées en K, qui semble se distinguer du Control relativement tardivement. Cependant, ces observations ne se traduisent pas d'un point de vue statistique : les indices ne diffèrent pas significativement et de manière répétée entre les traitements. Au niveau du blanc de poireau, on observe des teneurs théoriques relatives en K_2O significativement réduites après 31 jours de carence en K par rapport au Control. Le S n'est plus détecté par XRF dans les blancs de poireau frais après 57 jours de carence en cet élément. Selon ces premières observations,

l'analyseur XRF employé sur feuilles fraîches ou blanc frais semble permettre d'identifier des statuts nutritionnels contrastés de manière rapide. Cependant, ces mesures sur matériel frais paraissent pâtir d'une grande variabilité ne permettant pas d'observer des différences de teneurs significatives par rapport à une situation témoin dans des conditions de culture en plein champ. Ceci interroge sur la possibilité d'utiliser les mesures XRF sur matériel frais en tant que support pour le développement d'un OAD consacré au pilotage de la fertilisation P, K ou S en condition de production. Ceci mérite néanmoins d'être évalué en condition de terrain, car (1) l'apport de ces 3 éléments n'est que peu raisonné dans les méthodes actuelles de pilotage de la fertilisation, et (2) la mesure XRF sur matériel frais est rapide à mettre en oeuvre. Une répétition importante des mesures serait néanmoins à envisager dans le cadre du développement de l'OAD, afin de réduire la variabilité des données collectées et de les fiabiliser.

II.2.c.i. Evolution des quantifications relatives théoriques en éléments : les mesures sur matériel sec

Selon les résultats obtenus dans cette étude, le XRF est un outil extrêmement fiable pour mesurer sur de la poudre sèche de poireau les teneurs en P, K, S, mais aussi en Ca, Mo, Zn et Mn. Les mesures réalisées nous permettent d'apprécier l'impact des traitements appliqués sur le statut nutritionnel du poireau pour ces éléments (Figures 12 et 13)

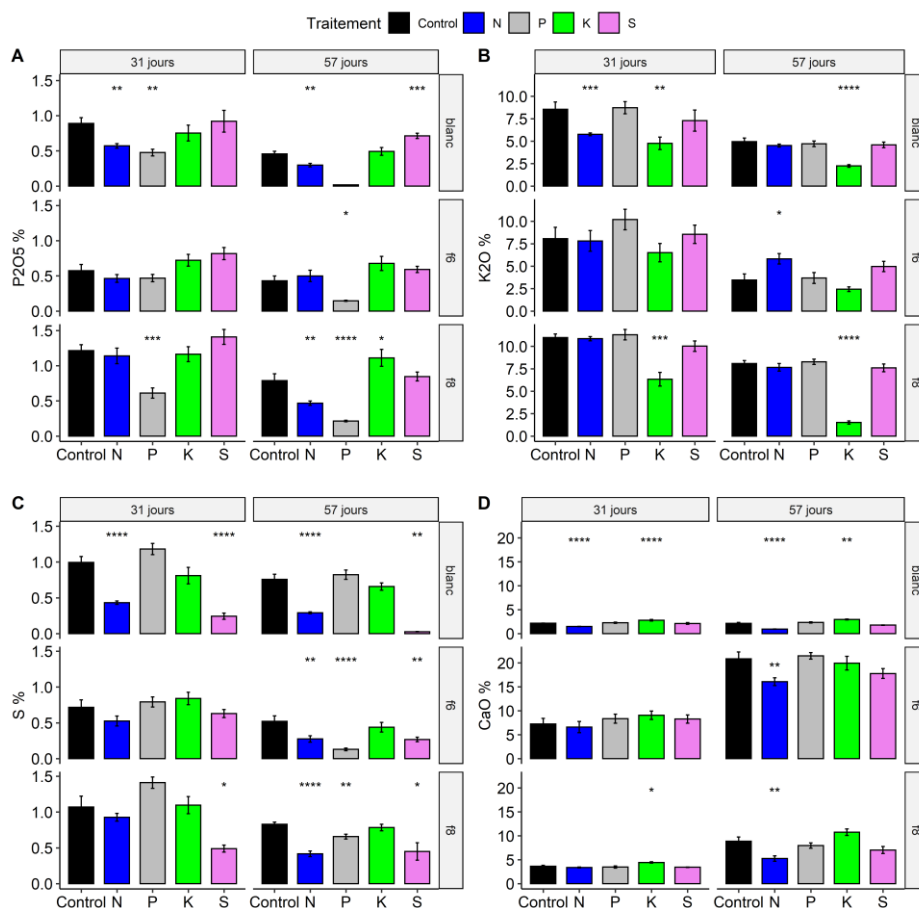


Figure 12 : Teneurs relatives en P_2O_5 , K_2O , S et CaO déterminées par XRF sur poudre sèche de feuilles et de blancs de poireaux cultivés en conditions contrôlées. Pour obtenir les teneurs absolues en ppm, il suffit d'utiliser les équations de calibration présentées dans les figures 9 et 10.

Des teneurs en P_2O_5 , K_2O et S significativement réduites sont mises en évidence dans les blancs et feuilles de poireaux respectivement cultivés en conditions de carences en P, K et S. Des réductions des teneurs en P_2O_5 , en S, mais aussi en CaO sont également observées dans les feuilles et blancs de poireaux cultivés en condition de carence en N.

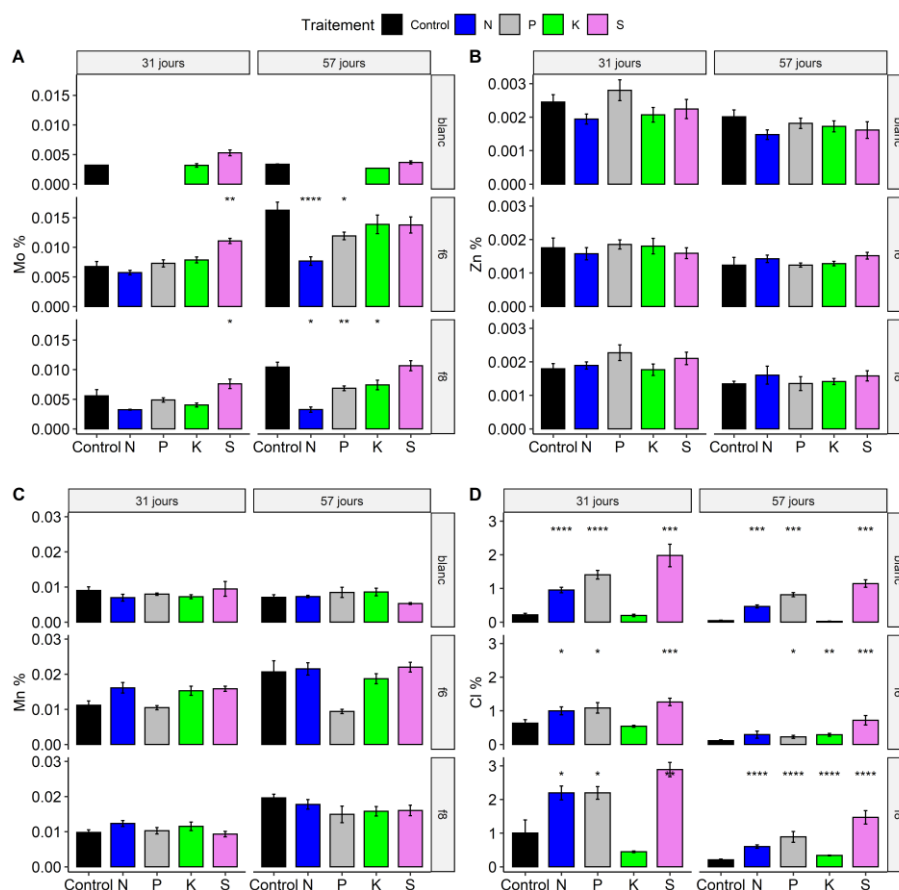


Figure 13 : Teneurs relatives en Mo, Zn, Mn et Cl déterminées par XRF sur poudre sèche de feuilles et de blancs de poireaux cultivés en conditions contrôlées. Pour obtenir les teneurs absolues en ppm, il suffit d'utiliser les équations de calibration présentées dans les figures 9 et 10.

Le Mo n'est que rarement détecté dans les blancs de poireaux séchés (76% de données non acquises, Tableau 5), mais est bien détecté dans les feuilles séchées et quantifié de manière précise, comme nous l'avons mis en évidence plus haut (Figure 10). Alors que les teneurs en Zn et en Mn ne sont pas significativement affectées par les carences appliquées, la teneur en Mo est significativement réduite dans les feuilles de poireaux carencées en N, en P ou en K pendant 57 jours. On observe des accumulations de Cl dans les blancs et feuilles de poireaux carencées en N, P et S, qui apparaissent directement associées aux plus fortes concentrations en Cl des solutions appliquées aux plantes carencées en ces éléments (1.45, 0.75 et 0.7 mM de Cl respectivement) par rapport à la solution Control (0.2 mM de Cl). Ces solutions contiennent davantage de Cl afin de permettre d'équilibrer la solution nutritive pour les autres éléments apportés. Notons cependant qu'il semble que davantage

de Cl s'accumule dans les organes mesurés en réponse à la carence en S par rapport à la carence en N ou en P, alors que la solution nutritive sans S contient moins de Cl que les solutions dépourvues de N et de P.

Ainsi, d'après nos observations, la mesure réalisée par le XRF sur matériel sec permet de distinguer de manière rapide les plantes carencées en P, K, S – mais aussi indirectement en N par les teneurs en P_2O_5 , S, CaO et Mo – par rapport à une situation témoin. Un référencement de données conséquent en conditions de production pourrait permettre le développement de référentiels utilisables en cours de culture pour affiner les apports de ces éléments. Nous avons initié ce référencement lors de l'essai réalisé sur la station expérimentale du SILEBAN en 2021.

II.2.d. Le NIRS : suivi de la réflectance et calibration aux données élémentaires et biochimiques

II.2.d.i. Evolution et traitement des spectres NIRS sur matériel frais et sec

Les spectres de réflectance ont été mesurés en cours de culture à l'aide du NIRS sur les feuilles 6 et 8 fraîches, 13 et 6 jours avant application des traitements et après 1, 8, 14, 22 31 et 57 jours de traitements. Sur les feuilles sèches, les blancs frais et les blancs secs, les mesures ont été réalisées aux dates de récolte, soit après 31 et 57 jours de traitements.

Dans le but de disposer de modèles de prédictions fiables basés sur les spectres collectés en cours de culture, ce jeu de données spectrales a ensuite été traité. Après correction des écarts dus à la commutation entre les trois capteurs du NIRS, le traitement a permis de générer 2 bases de données différentes pour chaque type d'échantillon : la première base de données a été générée par lissage de Savitzky-Golay avec un polynôme de degré 3, utilisé pour diminuer le bruit des spectres – dite "base SNV" – et la seconde base de données a été produite par dérivation des spectres obtenus suite au lissage de Savitzky-Golay avec un polynôme de degré 3 – dite "base sg". Les spectres obtenus après traitement selon ces deux méthodes sont présentés dans les figures 14, 15, 16 et 17 respectivement pour les feuilles fraîches, les blancs frais, les feuilles sèches et les blancs secs.

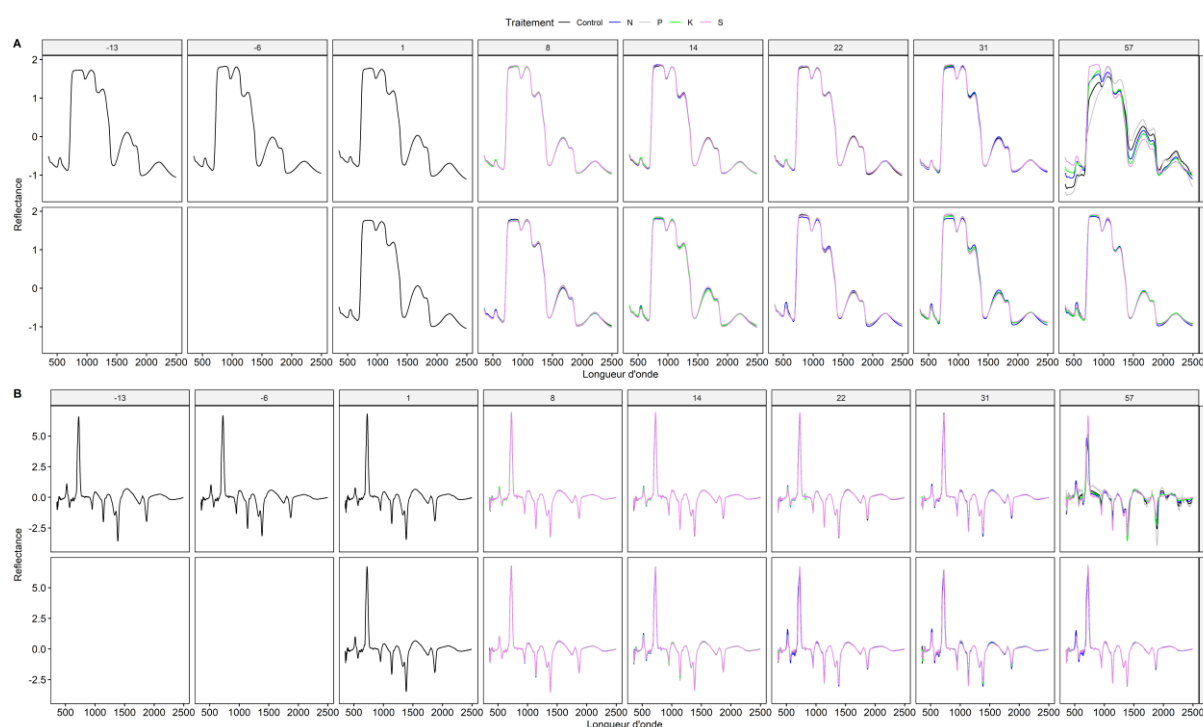


Figure 14 : Evolution des spectres NIRS collectés sur feuilles fraîches de poireaux cultivés en conditions contrôlées. A : Spectres obtenus après correction des écarts dus à la commutation entre les capteurs suivi d'un lissage de Savitzky-Golay avec un polynôme de degré 3, base « snv » ; B : Spectres obtenus après dérivation des spectres obtenus suite au lissage de Savitzky-Golay avec un polynôme de degré 3, base « sg ».

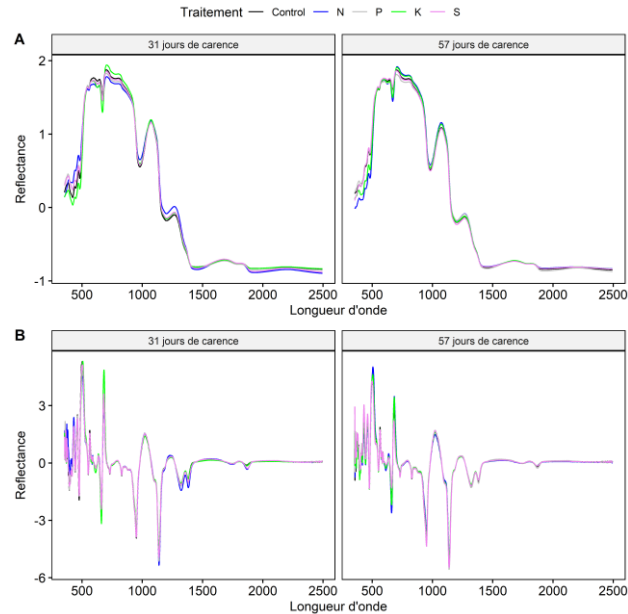


Figure 15 : Spectres NIRS collectés sur rondelles de blancs de poireaux frais cultivés en conditions contrôlées aux deux dates de récolte. A : Spectres obtenus après correction des écarts dus à la commutation entre les capteurs suivi d'un lissage de Savitzky-Golay avec un polynôme de degré 3, base « snv » ; B : Spectres obtenus après dérivation des spectres obtenus suite au lissage de Savitzky-Golay avec un polynôme de degré 3, base « sg ».

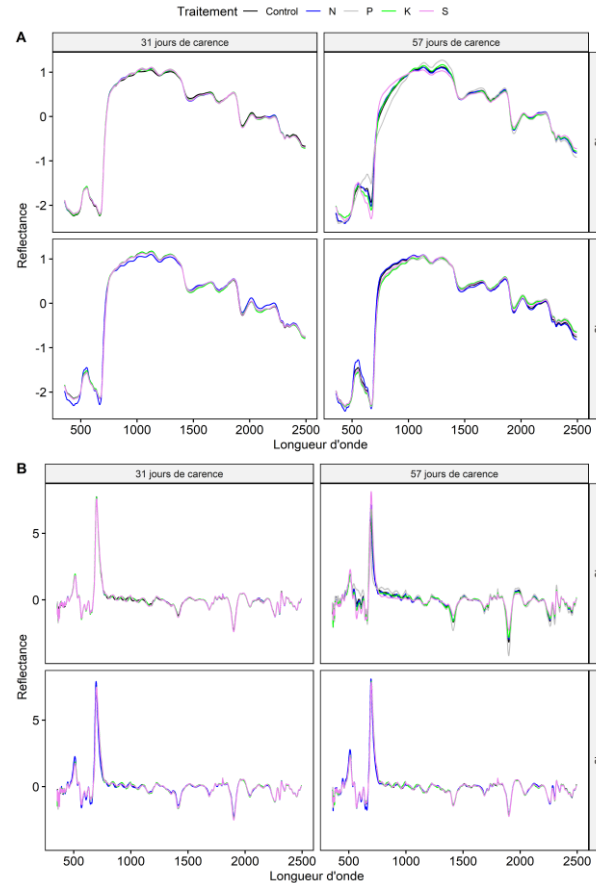


Figure 16 : Spectres NIRS collectés sur feuilles de poireaux séchées et broyées cultivés en conditions contrôlées aux deux dates de récolte. A : Spectres obtenus après correction des écarts dus à la commutation entre les capteurs suivi d'un lissage de Savitzky-Golay avec un polynôme de degré 3, base « snv » ; B : Spectres obtenus après dérivation des spectres obtenus suite au lissage de Savitzky-Golay avec un polynôme de degré 3, base « sg ».

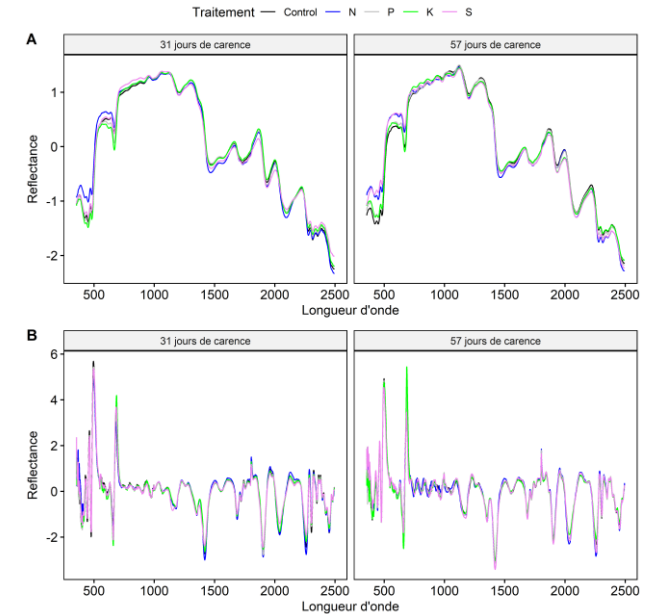


Figure 17 : Spectres NIRS collectés sur blancs de poireaux séchées et broyées cultivés en conditions contrôlées aux deux dates de récolte. A : Spectres obtenus après correction des écarts dus à la commutation entre les capteurs suivi d'un lissage de Savitzky-Golay avec un polynôme de degré 3, base « snv » ; B : Spectres obtenus après dérivation des spectres obtenus suite au lissage de Savitzky-Golay avec un polynôme de degré 3, base « sg ».

Notons d'abord les différences importantes entre les spectres obtenus sur des feuilles fraîches et sèches d'une part, et entre les spectres obtenus sur des blancs frais et secs d'autre part. Alors que les profils spectraux entre échantillons frais et secs sont assez proches jusqu'aux environs de 1000 nm, ils diffèrent fortement au-delà, une réflectance plus importante étant observée dans les échantillons séchés et broyées par rapport aux échantillons frais. Ces différences sont associées à l'eau qui absorbe le rayonnement infrarouge dans les tissus frais. Cette observation pourrait suggérer que davantage de données soient disponibles dans les échantillons secs.

Quelle que soit la base de donnée spectrale considérée, peu de différences sont visibles entre les spectres collectés sur des plantes Control et carencées en N, P, K ou S. Cependant, les spectres obtenus sur les feuilles et blancs de plantes carencées en N semblent se distinguer légèrement de ceux collectés sur des plantes cultivées dans les autres conditions de fertilisation.

II.2.d.ii. Calibration des spectres aux données élémentaires et biochimiques par PLSR

Régressions des moindres carrés partiels (PLSR)

Les régressions PLS ont été réalisées pour chaque type d'organe (i.e. feuilles et blanc de poireaux), frais et secs, et pour les différents éléments dosés par IRMS, ICP-MS et par le laboratoire liégeois (Vitamine C, Polyphénols totaux, capacité antioxydante par méthodes ORAC et FRAP) à partir de deux bases de données spectrales générées par les procédures de traitements des spectres décrites plus haut. Les coefficients de corrélations et les RMSECV des modèles de régressions PLS les plus intéressants sont indiqués pour le nombre de composantes optimal dans le tableau 6 pour les deux types d'organes et les deux bases de données générées. Les données obtenues pour tous les éléments testés sont présentées en annexe (Tableau S2).

Tableau 6 : Synthèse des meilleurs modèles de prédiction obtenus par PLS à partir des bases de données spectrales SNV et SG de feuilles et de blancs de poireaux frais et secs cultivés en conditions contrôlées. *ncomp* : nombre de composantes retenues pour le modèle donné, R^2_{cv} : coefficient de régression linéaire de validation croisée, RMSECV : racine-carrée de l'erreur de validation croisée.

	Element	Unité	Tissu frais						Poudre sèche					
			Base "sg"			Base "snv"			Base "sg"			Base "snv"		
			ncomp	R^2_{cv}	RMSECV	ncomp	R^2_{cv}	RMSECV	ncomp	R^2_{cv}	RMSECV	ncomp	R^2_{cv}	RMSECV
Feuille	N	%MS	4	0,55	0,56	3	0,56	0,56	7	0,86	0,31	8	0,87	0,3
	B	ppm	1	0,1	15,94	2	0,22	14,81	3	0,6	10,52	3	0,56	11,36
	Ba	ppm	1	0,52	11,32	2	0,59	10,46	3	0,79	7,42	4	0,79	7,43
	Ca	ppm	3	0,54	11225,8	2	0,54	11325,5	3	0,85	6473,95	5	0,85	6394,36
Blanc	N	%MS	1	0,38	0,5	2	0,25	0,55	7	0,76	0,29	6	0,86	0,23
	B	ppm	4	0,62	2,12	6	0,65	2,05	3	0,66	2	2	0,66	2,04
	K	ppm	1	0,41	6940,31	2	0,35	7347,98	2	0,48	6579,1	6	0,62	5556,81
	Na	ppm	1	0,18	261,32	1	0,12	270,99	1	0,39	223,5	2	0,52	197,92
	P	ppm	8	0,42	701,42	6	0,38	733,11	3	0,51	659,79	2	0,53	646,44
	Zn	ppm	4	0,55	3,42	4	0,55	3,5	1	0,62	3,22	5	0,81	2,24
	Acide Ascorbique	mg AA/gMS	1	0,25	0,53	2	0,33	0,49	1	0,47	0,44	2	0,59	0,39
	Capacité antioxydante (FRAP)	µmole ET/g	1	0,43	1,13	2	0,49	1,03	1	0,43	1,11	2	0,69	0,82
	Phénols totaux	mg EAG/g	1	0,43	0,51	3	0,53	0,46	1	0,43	0,51	2	0,62	0,42

L'évolution de la RMSE_{cv} en fonction du nombre de composantes ainsi que la relation entre données mesurées et prédites au nombre de composantes optimal déterminé sont illustrées pour les modèles de calibration de la teneur en azote de feuilles et blancs frais et secs dans la figure 18. Ces mêmes données pour d'autres modèles potentiellement intéressants sont présentés en annexe (Figure S1).

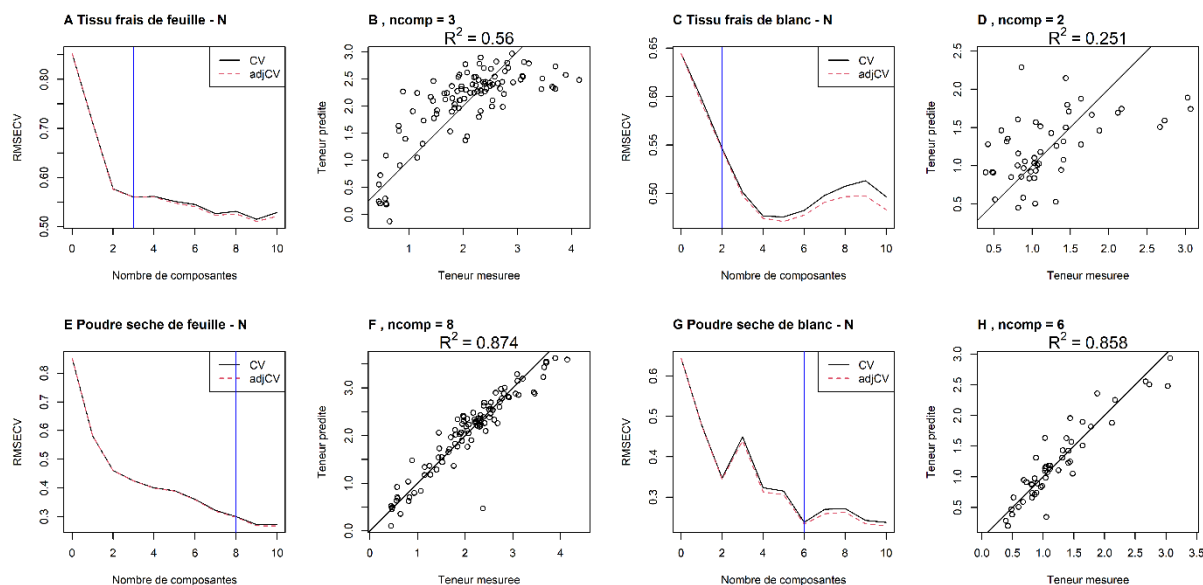


Figure 18 : Résultats de régressions PLS réalisées pour la teneur en N déterminée par IRMS (en % de la matière sèche) à partir des bases de données spectrales de feuilles (A,B,E,F) et de blancs de poireaux (C,D,G,H) frais (A,B,C,D) et secs (E,F,G,H) et traitée suite au lissage de Savitzky-Golay sans dérivation des spectres obtenus (Base dite "snv"). A,C,E,G : évolution de la $RMSE_{CV}$ en fonction du nombre de composantes retenus pour le modèle – la ligne verticale donnant le nombre optimal de composantes selon la méthode "onesigma". B,D,F,H : relation entre valeurs mesurées et valeurs prédites par le modèle avec le nombre optimal de composantesl retenu.

Des modèles de prédictions semblent ainsi être mis en évidence pour différents éléments, et plus particulièrement à partir des spectres obtenus sur des poudres de tissus secs et broyés. On observe en effet des coefficients de corrélations plus élevés et des $RMSE_{CV}$ plus faibles dans les modèles établis à partir de spectres obtenus sur poudre sèche que pour ceux établis à partir de spectres collectés sur tissus frais. Des modèles de prédictions de la teneur en azote ont été établis à partir des spectres obtenus sur les tissus frais et secs de feuilles ainsi que sur les poudres sèches de blanc avec des coefficients de corrélation relativement bons. De façon intéressante, des modèles de prédictions semblent également être établis pour la teneur en K, en P en Zn et pour certaines des mesures de composés antioxydants à partir des spectres de blancs séchés et broyés. Nous pouvons également observer que les modèles établis, notamment pour l'azote, avec les bases de données spectrales obtenues suite au lissage de Savitzky-Golay (Base SNV) semblent meilleurs que ceux établis après application d'une dérivée (Base SG).

Les modèles de calibration ainsi établis entre teneur en azote et spectres de tissus frais de feuille, de poudres sèches de feuilles ainsi que de poudre sèche de blanc ont ensuite été utilisés afin de prédire ces teneurs aux différentes dates de collectes sur l'essai en conditions contrôlées à partir des spectres obtenus lors du suivi réalisé (Figure 19).

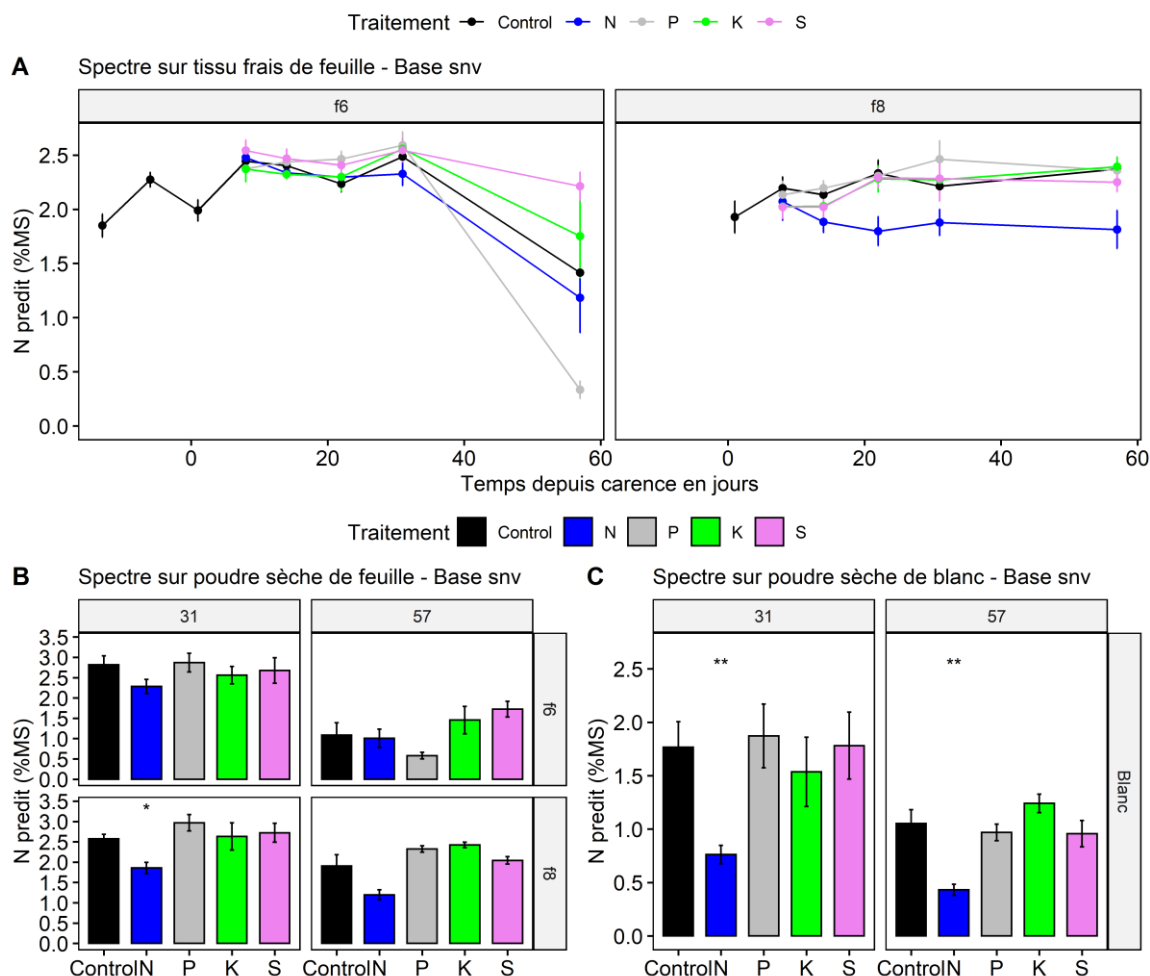


Figure 19 : Prédications de la teneur en azote de feuilles et de blancs de poireaux à l'aide des modèles établis par PLS à partir des bases de données spectrales collectées au cours de l'essai en conditions contrôlées et traitées par lissage de Savitzky-Golay sans dérivation des spectres obtenus (Base snv). A : Evolution de la teneur prédite en N au cours du temps dans les feuilles 6 et 8 déterminée sur tissus frais. B : Teneurs prédites en N dans les feuilles 6 et 8 déterminées sur poudre sèche à 31 et 57 jours de traitement. C : Teneurs prédites en N dans les blancs de poireaux déterminées sur poudre sèche à 31 et 57 jours de traitement.

Ainsi, nous pouvons observer l'évolution de la teneur en N prédite, et des différences peuvent être mises en évidence en réponse à des carences élémentaires et plus spécifiquement à la carence en azote.

De façon intéressante, on observe un maintien voire une légère augmentation de la teneur prédite en N au niveau de la feuille 8 au cours du temps alors qu'elle diminue entre 31 et 57 jours de carence dans la feuille 6 dans toutes les conditions. On observe également et de manière particulièrement claire une réduction de la teneur en N prédite dans les feuilles 8 de plantes carencées en N par rapport à la condition Control, et ce à partir du 14^{ème} jour de traitement. Les teneurs en N prédites à partir des spectres de poudres sèches sont également plus faibles par rapport au Control dans les feuilles jeunes et dans les blancs de poireaux carencés en N à 31 et 57 jours de traitement.

Les résultats obtenus mettent en lumière les atouts du NIRS pour prédire la teneur en N, et potentiellement d'autres variables, en un temps de mesure record. Ces observations démontrent que

le NIRS a bien le potentiel d'être utilisé pour prédire un certain nombre de paramètres biochimiques en cours de culture, et pourrait également être utilisé pour suivre l'effet d'un ajustement de fertilisation faisant suite à la détection d'une situation de déficience.

Ces résultats sont extrêmement encourageants. Il reste néanmoins un travail important à réaliser afin d'exploiter les données acquises par le NIRS en vue du développement potentiel d'un outil d'aide à la décision associé. La validation de ces observations sur des jeux de données acquis en conditions de plein champ a été initiée sur les données acquises lors des essais terrains mis en place en 2021 et 2022 et est présentée dans la suite de ce rapport. Les référentiels requis pour le développement de l'utilisation du NIRS en condition de production devront introduire d'autres facteurs dans les analyses (variété, terroirs, modalités de fertilisation...) afin de s'assurer de la pertinence des modèles de prédiction établis et de les affiner le cas échéant.

III. Essais en conditions de production

III.1. Matériel et méthodes

III.1.a. Démarche expérimentale

Les appareils évalués dans le cadre de ce projet ont également été employés afin de suivre des cultures de poireaux en conditions de production lors des saisons 2021 et 2022 mettant en œuvre des modalités de fertilisation contrastées et des variétés différentes. Ces essais avaient pour objectif d'évaluer la capacité des appareils à identifier des stratégies de fertilisations contrastées.

Chaque année d'essai (2021 et 2022), deux variétés de poireaux (cv. Poulton et Aylton en 2021 et cv. Darter et Aylton en 2022) ont été cultivées sur les parcelles du Sileban à une densité de 200 000 plants/ha avec différents niveaux d'alimentation. Les modalités mises en œuvre sont résumées dans la figure 20.

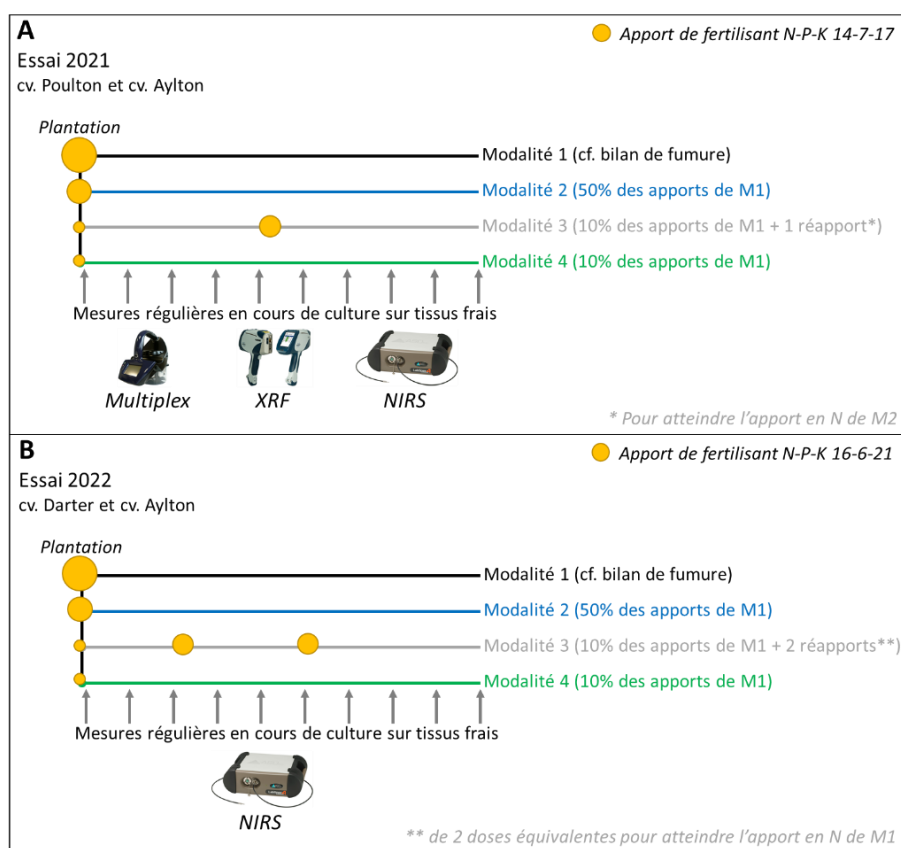


Figure 20 : Représentation schématique des modalités mises en œuvre en conditions de production en 2021 (A) et en 2022 (B) sur des cultures de poireaux. Le détail des fertilisations est indiqué dans le tableau 7 et la figure 21.

III.1.b. Cultures de poireaux en conditions de production

Les dates et doses de fertilisations réalisées sur ces essais et la répartition de l'azote disponible dans les différentes modalités en fonction de la source d'apport sont respectivement indiquées dans le tableau 7 et la figure 21. Les modalités mises en œuvre lors des essais se distinguent par **des doses de fertilisants contrastées** (Figure 20, Tableau 7).

Tableau 7 : Conditions de fertilisation des essais réalisés en conditions de production en 2021 et 2022

A - Essai 2021

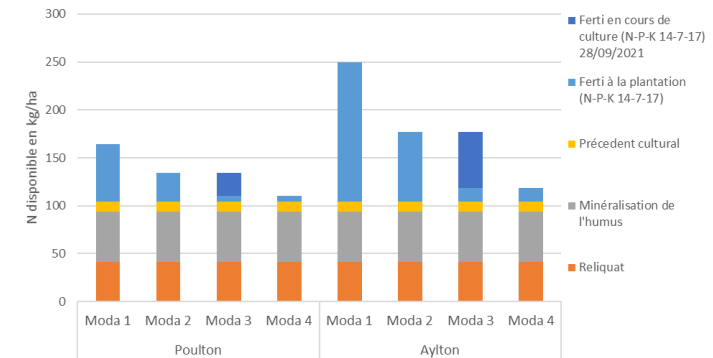
				Poulton				Aylton			
				M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4
Analyses de sol préalable	Reliquat (N minéral en kg/ha) ^{N1}			41							
	P ₂ O ₅ assimilable (kg/ha) ^{P1}			9							
	K ₂ O échangeable (kg/ha) ^{K1}			20							
Estimation	N issu de la minéralisation de l'humus (kg/ha) ^{N2}			53							
	N issu du précédent cultural (kg/ha) ^{N3}			10							
Fertilisation minérale	N-P-K 14-7-17	01/07/2021	Plantation (kg/ha)	432	216	43	43	1043	522	104	104
	Patentkali (kg/ha)	28/09/2021	2,5 mois après plantation	386	509	509	607	460	756	756	992
	Apport total d'engrais (kg/ha)			432	216	216	43	1043	522	522	104
	Apport N (kg/ha) ^{N4}			61	30	30	6	146	73	73	15
	Apport P ₂ O ₅ (kg/ha) ^{P2}			30	15	15	3	73	37	37	7
	Apport K ₂ O (kg/ha) ^{K2}			189	189	189	189	315	315	315	315
	N total disponible (en kg/ha) *			165	134	134	110	250	177	177	119
	P ₂ O ₅ total disponible (en kg/ha) *			39	24	24	12	82	45	45	16
	K ₂ O total disponible (en kg/ha) *			209	209	209	209	335	335	335	335

B - Essai 2022

				Darter				Aylton			
				M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4
Analyses de sol préalable	Reliquat (N minéral en kg/ha) ^{N1}			56							
	P ₂ O ₅ assimilable (kg/ha) ^{P1}			10							
	K ₂ O échangeable (kg/ha) ^{K1}			24							
Estimation	N issu de la minéralisation de l'humus (kg/ha) ^{N2}			29							
	N issu du précédent cultural (kg/ha) ^{N3}			5							
Fertilisation minérale	N-P-K 16-6-21 (kg/ha)	27/06/2022	Plantation (kg/ha)	533	284	57	57	1065	568	114	114
	Patentkali (kg/ha)	11/08/2022	5 semaines après plantation			227				454	
						249				497	
	Patentkali (kg/ha)	05/09/2022	10 semaines après plantation	248	422	248	581	295	643	295	961
	Apport total d'engrais (kg/ha)			533	284	533	57	1065	568	1065	114
	Apport N (kg/ha) ^{N4}			85	45	85	9	170	91	170	18
	Apport P ₂ O ₅ (kg/ha) ^{P2}			32	17	32	3	64	34	64	7
	Apport K ₂ O (kg/ha) ^{K2}			186	186	186	186	312	312	312	312
	N total disponible (en kg/ha) *			175	135	175	99	260	180	260	108
	P ₂ O ₅ total disponible (en kg/ha) *			42	27	42	13	74	44	74	16
	K ₂ O total disponible (en kg/ha) *			210	210	210	210	336	336	336	336

* N total disponible : N1 + N2 + N3 + N4 ; P₂O₅ total disponible = P1 + P2 ; K₂O total disponible = K1 + K2

A : Essai 2021



B : Essai 2022

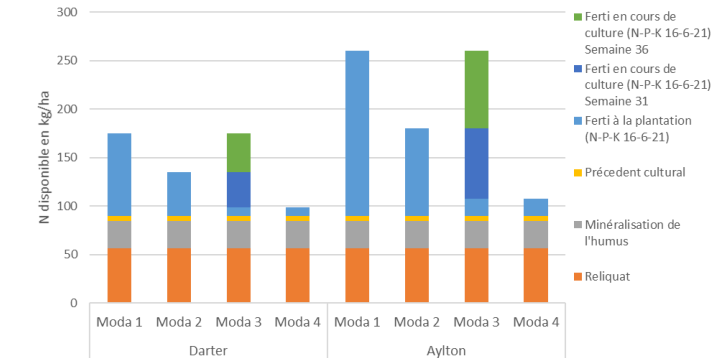


Figure 21 : Azote disponible dans les différentes modalités mises en œuvre lors des essais de 2021 et 2022 en fonction de la source d'apport

La modalité 1 correspond à un apport d'engrais minéral (N-P-K 17-7-20 en 2021 et 16-6-21 en 2022) à la plantation à une dose correspondant aux besoins en N calculés selon le bilan de fumure, la modalité 2 à un apport de ce même engrais à une dose correspondant à 50% de l'apport en N de la modalité précédente et les modalités 3 et 4 à des apports correspondants à 10% de la dose apportée dans la modalité 1. Les poireaux cultivés selon la modalité 3 ont fait l'objet de réapports de fertilisations en cours de culture. Alors qu'en 2021, un réapport unique a été effectué sur les poireaux de la modalité 3 afin d'atteindre la dose apportée dans la modalité 2 (50% de l'apport de la modalité 1), 2 réapports ont été effectués en 2022 afin d'atteindre la dose apportée aux poireaux de la modalité 1.

Les analyses de sols réalisées sur des échantillons prélevés avant mises en place des essais mettent en évidence des teneurs relativement importantes en N minéral (reliquat de 41 kgN/ha en 2021 et de 56 kgN/ha en 2022), en P₂O₅ assimilable (de 9-10 kg/ha) et en K₂O échangeable (de 20-24 kg/ha ; Tableau 7). Les fournitures en éléments nutritifs par le sol étant significatives – en prenant en compte également la minéralisation de l'humus et le précédent cultural – nous pouvons supposer que les besoins de la culture peuvent être satisfaits durant un temps relativement long avant qu'une déficience se manifeste. Ces teneurs importantes en éléments nutritifs pourraient être associées à des fertilisations des cultures passées se faisant au-delà de leurs besoins ou encore à des retours d'azote au sol provenant de la culture précédente (destruction en place de la culture sans exportation).

Les dispositifs expérimentaux en blocs aléatoires ainsi que les calendriers détaillés des actions réalisées sur ces essais sont respectivement présentés dans la Figure 22 et le Tableau 8. L'évolution des températures et de la pluviométrie ont été suivis par la station météorologique du Sileban, située à proximité des parcelles d'essais.

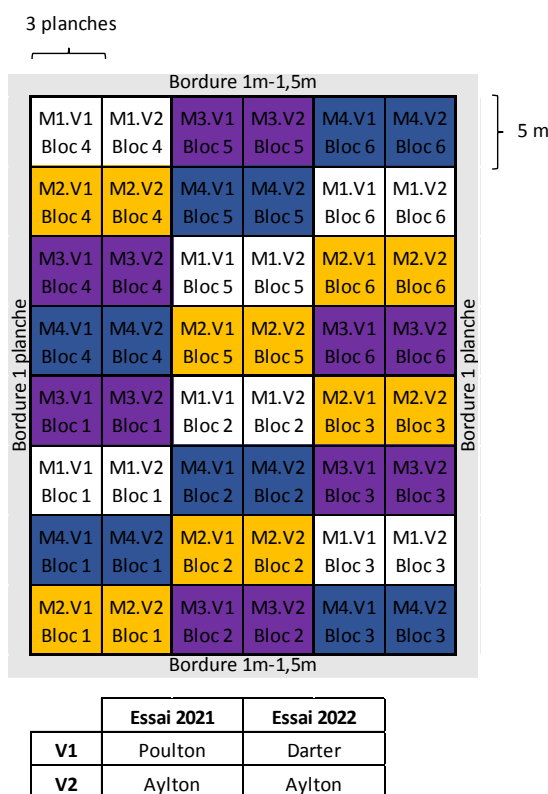


Figure 22 : Dispositif expérimental des essais mis en place en conditions de productions en 2021 et 2022.

Tableau 8 : Calendriers des actions réalisées en conditions de production en 2021 et 2022 sur les cultures de poireaux

	Action	Date de réalisation
Essai 2021	Labour + fertilisation	01/07/2021
	Plantation puis irrigation	01/07/2021
	Prélèvements des échantillons mesurés pour analyse IRMS et ICP-MS	09/09/2021
	Traitement tracteur : Ortiva Top 1L/ha	14/09/2021
	Réapport ferti sur modalité 3 (N-P-K) + Patentkali sur toutes modalités	28/09/2021
	Buttage	11/10/2021
	Traitement tracteur : Physalis 0,4L/ha DAR: 21 jours	11/10/2021
	Poulton : Notation rendement total, commercialisable et qualité sanitaire	22/11/2021
	Aylton : Notation rendement total, commercialisable et qualité sanitaire	29/11/2021
Essai 2022	Labour + fertilisation + planchage	27/06/2022
	Plantation puis irrigation. Darter remplace Poulton	27/06/2022
	Désherbage post plantation (Prowl 107 ou Springbox?)	28/06/2022
	Traitement Success	03/08/2022
	Réapport fertilisation sur modalité 3	11/08/2022
	Binage	05/09/2022
	Réapport ferti sur modalité 3 (N-P-K) + Patentkali sur toutes modalités	05/09/2022
	Buttage	13/09/2022
	Traitement trhips et rouille : Nativo (0.4 L/ha) + Vertimec (0.5 L/ha)+ Decis protech (0.83 L/ha)+ Sticman (0.56 L/ha) à 400 L/ha	16/09/2022
	Darter : Notation rendement total, commercialisable et qualité sanitaire	28/11/2022
	Aylton : Notation rendement total, commercialisable et qualité sanitaire	18/01/2023

III.1.c. Collecte d'échantillons, suivi et analyse de données

III.1.c.i. Suivi des essais avec les appareils de mesures évalués

L'essai mené en 2021 a été suivi en cours de culture par les trois appareils évalués. Comme nous le verrons dans la suite de ce rapport, le Multiplex a été employé sur plante entière et a montré des résultats plus encourageants que lors de l'essai mené en condition contrôlée, et les analyses des données acquises par le XRF ont confirmé leur potentiel pour suivre la nutrition P et K, en particulier sur tissus séchés. Cependant, en raison de problèmes techniques, les échantillons de feuilles récoltés à maturité en 2021 n'ont pas pu être analysés par XRF. De plus, en raison de pannes et de problèmes techniques, le Multiplex et le XRF n'ont pas pu être employés sur l'essai mené en 2022-2023. Les analyses se sont donc concentrées sur le NIRS et le suivi de la teneur en N prédite sur cette seconde année d'essai. Les investigations sur cet outil ont donc pu être davantage poussées, avec une mise en commun des données générées lors des trois essais pour améliorer les modèles de prédictions des teneurs en N établis. Les dates de suivis des 2 essais par les appareils évalués sont indiquées dans le tableau 9.

Tableau 9 : Dates de suivi par les appareils évalués et nombre de mesure réalisées en 2021 (A) et 2022 (B). Les échantillons secs générés lors de ces essais, analysés par XRF et/ou NIRS, ont également été analysés par IRMS et ICP-MS en 2021 et par IRMS en 2022.

A - Essai 2021

	Multiplex	XRF								NIRS							
		Frais				Sec				Frais				Sec			
		Feuille agée	Feuille jeune	Blanc	Feuille agée	Feuille jeune	Blanc	Plante		Feuille agée	Feuille jeune	Blanc	Feuille agée	Feuille jeune	Blanc	Plante	
29/07/2021	48	16	16							32	32						
05/08/2021	48	24	24							24	24						
26/08/2021	48	24	24							24	24						
02/09/2021	48	32	32							40	40						
09/09/2021	48	48	48		32	32		32		48	48		32	32		32	
23/09/2021	32																
30/09/2021	32	24	24							40	40						
A maturité	48	44	44	44			44	44		44	44	44	24	24	44	44	
Total	352	212	212	44	32	32	44	76		252	252	44	56	56	44	76	
Total appareil	352	652								780							

B - Essai 2022

	NIRS							
	Frais				Sec			
	Feuille agée	Feuille jeune	Blanc		Feuille agée	Feuille jeune	Blanc	Plante
02/08/2022	48	48						32
09/08/2022	48	48						32
17/08/2022	48	48						32
24/08/2022	48	48						32
31/08/2022	48	48						32
29/09/2022	24	24						32
19/10/2022	32	32						32
A maturité	32	32	32		32	32		32
Total	328	328	32		32	32	32	256
Total appareil	1040							

III.1.c.ii. Récolte et échantillonnage

Des récoltes ont été effectuées à maturité afin de mettre en évidence d'éventuelles différences de rendement et de qualité entre modalités. Des prélèvements ont également été réalisés en cours de culture afin d'enrichir la base de données d'échantillons. Différents types d'échantillons ont été

généérés lors de ces essais :

- Des échantillons de feuilles jeunes, de feuilles âgées et de blancs ayant fait l'objet de mesures XRF en 2021 et NIRS en 2021 et 2022 sur matériel frais et sec de manière similaire à l'essai en conditions contrôlées. à deux reprises en 2021 (le 9 septembre et à maturité) et à maturité en 2022 (Tableau 9).
- Des échantillons de poireaux entiers séchés à l'étuve et grossièrement broyés analysés par le NIRS. Ces récoltes ont été réalisées à deux reprises en 2021 (le 9 septembre et à maturité) et régulièrement en 2022 (les 2, 9, 17, 24, 31 août, le 29 septembre, le 19 octobre et à maturité, tableau 9).

Ce dernier mode d'échantillonnage est évalué afin de développer un outil basé sur un suivi des teneurs en N à l'échelle de la plante entière.

Les échantillons secs de feuilles, de blancs et de plantes entières générés lors de ces essais, analysés par XRF et/ou NIRS, ont également été analysés par IRMS pour déterminer leurs teneurs en N en 2021 et en 2022 et par ICP-MS en 2021 (analyse des teneurs en P, K, S, Ca, Zn, Cu...). Les blancs de poireaux secs à maturité ont également été envoyés à l'Université de Liège pour en analyser le contenu en acide ascorbique, polyphénols et leur capacité antioxydante (mesures OARC et FRAP).

III.1.d. Analyse des données collectées

L'ensemble des analyses a été réalisé avec le logiciel R. Les données collectées par les appareils ont été visualisées au cours du temps afin de détecter d'éventuelles différences associées aux modalités de fertilisation appliquées dans les différents essais. Des tests de Wilcoxon ou de Newman-Keuls ont été appliqués afin de mettre en évidence des différences significatives entre modalités.

Des nouveaux modèles de prédiction ont été établis par PLSR à partir des bases de données spectrales, élémentaires et biochimiques enrichies des mesures et analyses réalisées lors des trois essais mis en œuvre dans le projet, selon une procédure plus complète que celle mise en œuvre dans l'essai réalisé en condition contrôlée (Figure 23):

- Une première étape de modélisation avec validation croisée, comparable à celle réalisée uniquement avec les données obtenues en conditions contrôlées, est mise en œuvre sur 75% des différentes bases de données spectrales (i.e. obtenues sur les feuilles et blancs frais et sec et plantes sèches).
- Une seconde étape d'évaluation sur les 25% restant, permet de tester les modèles établis sur des données n'ayant pas servies à leur création.

Les modèles sont considérés comme validés par cette procédure s'ils possèdent un nombre de composantes supérieur à 1, un coefficient de prédiction (R^2_p) élevé (établi arbitrairement à $R^2_p > 0,5$) et une RMSE de prédiction ($RMSE_p$) faible. Seules les bases de données obtenues après correction des écarts dus à la commutation entre les capteurs suivi d'un lissage de Savitzky-Golay avec un polynôme de degré 3 (bases dites « snv ») ont été retenues pour ces analyses, car les modèles établis à partir de ces bases ont présenté de meilleurs coefficients que ceux établis avec les bases de données dérivées (bases dites « sg »).

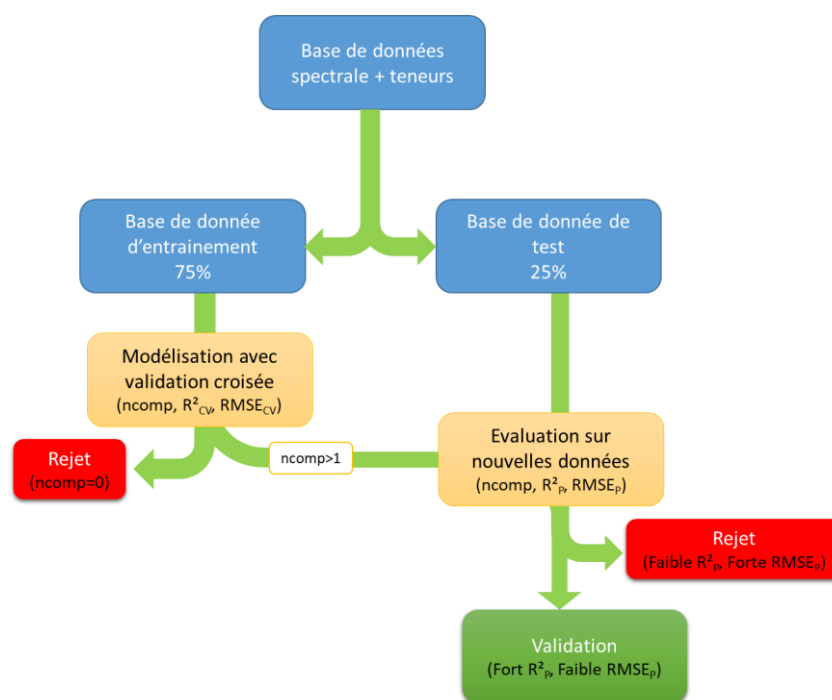


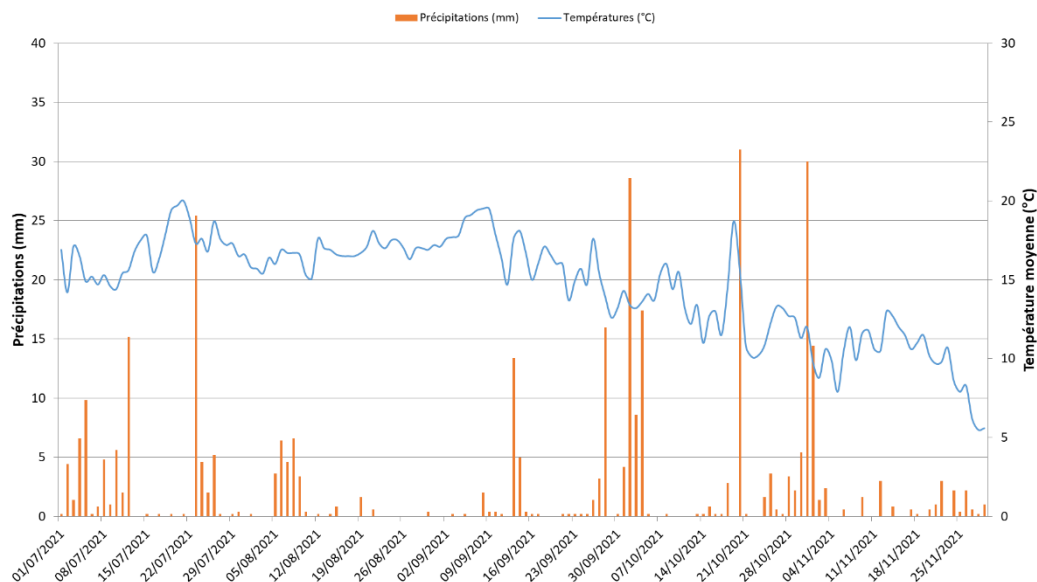
Figure 23 : Procédure mise en œuvre pour la création et l'évaluation de modèles de prédictions par PLSR des teneurs élémentaires et biochimiques à partir des bases de données spectrales générées lors des trois essais du projet PoirOAD.

III.2. Résultats

III.2.a. Suivi météorologique

Les évolutions de la température moyenne journalière et de la pluviométrie reçue au cours des essais menés en 2021 et en 2022 sont présentées dans la figure 24.

A : Essai 2021



B : Essai 2022

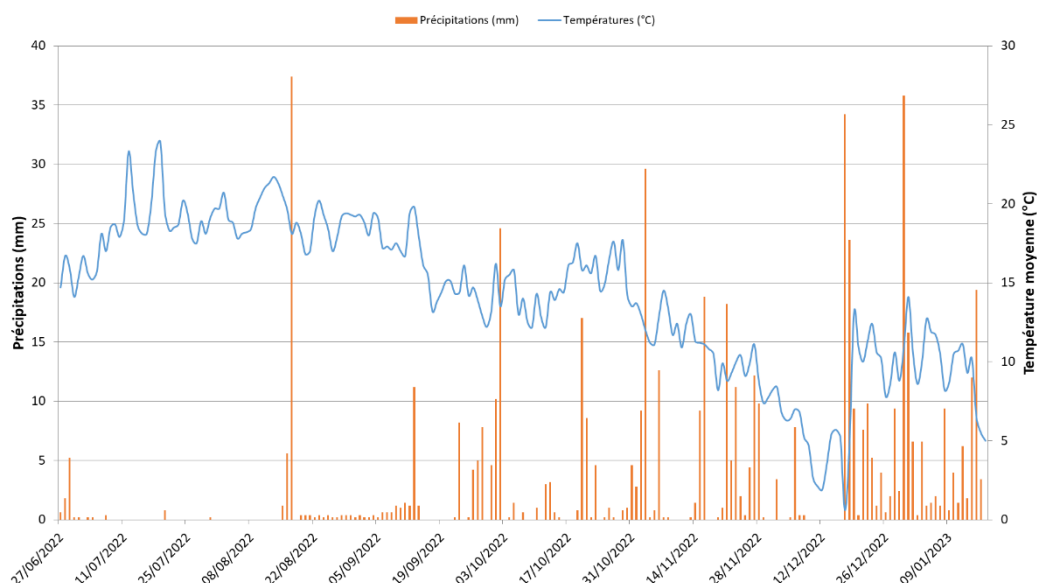


Figure 24 : Evolutions des températures et de la pluviométrie au cours des essais menés en 2021 (A) et 2022 (B).

La température moyenne observée était relativement stable durant l'essai mené en 2021 (14,7°C en moyenne), avec un maximum de 20°C le 21 juillet 2021 et un minimum de 5,5°C observé le 28 novembre 2021. En 2021, des précipitations régulières ont été enregistrées sur les premières semaines d'essai (entre juillet et mi-août) ainsi qu'à partir de septembre. Une période relativement sèche est survenue en plein cœur de l'été (de mi-août à début septembre).

En 2022, la température moyenne observée a été davantage contrastée qu'en 2021 (14,2°C en moyenne), avec un maximum de 23,9°C atteint le 19 juillet 2022 et un minimum de 0,6°C atteint le 17 décembre 2022. Cette année d'essai a été marquée par une sécheresse estivale importante, comme indiqué dans la figure 24B par de très faibles précipitations et une température élevée durant cette période. Les faibles précipitations ont été compensées par des irrigations afin de satisfaire les besoins de la culture et limiter l'occurrence d'un stress hydrique. L'automne a également été relativement doux par rapport à l'année précédente.

L'évolution des cumuls de températures reçus par les 2 essais depuis la plantation, présentés dans la figure 25, ont été calculés à partir des données de températures maximum et minimum journalières en prenant une température de base de 2°C selon la formule suivante :

$$\text{Cumul de température (°Cj)} = \sum \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} - T_{\text{base}}$$

Cumul de température sur les deux essais

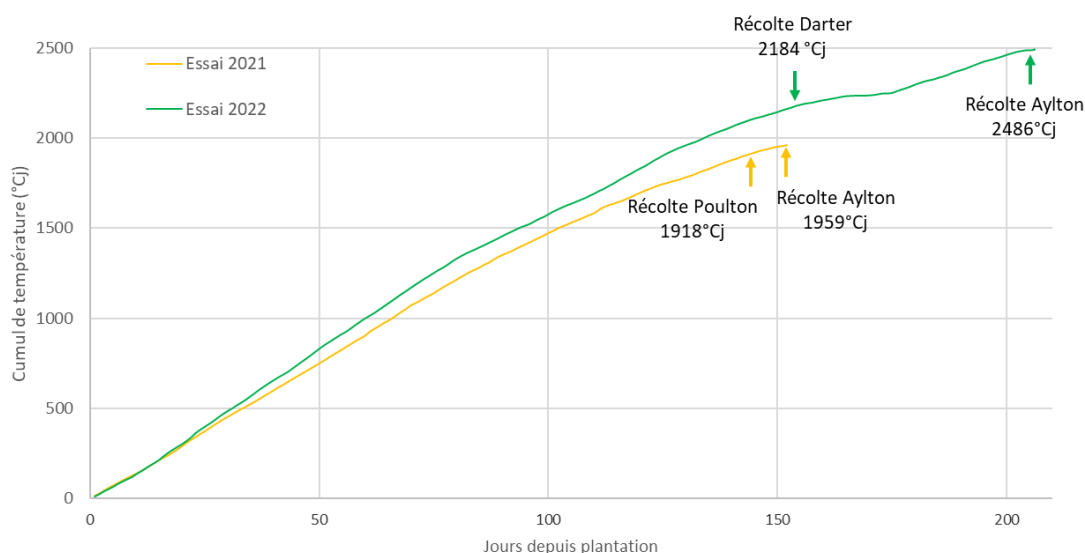


Figure 25 : Evolution du cumul de température depuis la plantation au cours des essais menés en 2021 et 2022.

Les différences de température moyenne observées ces deux années d'essais se traduisent par des températures cumulées plus élevées en 2022 par rapport à 2021. Après 50 jours de culture déjà, l'essai mis en place en 2022 avait perçu 83°Cj supplémentaires par rapport à l'essai réalisé en 2021. Ces différences se sont accentuées au cours du temps, atteignant 104°Cj après 100 jours de culture et 194°Cj après 150 jours de culture. Ces différences ont pu avoir des conséquences importantes sur la croissance et le développement de la culture.

III.2.b. Impact des modalités sur le rendement total, commercialisable et la qualité sanitaire

III.2.b.i. Impact des modalités sur la biomasse, le diamètre des poireaux cultivés et le rendement total

Les biomasses et diamètres des poireaux obtenus à l'issu des essais réalisés en 2021 et 2022 sont respectivement présentés dans les figures 26 et 27.

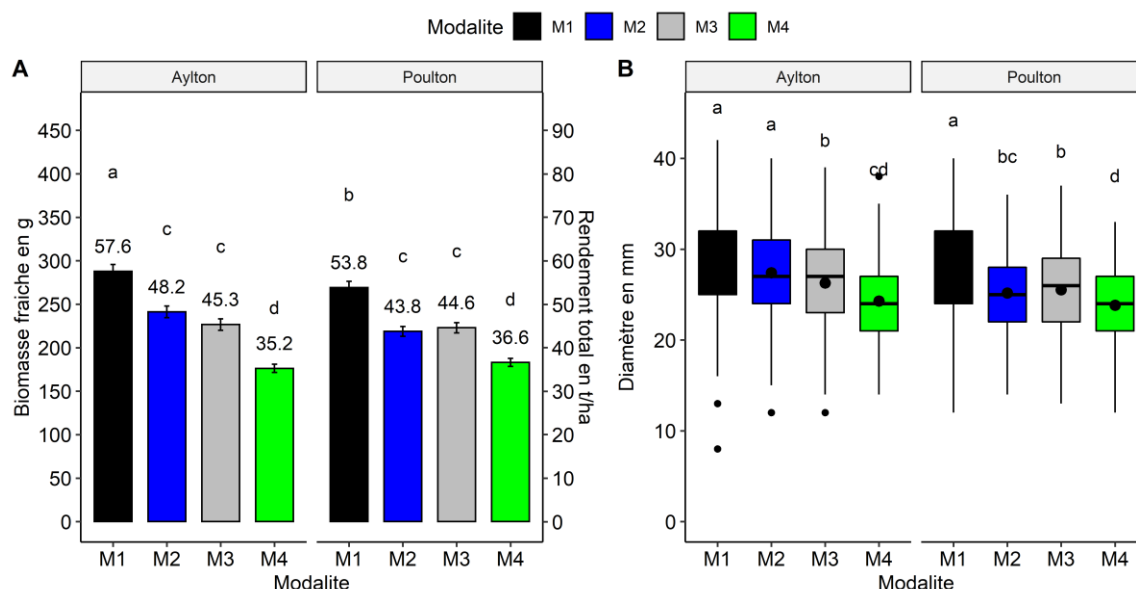


Figure 26 : Impact des modalités de fertilisation sur la biomasse fraîche (A) et le diamètre (B) des poireaux cultivés en 2021.
A : Le rendement est calculé pour une densité de 200000 poireaux par hectare.

En 2021, les rendements totaux atteints pour les deux variétés cultivées, Aylton et Poulton, ont été relativement proches, pour des doses d'apport cependant différentes entre les variétés. L'apport de 90 UN supplémentaire réalisé pour Aylton dans la modalité 1 par rapport à Poulton n'a eu qu'un impact relativement faible sur le rendement total. Pour les deux variétés, les meilleurs rendements ont été atteints pour la modalité 1 fertilisée à la plantation selon le bilan de fumure, et les plus faibles pour la modalité 4, ayant reçu des apports correspondant à 10% de ceux réalisés sur la modalité 1. Le rendement total déterminé pour cette modalité est réduit de 39% et de 32% par rapport à M1 pour Aylton et Poulton respectivement. Les rendements totaux atteints dans les modalités 2 et 3, ayant reçues 50% des apports en N de M1, sont équivalents, et ceux pour les deux variétés (en moyenne - 18% du rendement total par rapport à M1). Les diamètres des poireaux suivent les mêmes tendances, avec cependant des différences moins marquées que celles mises en évidence sur les biomasses.

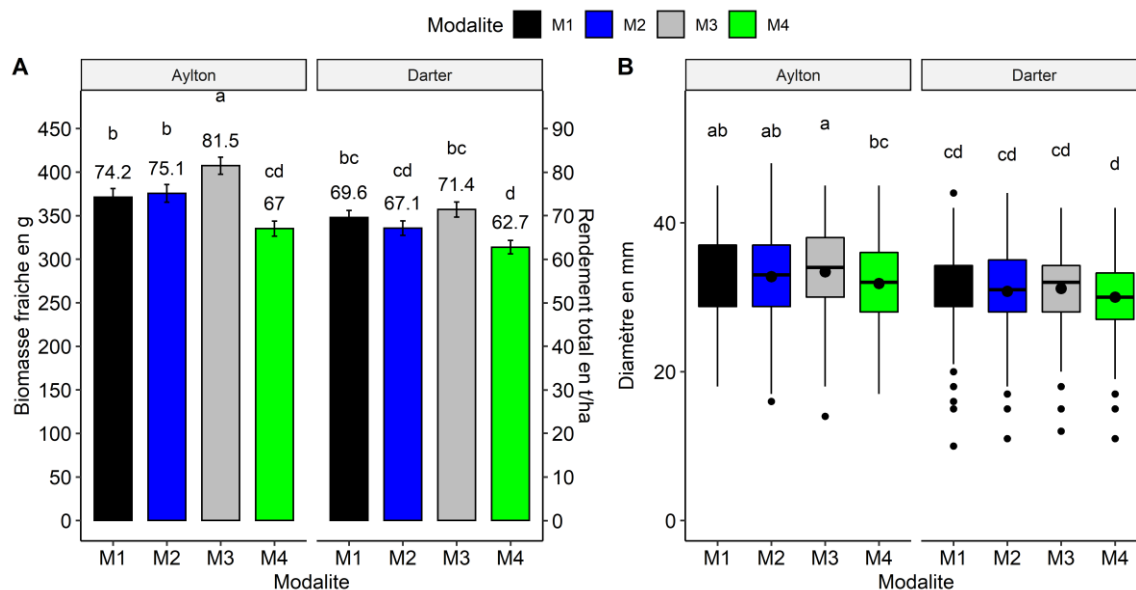


Figure 27 : Impact des modalités de fertilisation sur la biomasse fraîche (A) et le diamètre (B) des poireaux cultivés en 2022.

A : Le rendement est calculé pour une densité de 200000 poireaux par hectare.

En 2022, les rendements totaux atteints pour les deux variétés cultivées, Aylton et Darter ont été supérieurs à ceux obtenus en 2021, de près de 28% pour Aylton cultivés selon la modalité 1. Cette année encore, bien qu'elles aient reçues des doses de fertilisant différentes, les rendements obtenus pour les deux variétés sont relativement proches. Les modalités de fertilisation ont eu des impacts significatifs sur les rendements totaux à maturité. Les différences observées entre les modalités sont cependant moins contrastées qu'en 2021 : les meilleurs rendements sont cette fois obtenus pour la modalité 3, fertilisée selon le bilan de fumure (apport total équivalent à M1) de manière fractionnée. Le gain de rendement associé à cette pratique est de 7,3 t de poireau par hectare pour Aylton soit près de 10% d'augmentation du rendement par rapport à un apport équivalent à la plantation (M1). Bien qu'ils soient plus élevés que ceux observés en 2021, les plus faibles rendements sont observés pour la modalité 4, ayant reçu un apport correspondant à 10% de celui réalisé sur la modalité 1. Le rendement total déterminé pour cette modalité n'est réduit en moyenne que de 10% par rapport à M1 pour les deux variétés. Les rendements totaux atteints dans la modalité 2, sont équivalents à ceux observés pour la modalité 1, et ceux pour les deux variétés (pour un apport réduit de 50% par rapport à M1). De même qu'en 2021, les diamètres des poireaux suivent les mêmes tendances que les biomasses, les plus élevés étant mis en évidence pour la modalité 3 chez Aylton, avec cependant des différences moins marquées que celles mises en évidence au niveau des biomasses.

III.2.b.ii. Impact des modalités sur la qualité sanitaire des poireaux cultivés

Les défauts observés sur les poireaux récoltés à maturité dans les différentes modalités ont été identifiés. Le tri réalisé a ainsi permis de séparer les poireaux respectant les critères commerciaux (calibres entre 2 et 4 cm et absence de maladie) et de mettre en évidence l'impact des modalités sur les différents critères pouvant conduire au retrait d'une partie de la production (Figure 28).

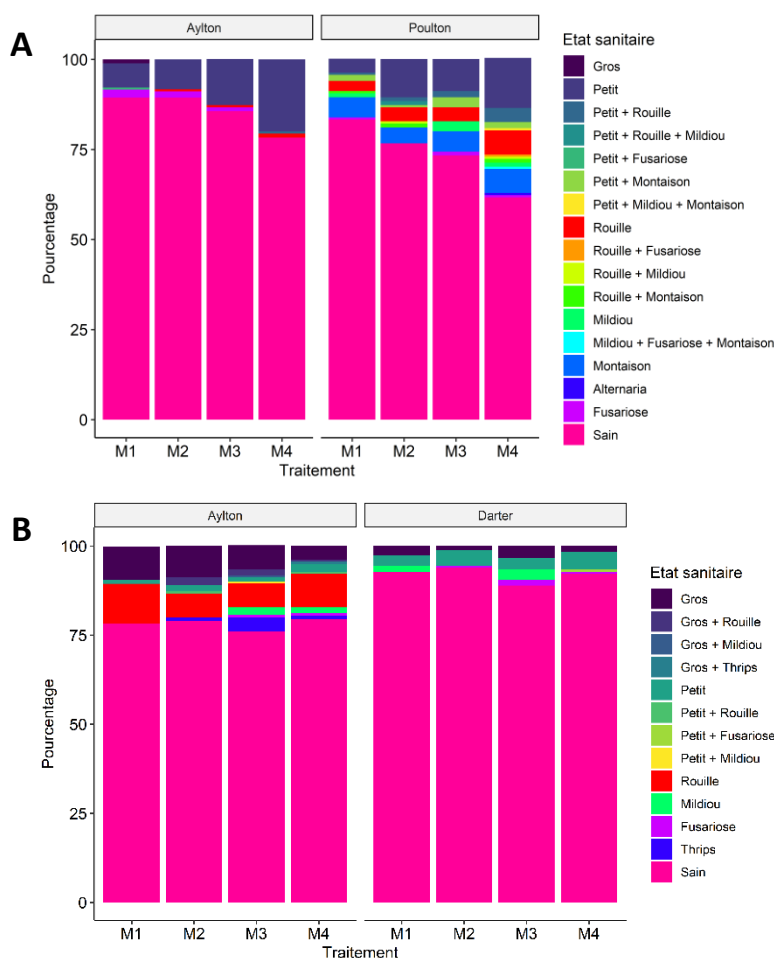


Figure 28 : Impact des modalités de fertilisation sur la proportion de poireaux affectés par les différents défauts observés à la récolte en 2021 (A) et en 2022 (B)

En 2021, Poulton a davantage été touchée que Aylton par des défauts d'ordre sanitaire, notamment par la rouille. Cette variété a également été plus sujet à la montaison que Aylton. Pour les deux variétés, on observe une proportion de poireaux de petite taille plus importante dans la modalité 4 que dans les trois autres modalités. Les différents problèmes sanitaires observés ne sont pas significativement affectés par les modalités de fertilisation mises en œuvre cette année d'essai.

En 2022, c'est cette fois Aylton qui a davantage été touchée que Darter par des défauts d'ordre sanitaire, notamment par la rouille, mais aussi par le thrips. Cette année d'essai, on observe pour les deux variétés une proportion de gros calibre plus importante chez Aylton que chez Darter, et qui apparait chez Aylton plus faible dans la modalité 4 que dans les autres modalités. De même qu'en 2021, les différents problèmes sanitaires observés ne sont pas significativement affectés par les modalités de fertilisation mises en œuvre en 2022.

III.2.b.iii. Impact des modalités sur le rendement commercialisable

L'élimination des poireaux affectés par les différents défauts observés à maturité permet le calcul des rendements commercialisables obtenus en 2021 et en 2022 (Figure 29).

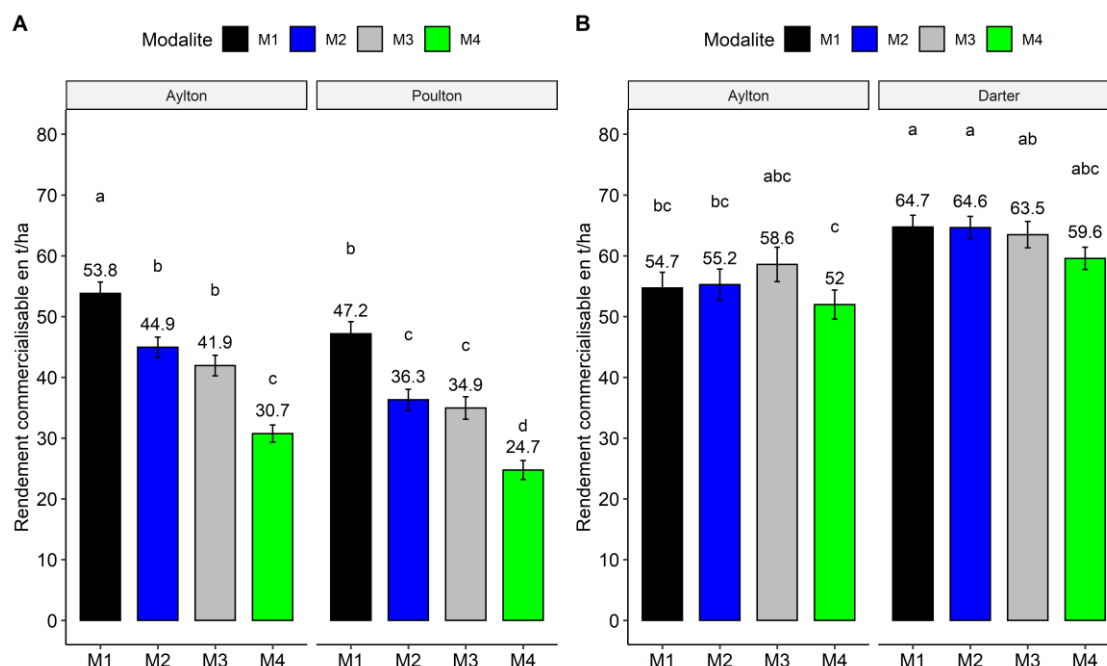


Figure 29 : Impact des modalités de fertilisation appliquées en 2021 (A) et 2022 (B) sur les rendements commercialisables

En 2021, les rendements commercialisables atteints pour Aylton ont été significativement supérieurs à ceux atteints pour Poulton, principalement en raison des affections plus importantes qui ont touchés Poulton. Cette année d'essai, le retrait des poireaux de petits calibres a grandement exacerbé les différences de rendement commercialisables entre les modalités par rapport à celles déjà observées sur le rendement total. Pour les deux variétés, les meilleurs rendements commercialisables ont été atteints pour la modalité 1 fertilisée à la plantation selon le bilan de fumure, et les plus faibles pour la modalité 4, ayant reçu des apports correspondant à 10% de ceux réalisés sur la modalité 1. Le rendement commercialisable déterminé pour cette modalité est réduit de 43% et de 48% par rapport à M1 pour Aylton et Poulton respectivement. Les rendements commercialisables atteints dans les modalités 2 et 3, ayant reçues 50% des apports en N de M1, sont équivalents, et ceux pour les deux variétés (en moyenne -22% du rendement total par rapport à M1).

En 2022, les rendements commerciaux atteints pour les deux variétés cultivées, Aylton et Darter ont été supérieurs à ceux obtenus en 2021, de près de 28% pour Aylton cultivés selon la modalité 1. Cette année encore, bien qu'elles aient reçues des doses de fertilisant différentes, les rendements commerciaux obtenus pour les deux variétés sont relativement proches, et sont même plus élevés chez Darter en raison des défauts plus importants observés chez Aylton. Les différences observées entre les modalités sont moins contrastées qu'en 2021, et ne ressortent d'ailleurs pas significativement entre les modalités. Chez Aylton, le meilleur rendement est obtenu pour la modalité 3, fertilisée selon le bilan de fumure de manière fractionnée. Bien qu'ils soient élevés, les plus faibles rendements sont observés pour la modalité 4, ayant reçu un apport correspondant à 10% de celui réalisé sur la modalité 1. Le rendement total déterminé pour cette modalité n'est réduit en moyenne que de 6% par rapport à M1 pour les deux variétés. Les rendements commerciaux atteints dans la modalité 2 sont équivalents à ceux observés pour la modalité 1, et ceux pour les deux variétés (pour un apport réduit de 50% par rapport à M1).

III.2.c. Impact des modalités de fertilisation sur la composition élémentaire et biochimique des poireaux

III.2.c.i. Essai 2021

Les analyses élémentaires réalisées par IRMS et ICP-MS sur les échantillons récoltés en cours de culture et à maturité en 2021 permettent de mettre en évidence les effets des modalités de fertilisation sur la composition des poireaux cultivés (Figure 30).

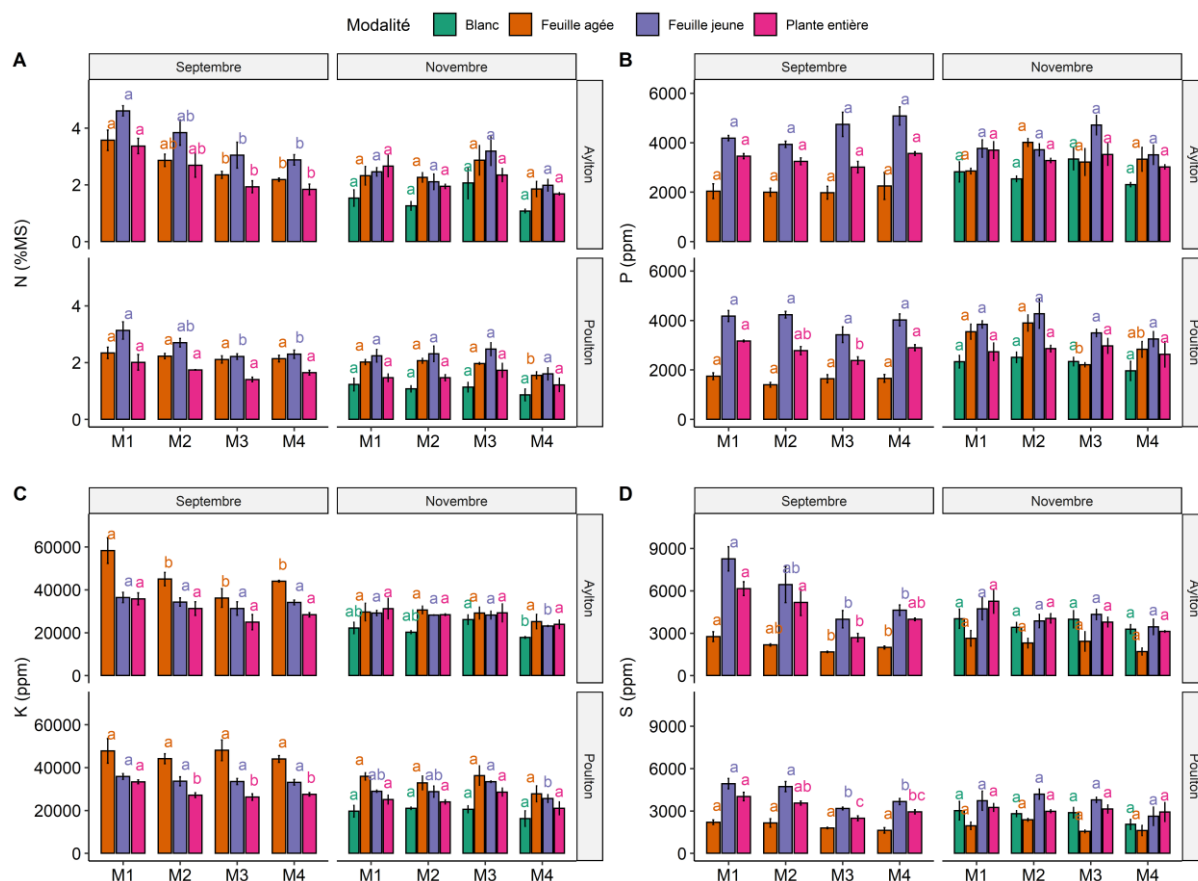


Figure 30 : Analyses élémentaires réalisées par IRMS et ICP-MS sur les échantillons de blancs, de feuilles âgées, de feuilles jeunes et de plantes entières récoltés (variétés Aylton et Poulton) en septembre et en novembre lors de l'essai réalisé en 2021. A : teneur en azote. B : teneur en phosphore. C : teneur en potassium. D : teneur en soufre.

Aylton présente des teneurs en N plus élevées que Poulton dans les différents organes ainsi que dans la plante entière. En septembre, avant ré-apport de fertilisant sur la modalité 3, les teneurs en N, K et S des poireaux cultivés selon les modalités 3 et 4 sont réduites par rapport à celles observées dans les poireaux cultivés selon la modalité 1 pour les deux variétés. Pour le N et le S, cette réduction est particulièrement marquée au niveau des feuilles jeunes. La teneur en potassium de la plante entière apparaît également réduite dans la plante entière en réponse aux modalités 2, 3 et 4 chez Poulton, et au niveau de la feuille âgée chez Aylton.

A maturité (en novembre), aucune différence significative de teneurs en N, P, K ou S n'est plus mise en évidence entre les poireaux cultivés selon les différentes modalités mises en œuvre. A cette date, les teneurs en N et en K apparaissent cependant légèrement réduites dans les feuilles jeunes des poireaux

cultivés selon la modalité 4 par rapport à ceux cultivés selon la modalité 1.

Ainsi, les différences observées en septembre apparaissent bien refléter les modalités de fertilisation mises en œuvre, se traduisant à maturité par des différences de rendements décrites précédemment. De plus, les données collectées au niveau de la plante entière semblent davantage refléter les situations nutritionnelles contrastées appliquées qu'au niveau d'organes spécifiques : les différences entre modalités observées en septembre ressortent de manière significative pour les 4 éléments considérés. Cette mesure réalisée sur plante entière pourrait être exploitable plus directement que les mesures réalisées sur des organes spécifiques, car elle permet un calcul direct de la quantité d'élément absorbé par la culture au moment de la mesure, moyennant simplement une détermination de la biomasse végétale produite à cet instant (Figure 31).

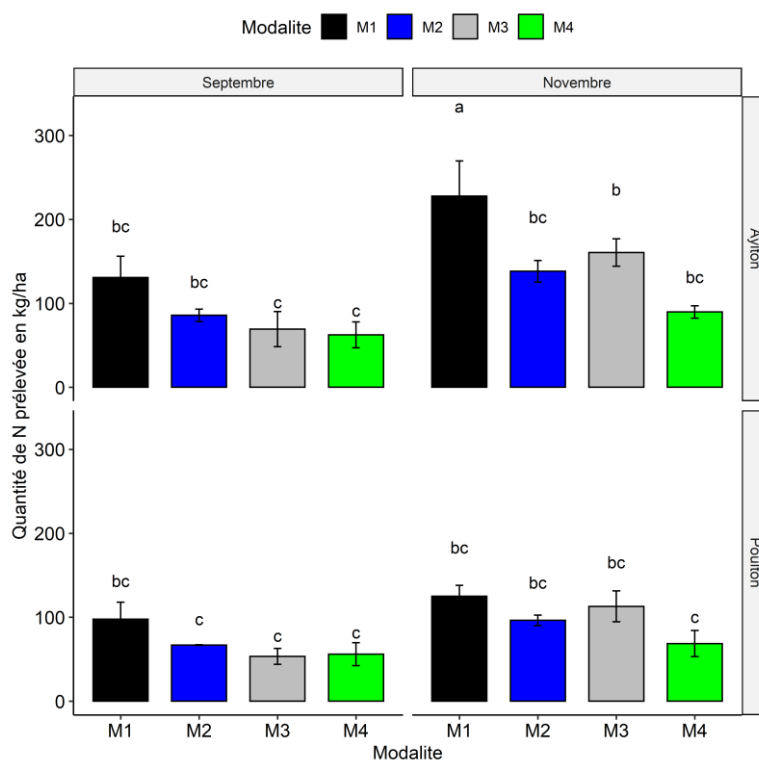


Figure 31 : Quantités de N prélevées en septembre et en novembre dans les différentes modalités de l'essai réalisé en 2021. Ces données ont été calculées sur la base des biomasses et des teneurs en N déterminées par IRMS de plantes entières récoltées le 9 septembre 2021 et à la récolte finale, en novembre.

Les modalités de fertilisation mises en œuvre se traduisent clairement sur les quantités de N prélevées (N exporté) en septembre et à la récolte finale par les deux variétés. Début septembre, une grande part de l'azote retrouvé à maturité dans les modalités 1, 2 et 4 a d'ores et déjà été absorbé par la culture (entre 60 et 70% chez Aylton et entre 70 et 80% chez Poulton). A contrario, dans la modalité 3, plus de la moitié de l'azote retrouvé à maturité est prélevé entre septembre et la récolte finale (57% chez Aylton et 43% chez Poulton). Comparé à une fertilisation totale équivalente au semis (M2), le réapport réalisé dans la modalité 3 après la mesure réalisée en septembre a même eu tendance à avoir un impact positif sur la quantité de N prélevée par la culture à maturité (+22,38 UN prélevées chez Aylton et +16,5 UN prélevées chez Poulton en moyenne par rapport à M2 ; Figure 31).

Les échantillons de blancs récoltés à maturité ont également été analysés par l'Université de Liège pour en déterminer leurs teneurs en acide ascorbique, en polyphénols, ainsi que leurs capacités antioxydantes par les méthodes ORAC et FRAP (Figure 32).

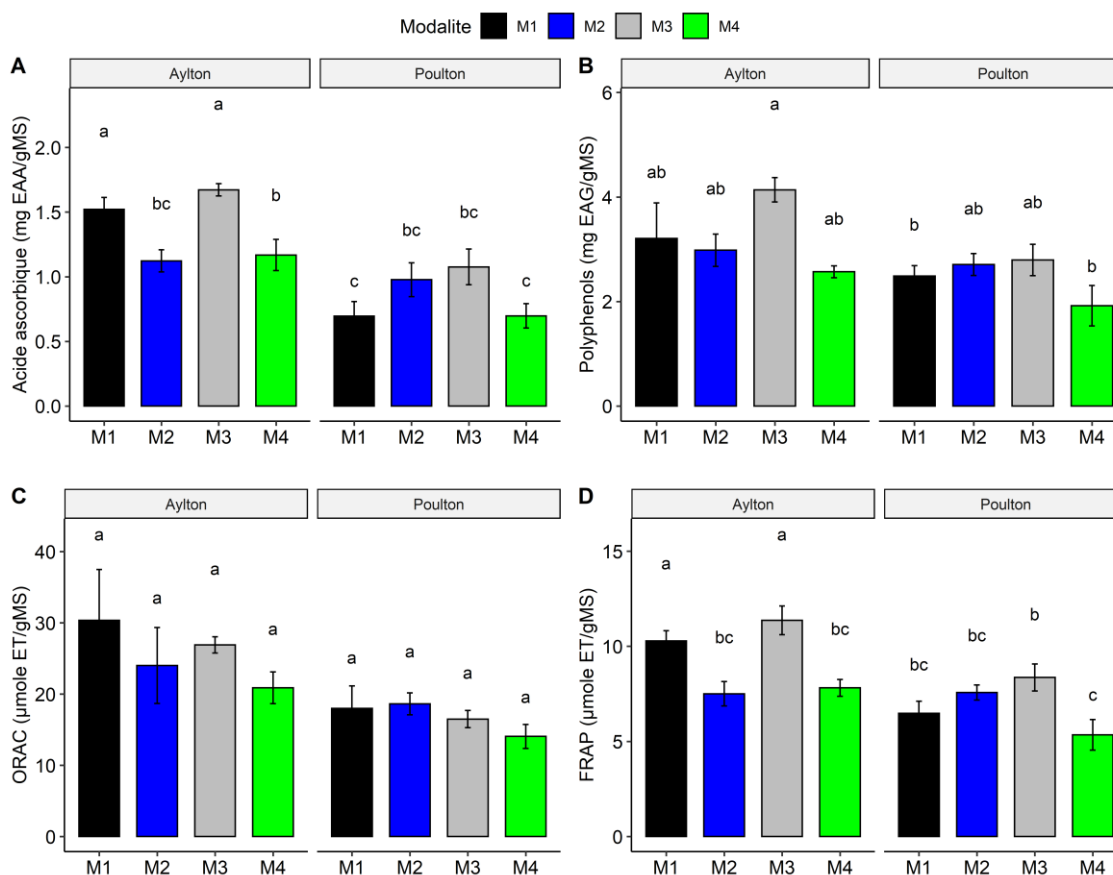


Figure 32 : Analyses biochimiques réalisées au niveau du blanc récolté à maturité en 2021. A : teneur en acide ascorbique. B : teneur en polyphénols. C : capacité antioxydante mesurée par la méthode ORAC. D : capacité antioxydante mesurée par la méthode FRAP.

Chez Aylton, la teneur en acide ascorbique est significativement plus faible dans les blancs des modalités 2 et 4 que dans ceux des modalités 1 et 3. Pour cette mesure, aucune différence n'est mise en évidence au niveau des blancs de la variété Poulton. Les teneurs en polyphénols n'apparaissent pas significativement affectées par les modalités de fertilisations appliquées pour les deux variétés cultivées. Alors que la mesure de la capacité antioxydante à maturité au niveau du blanc par la méthode ORAC ne semble pas mettre en évidence de différences entre les modalités, on observe des capacités antioxydantes déterminées par la méthode FRAP supérieures dans les blancs des modalités 1 et 3 chez Aylton par rapport aux autres modalités. Chez Poulton, la capacité antioxydante déterminée par la méthode FRAP est plus élevée dans les blancs de la modalité 3 que dans ceux de la modalité 4.

Ainsi, les effets des différentes modalités de fertilisation sur ces caractères biochimiques semblent dépendre de la variété, mais aussi des conditions de fertilisation.

III.2.c.ii. Essai 2022

Les analyses réalisées sur l'essai de 2022 se sont concentrées sur la détermination de la teneur en

azote par IRMS des plantes entières en cours de culture et à maturité, des feuilles jeunes, âgées et des blancs à maturité ainsi que sur la détermination des teneurs en acide ascorbique, en polyphénols et des capacité antioxydantes (méthodes ORAC et FRAP) au niveau des blancs de poireaux à maturité.

La figure 33 présente l'évolution de la biomasse et de la teneur en N d'un poireau entier au cours du temps, ainsi que de la quantité de N prélevée par la culture calculée à partir de ces deux précédentes variables.

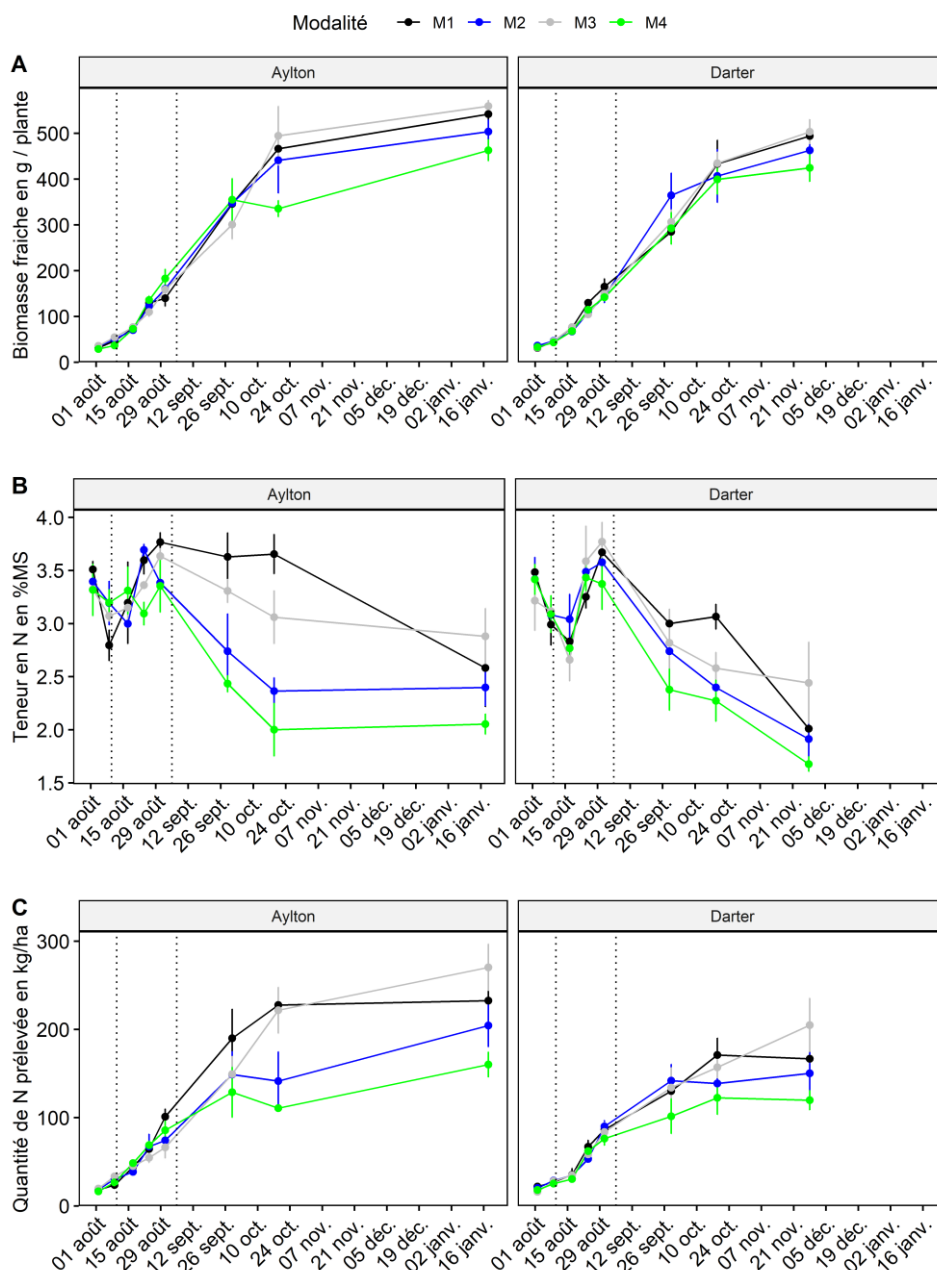


Figure 33 : Evolution de la biomasse fraîche non parée de la plante entière, de sa teneur en N déterminée par IRMS et de la quantité de N prélevée calculée par unité de surface au cours du temps en 2022.

Pour les deux variétés, la croissance se fait principalement durant les 5 premiers mois de culture (i.e. jusqu'à la mi-octobre) puis ralentit jusqu'à la récolte (Figure 33A). La croissance de la culture suit une

évolution similaire entre les modalités jusque tardivement, vers la fin septembre pour Aylton et mi-octobre pour Darter. La croissance des poireaux de la modalité 4 apparaît en fin de culture légèrement plus faible que dans les trois autres modalités. Les réapproports réalisés sur la modalité 3 semblent bien avoir permis de maintenir la croissance des poireaux à des niveaux comparables à ceux de la modalité 1.

Les teneurs en N déterminées par IRMS au cours du temps suivent jusqu'à la fin août des évolutions comparables chez les deux variétés étudiées cultivées selon la modalité 1 : on observe dans un premier temps (i.e. jusqu'à début août) une diminution de la teneur en N de la plante entière, suivie d'une phase très courte, jusqu'à fin août, durant laquelle la teneur en N augmente (Figure 33B). A partir de septembre, alors que la teneur en N chez Darter diminue progressivement jusqu'à la récolte, elle se maintient chez Aylton à des niveaux relativement stables jusqu'à mi-octobre, et diminue ensuite jusqu'à la récolte.

Les impacts des modalités de fertilisation sur les teneurs en N de la plante entière se manifestent bien plus tôt que sur la biomasse, et ce dès le 24 août chez Aylton : les poireaux cultivés selon les modalités 2 et 4 présentent des teneurs en N plus faibles que dans les autres modalités à partir de cette date, et ces teneurs diminuent jusqu'à mi-octobre, alors qu'elles restent stables dans la modalité 1. La teneur en N des poireaux cultivés selon la modalité 3 se maintient à des niveaux plus élevés que dans les modalités 2 et 4 et ne diffère pas significativement, bien que légèrement inférieure, à celle des poireaux de la modalité 1. Les différences observées entre modalités chez Darter se manifestent à partir du 31 août et suivent des tendances comparables à celles observées chez Aylton, bien que moins marquées. La teneur en N diminue plus rapidement et plus fortement dans les poireaux cultivés selon les modalités 2 et 4 que dans les modalités 1 et 3. De manière intéressante, les différences observées en cours de culture entre modalités sont moins marquées à maturité pour les deux variétés (cf. Figure 34). Aylton présente des teneurs en N plus élevées que Darter dans les différents organes ainsi que dans la plante entière. Pour les deux variétés, on observe, en tendance, de plus fortes teneurs en N à maturité dans les poireaux cultivés selon la modalité 3 que dans les autres modalités.

A partir des biomasses et des teneurs en N déterminées en cours de culture, nous pouvons suivre l'évolution de la quantité d'azote prélevé (N exporté) par la culture dans les différentes modalités (Figure 33C). Pour les deux variétés, le prélèvement d'azote se fait à mesure que la croissance augmente, principalement jusqu'à la mi-octobre. A la première date de mesure, le 2 août soit 1 mois après la plantation, seul 20 kgN/ha avait été prélevé par les deux variétés. Dans les modalités 2 et 4, la quantité d'azote prélevée n'augmente plus de manière significative dès la fin septembre, alors qu'elle progresse au-delà de la mi-octobre et jusqu'à la récolte dans la modalité 3. Au terme de l'essai, de par une biomasse produite et une teneur en azote légèrement supérieures aux autres modalités, la quantité d'azote prélevée par la modalité 3 est en tendance plus importante que dans les trois autres modalités.

La quantité de N prélevée à maturité dans la modalité 3 chez Aylton correspond à près de 100% de la quantité apportée (270 UN chez Aylton pour 260 UN apportées selon l'estimation de la méthode du bilan) De façon intéressante, les quantités d'azote prélevées dans les modalités 2 et 4 à maturité pour

les deux variétés et également pour la modalité 3 chez Darter sont supérieures à ce qui a été apporté à la culture (e.g. : 160 UN prélevées chez Aylton et 120 UN prélevées chez Darter dans la modalité 4 pour 108 et 100 UN apportées respectivement). Parmi les hypothèses pouvant expliquer ces différences, nous pouvons supposer que certains postes de la méthode du bilan ont été sous-estimés, comme par exemple l'azote issu de la minéralisation de l'humus ou le précédent cultural. Les températures particulièrement élevées observées cette année d'essai auraient en effet pu favoriser la mise à disposition de l'azote de ces sources par rapport à l'estimation réalisée à la mise en place de la culture.

La Figure 34 présente les teneurs en N déterminées par IRMS à maturité dans les différents organes (blancs, feuilles âgées et feuilles jeunes) ainsi que dans les poireaux entiers.

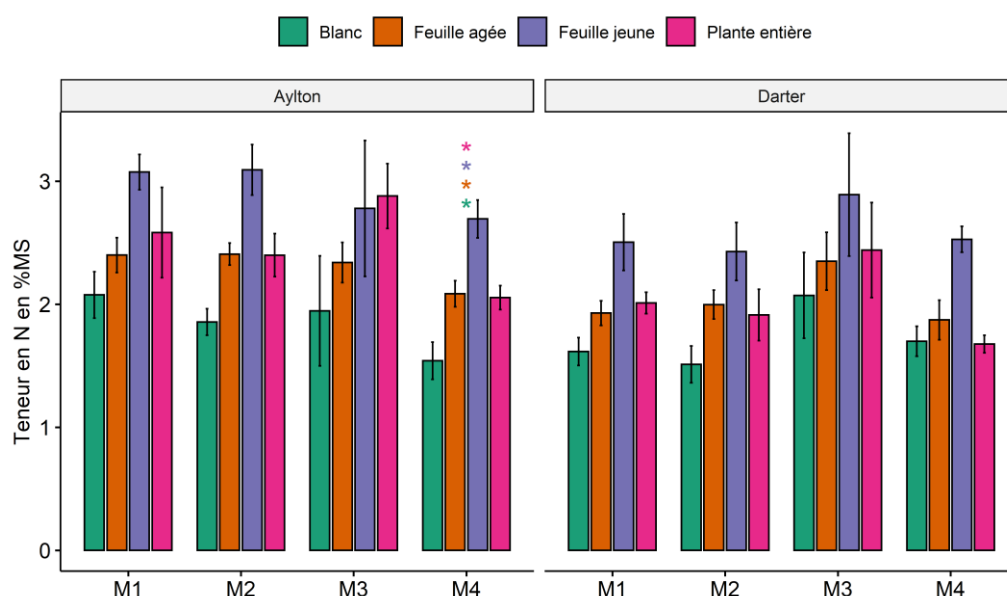


Figure 34 : Teneur en N déterminée par IRMS à maturité sur les blancs, les feuilles âgées, les feuilles jeunes et des plantes entières des deux variétés cultivées en 2022. **: $p < 0,01$; * : $p < 0,05$.

Comme observé en fin de cycle, Aylton présente à maturité des teneurs en N plus élevées que Darter dans les différents organes ainsi que dans la plante entière. Alors que les teneurs en N des différents organes et de la plante entière sont significativement réduites dans la modalité 4 chez Aylton, elles ne diffèrent pas de la modalité 1 dans les autres cas (M2 et M3). On observe néanmoins pour les deux variétés, en tendance, de plus fortes teneurs en N dans la plante entière pour les poireaux cultivés selon la modalité 3 par rapport aux autres modalités. Cette tendance est retrouvée chez Darter dans les différents organes analysés.

Tout comme pour l'essai mené en 2021, les échantillons de blancs récoltés à maturité sur cet essai ont également été analysés par l'Université de Liège pour en déterminer leurs teneurs en acide ascorbique, en polyphénols, ainsi que leurs capacités antioxydantes par les méthodes ORAC et FRAP (Figure 35).

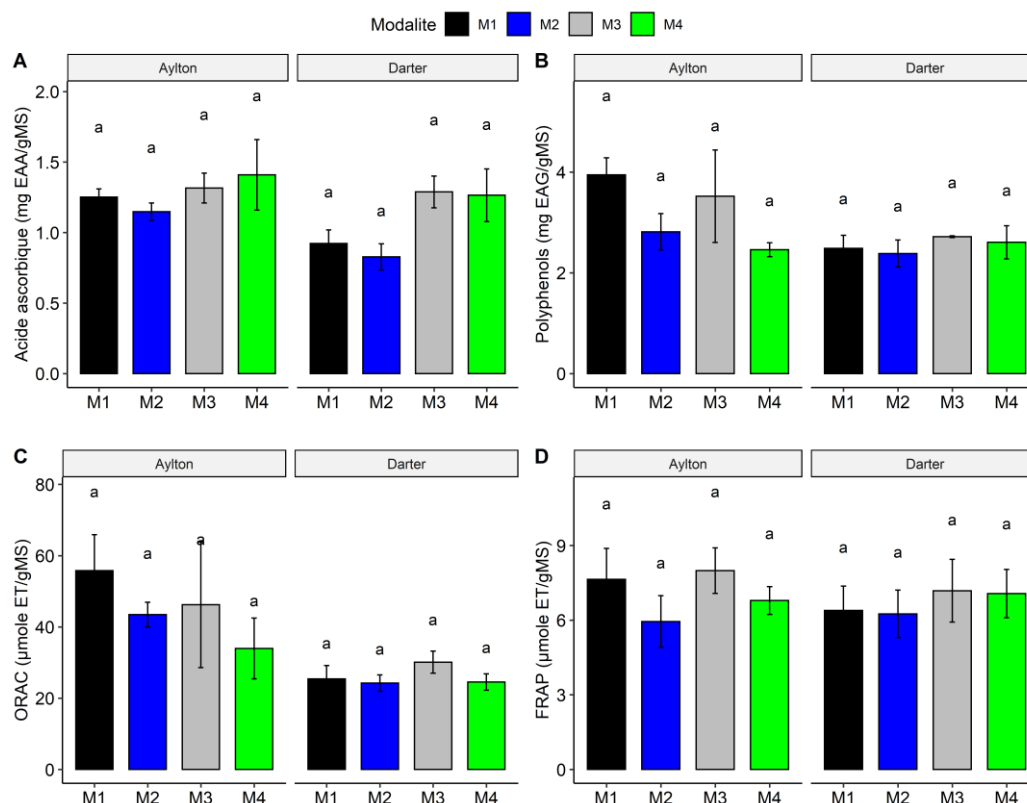


Figure 35 : Analyses biochimiques réalisées au niveau du blanc récolté à maturité sur l'essai mené en 2022. A : teneur en acide ascorbique. B : teneur en polyphénols. C : capacité antioxydante mesurée par la méthode ORAC. D : capacité antioxydante mesurée par la méthode FRAP.

Contrairement à ce que nous avons pu observer sur l'essai précédent, aucune différence significative de teneur en acide ascorbique, en polyphénols ou en capacité antioxydante n'est mise en évidence entre les modalités de fertilisation et les variétés par les analyses réalisées. On observe néanmoins en tendance de plus fortes teneurs en acide ascorbique et en polyphénols à la récolte chez Aylton que chez Darter cultivés selon la modalité 1. Les poireaux des modalités 3 et 4 ont tendance à présenter des teneurs en acide ascorbique plus élevées que les poireaux des modalités 1 et 2. De même qu'en 2021, on observe en tendance des capacités antioxydantes déterminées par la méthode FRAP supérieures dans les blancs des modalités 1 et 3 chez Aylton par rapport aux autres modalités.

III.2.d. Le Multiplex : évolution et réponse des indices aux situations nutritionnelles contrastées (Essai 2021)

Le Multiplex a été employé lors de l'essai réalisé en 2021 afin d'évaluer sa capacité à détecter les situations nutritionnelles contrastées appliquées. Des mesures ont été réalisées en mode « continu » et « ponctuel ». L'évolution des différents indices calculés à partir des données collectées est présentée dans la figure 36.

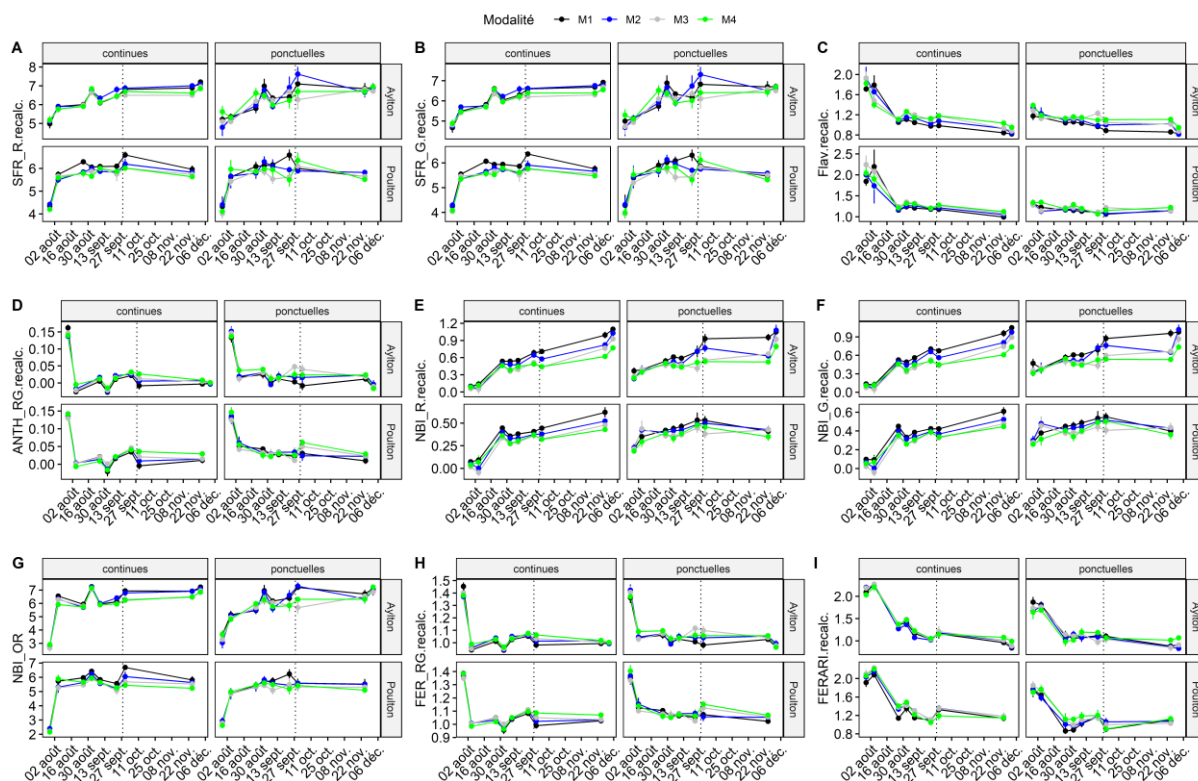


Figure 36 : Evolution des 9 indices calculés à partir des données collectées par le Multiplex lors de l'essai mis en œuvre en 2021. La ligne verticale pointillée indique la date de ré-apport de fertilisant appliqué à la modalité 3.

Contrairement à ce que nous avons observé en conditions contrôlées, certains des indices calculés semblent répondre aux conditions de fertilisations appliquées, notamment les indices NBI_R et NBI_G. Aux différentes dates de mesures, ces indices apparaissent en effet réduits dans les modalités 3 et 4 par rapport au Control, en particulier avant ré-apport de fertilisant dans la modalité 3. Chez Aylton, ces indices NBI_R et NBI_G mesurés dans la modalité 3 pour les deux dernières dates de mesure apparaissent retrouver des valeurs comparables au Control.

Bien que de légères différences d'indices puissent être mises en évidence entre les modalités de fertilisation, celles-ci ne sont pas suffisamment contrastées pour espérer employer ces mesures de manière fiable dans le cadre du développement d'un OAD de gestion de la fertilisation du poireau. De par ces observations, mais aussi en raison d'un problème technique ayant affecté le fonctionnement de l'appareil, le Multiplex n'a pas été employé lors de l'essai réalisé en 2022.

III.2.e. Le XRF (Essai 2021)

Tout comme pour le Multiplex, le XRF a été employé lors de l'essai réalisé en 2021 afin d'évaluer sa capacité à détecter les situations nutritionnelles contrastées. Des mesures ont été réalisées sur tissus frais (feuille jeune et âgée en cours de culture et à maturité, blanc à maturité) et sur tissus secs (feuilles jeunes, âgées en septembre, plantes entières en septembre et à maturité, blancs à maturité). Pour les différents éléments détectés, les valeurs obtenues par les analyses XRF réalisées sur les échantillons frais et secs ont été mises en relation avec celles obtenues par les analyses ICP-MS afin de vérifier et éventuellement améliorer les calibrations des données du XRF.

III.2.e.i. Calibration des données sur matériel frais et sec

Les relations entre les données collectées par le XRF sur tissus frais et secs et déterminées par ICP-MS pour le P, le K et le S sont présentées dans la figure 37.

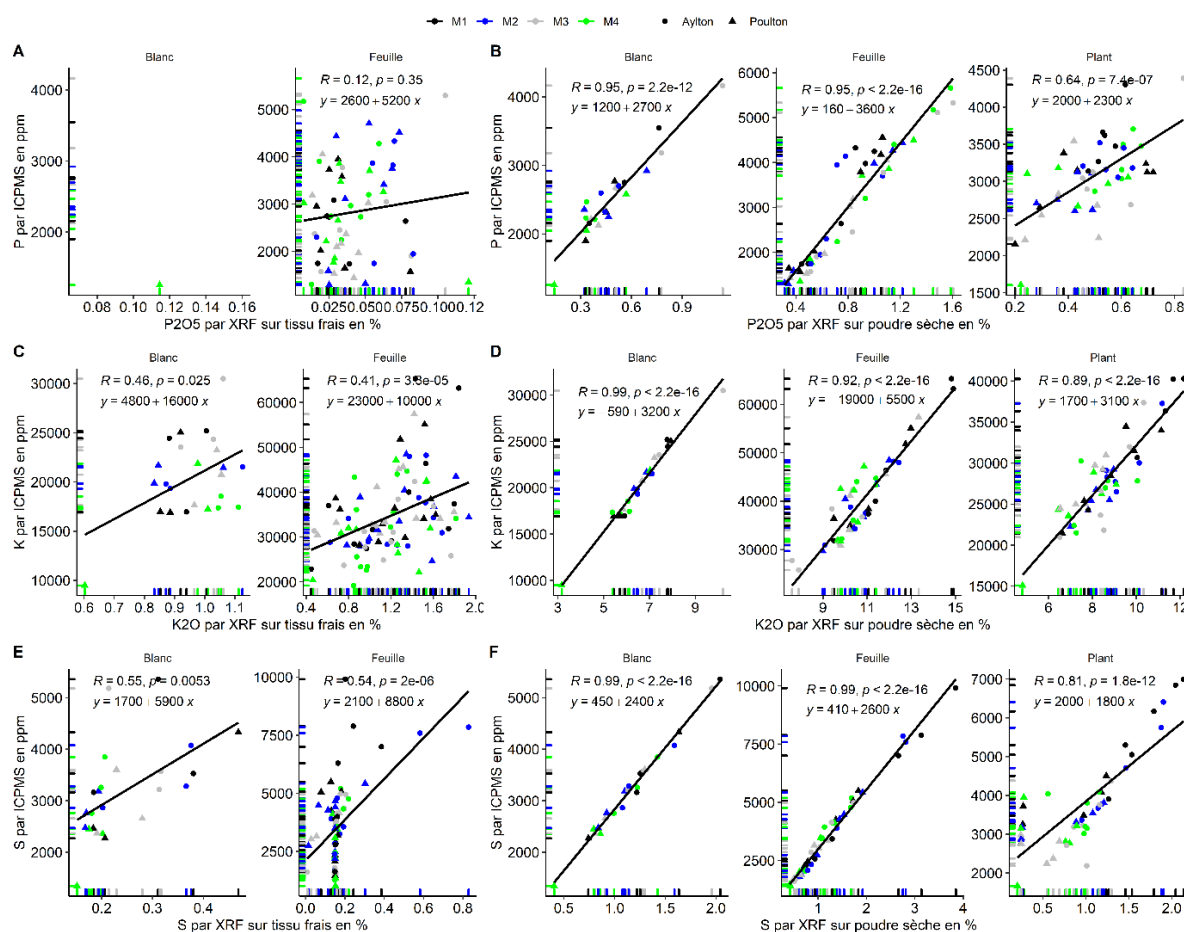


Figure 37 : Relations entre les teneurs en P₂O₅ (A, B), K₂O (C, D) et S (E, F) déterminées par XRF sur tissus frais (A, C, E) ou secs (B, D, F) et les teneurs en P, K et S analysés par ICP-MS sur les échantillons récoltés en cours de culture, en septembre et à maturité, en novembre. Des coefficients de corrélations R proches de 1 mettent en évidence de très bonnes corrélations entre les deux types d'analyses.

Tout comme nous l'avons mis en évidence lors de l'essai réalisé en conditions contrôlées, les relations sont de meilleures qualités lorsque les mesures par XRF sont réalisées sur matériel sec. Les coefficients de corrélations obtenus sur feuille et blanc frais sont très faibles et ne laissent que faiblement espérer la possibilité d'exploiter ce type de mesure pour estimer les teneurs en ces éléments. A contrario, les données collectées par le XRF sur matériel séché et broyé présentent de très bonnes corrélations avec les teneurs en P, K et S déterminées par ICP-MS.

Les relations entre les données collectées par le XRF sur tissus frais et secs et déterminées par ICP-MS pour le Ca, le Fe, le Mn et le Zn sont présentées dans la figure 38.

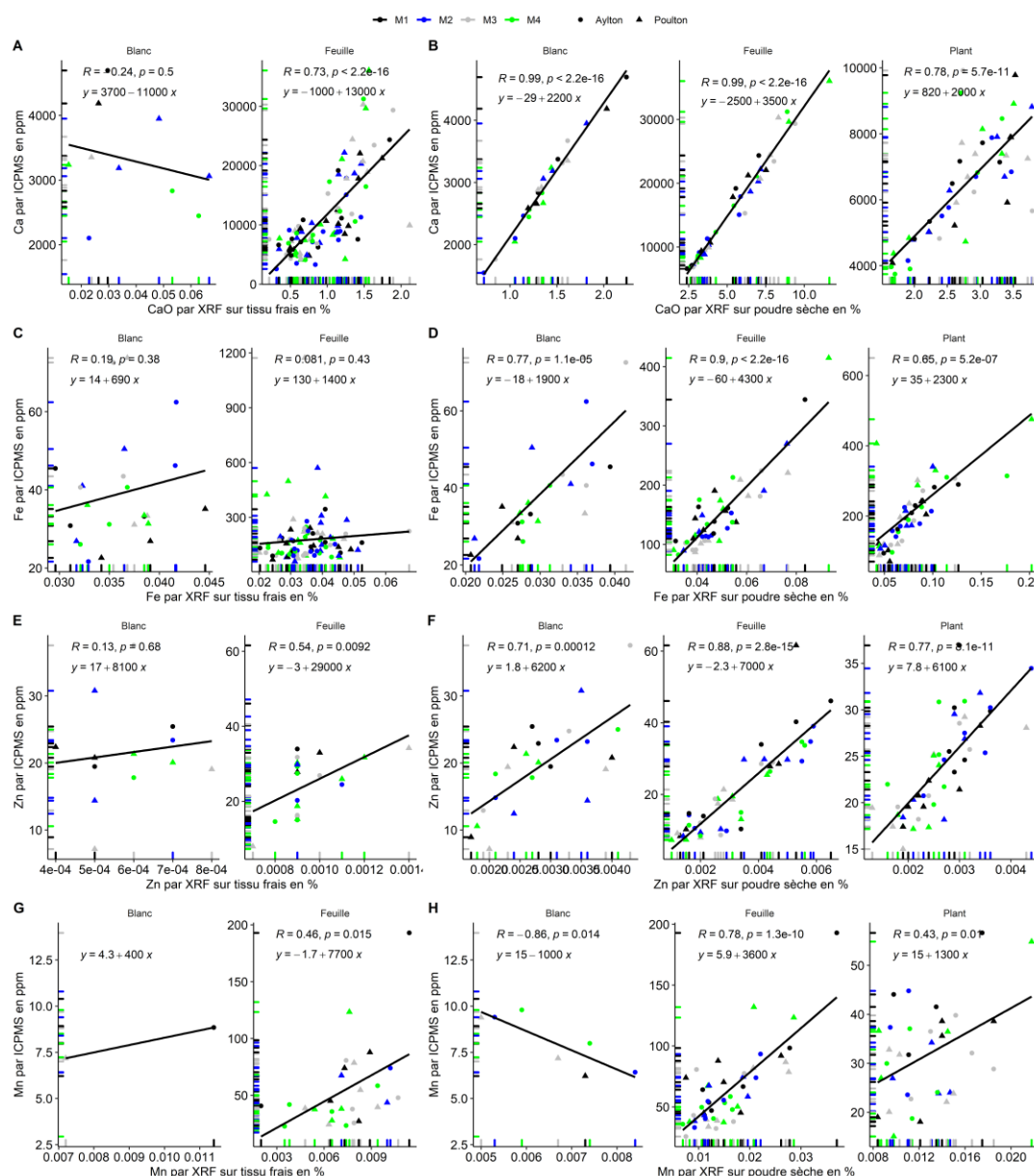


Figure 38 : Relations entre les teneurs en CaO (A, B), Fe (C, D), Zn (E, F) et Mn (G, H) déterminées par XRF sur tissus frais (A, C, E, G) ou secs (B, D, F, H) et les teneurs en Ca, Fe, Zn et Mn analysés par ICP-MS sur les échantillons récoltés en cours de culture, en septembre et à maturité, en novembre. Des coefficients de corrélations R proches de 1 mettent en évidence de très bonnes détermination des teneurs en éléments par le XRF.

De même que pour le P, le K et le S, et comme nous l'avons mis en évidence lors de l'essai réalisé en conditions contrôlées, les relations entre les données XRF et ICP-MS pour ces éléments sont de meilleures qualités lorsque les mesures par XRF sont réalisées sur matériel sec. A l'exception de la teneur en Ca sur feuilles fraîches, les coefficients de corrélations obtenus sur feuille et blanc frais sont très faibles et ne laissent pas espérer la possibilité d'exploiter ce type de mesure pour estimer les teneurs en ces éléments. Les teneurs en Ca, Fe et Zn collectées par le XRF sur des échantillons de blancs, de feuilles et de plantes entières séchées et broyées présentent de très bons niveaux de corrélations avec les teneurs en ces éléments déterminées par ICP-MS. La teneur en Mn peut également être estimée avec une bonne fiabilité au niveau des feuilles, mais pas au niveau des blancs ou de la plante entière.

III.2.e.i. Analyse des données collectées en réponse aux situations nutritionnelles contrastées

La figure 39 présente les évolutions des teneurs relatives en P_2O_5 et en K_2O au niveau des feuilles fraîches de poireaux en cours de culture. Nous pouvons observer que certaines mesures ne se sont pas traduites par une détection du P_2O_5 , notamment au niveau des feuilles jeunes des plants cultivés selon la modalité 1. Pour cet élément, peu de différences entre les modalités sont mises en évidence. L'évolution de la teneur relative en K_2O est similaire entre les modalités de fertilisation mises en œuvre. On observe cependant des teneurs relatives en K_2O réduites dans les feuilles âgées de Aylton des modalités 3 et 4 avant et juste après le réapport de fertilisant. Ces différences ne se retrouvent cependant pas chez Poulton, et ne sont plus significatives entre modalités à maturité. Ces observations suggèrent que le XRF pourrait être employé pour suivre la nutrition K de certaines variétés, à cycle long comme Aylton, ayant des besoins en fertilisants plus élevés que des variétés à cycle court, comme Poulton. Cependant, cette usage ne semble pertinent que dans les premiers mois suivant la mise en culture, ce qui pourrait malgré tout être suffisant pour optimiser la gestion de cet élément.

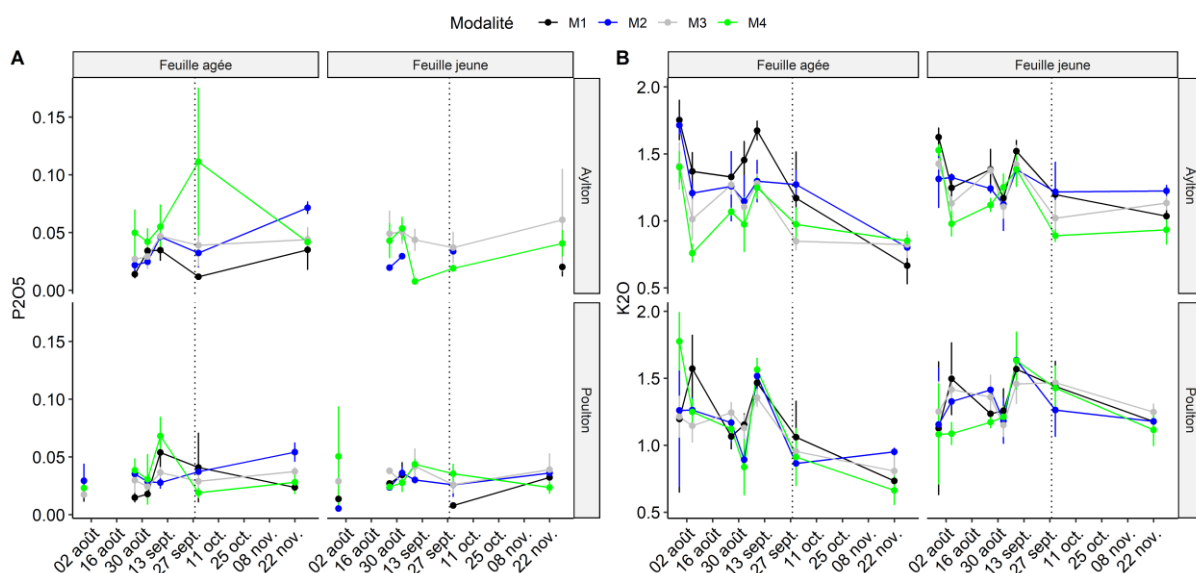


Figure 39 : Évolutions des teneurs relatives en P_2O_5 et en K_2O déterminées par XRF au niveau des feuilles âgées et des feuilles jeunes de poireaux cultivés en 2021.

La figure 40 présente les évolutions des teneurs relatives en P_2O_5 , en K_2O et en S déterminées en Septembre et en Novembre par XRF sur des échantillons séchés et broyés de différents organes (feuilles âgées, feuilles jeunes, blancs) et de poireaux entiers. Étant donné les niveaux de corrélations mis en évidence entre ces données et les analyses ICP-MS, les observations vont dans le même sens que celles décrites dans le § III.2.c.i.

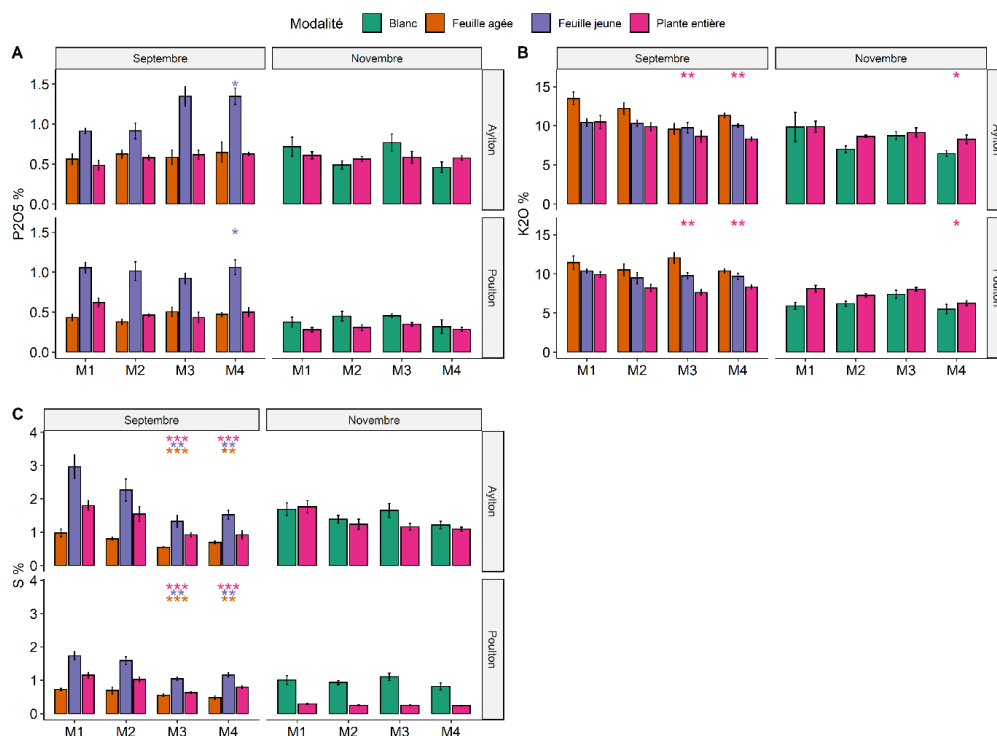


Figure 40 : Evolutions des teneurs relatives en P_2O_5 , en K_2O et en S déterminées par XRF en Septembre et en Novembre sur des échantillons séchés et broyés de feuilles âgées, feuilles jeunes, blancs et de poireaux entiers cultivés en 2021.

En effet, la teneur en P des jeunes feuilles déterminée par XRF sur tissus sec est significativement plus élevée en septembre en réponse aux modalités 3 et 4 chez Aylton et en réponse à la modalité 4 chez Poulton. La teneur en K est significativement réduite au niveau de la plante entière à cette date en réponse aux modalités 3 et 4 chez les 2 variétés. Les teneurs en S sont quant à elles très significativement réduites en réponse à ces deux modalités pour les deux variétés étudiées au niveau des feuilles âgées, des feuilles jeunes et de la plante entière.

En Novembre, les mesures n'ont pu être réalisées que sur les échantillons de blancs et de plantes entières, le XRF ayant été sujet à une panne avant d'avoir pu être employé sur les échantillons de feuilles jeunes et âgées. A cette date, seule la teneur en K apparaît significativement réduite au niveau des plantes entières des deux variétés en réponse à la modalité 4.

III.2.f. Le NIRS

III.2.f.i. PLSR sur les jeux de données collectés sur les trois essais

Comme présenté dans le matériel et méthodes, les données collectées lors des deux essais réalisés en conditions de productions ont été compilées avec les données obtenues en conditions contrôlées afin d'établir de nouveaux modèles de régression par PLSR selon une procédure plus complète que celle mise en œuvre dans l'essai réalisé en condition contrôlée seule (Figure 23). Après une modélisation avec validation croisée réalisée sur 75% de la base de donnée spectrale pour chaque type d'échantillon et chaque élément dosé, les modèles établis sont confrontés au 25% de données non utilisées pour leur création afin d'évaluer leur robustesse. Les caractéristiques des jeux de données d'entraînement (calibration) et de test (validation) sont présentées pour les différents éléments dosés par IRMS et ICP-MS et les différents organes dans le tableau 10.

Tableau 10 : Caractéristiques des données issues des trois essais réalisés dans le cadre du projet PoirOAD employées pour la calibration et l'évaluation des modèles de prédiction à partir des données spectrales collectées sur échantillons frais et secs de feuilles et de blancs et sur plante entière séchée. L'azote et le carbone ont été dosés par IRMS, les autres éléments par ICP-MS et les composés biochimiques et les capacités antioxydantes par l'Université de Liège (laboratoire CEDEVIT).

Element	Unité	Blanc						Feuilles						Plante entière					
		Données d'entraînement			Données de test			Données d'entraînement			Données de test			Données d'entraînement			Données de test		
		Nombre	Moyenne ± SD	Min. - Max.	Nombre	Moyenne ± SD	Min. - Max.	Nombre	Moyenne ± SD	Min. - Max.	Nombre	Moyenne ± SD	Min. - Max.	Nombre	Moyenne ± SD	Min. - Max.	Nombre	Moyenne ± SD	Min. - Max.
N	% MS	80	1.4 ±0.618	0.393 - 3.26	26	1.43 ±0.596	0.517 - 3.18	176	2.32 ±0.8	0.444 - 4.93	60	2.39 ±0.727	0.584 - 4.3	81	2.85 ±0.673	1.42 - 4.24	38	2.89 ±0.705	1.25 - 4.07
C	% MS	80	41.5 ±1.45	38.3 - 43.9	26	41.3 ±1.65	38.6 - 45.9	176	41.5 ±1.16	37.9 - 44.6	60	41.5 ±1.17	38.4 - 44.2	81	40.3 ±1.02	38.3 - 43.3	38	40.3 ±1.29	37.8 - 43.4
Ag	ppm	56	0.014 ±0.008	0.002 - 0.054	18	0.011 ±0.006	0.003 - 0.021	71	0.019 ±0.011	0 - 0.034	28	0.021 ±0.008	0.001 - 0.038	12	0.017 ±0.002	0.015 - 0.024	6	0.013 ±0.007	0.001 - 0.02
Al	ppm	56	38.5 ±47.8	0.46 - 204	18	35.5 ±35.8	3.36 - 154	128	112 ±146	9.31 - 1452	44	138 ±148	8.06 - 729	12	261 ±126	77.9 - 710	6	206 ±130	81.4 - 556
As	ppm	56	0.038 ±0.023	0.015 - 0.1	18	0.071 ±0.109	0 - 0.42	128	0.231 ±0.153	0.023 - 0.697	44	0.224 ±0.2	0.029 - 1.18	12	0.449 ±0.205	0.149 - 0.91	6	0.396 ±0.148	0.159 - 0.695
B	ppm	56	15.5 ±3.33	9.11 - 22.4	18	15.7 ±3.08	10.4 - 23.3	128	39 ±15.1	14.8 - 99.8	44	37.8 ±15.5	15 - 87	12	22.2 ±3.96	16 - 31.8	6	22.1 ±3.77	17 - 30.4
Ba	ppm	56	9.11 ±5.45	1.67 - 22.1	18	11.7 ±8.44	2.55 - 31.2	128	16.6 ±14.8	1.72 - 69.1	44	17.4 ±15.1	2.17 - 56.3	12	15.5 ±6.78	8.2 - 29.1	6	15.9 ±6.1	8.77 - 25.3
Be	ppm	40	0.016 ±0.003	0.011 - 0.025	14	0.012 ±0.004	0.005 - 0.017	102	0.018 ±0.005	0.001 - 0.026	30	0.018 ±0.006	0.002 - 0.023	12	0.019 ±0.007	0.004 - 0.044	6	0.016 ±0.007	0.007 - 0.032
Ca	ppm	56	4346 ±1608	1584 - 7478	18	4096 ±1817	1546 - 8049	128	20972 ±15415	3281 - 69912	44	18222 ±14206	2562 - 61226	12	6838 ±1936	3745 - 9922	6	6339 ±1294	3964 - 8461
Cd	ppm	56	0.142 ±0.069	0.03 - 0.428	18	0.186 ±0.129	0.043 - 0.652	128	0.384 ±0.292	0.067 - 1.5	44	0.324 ±0.25	0.087 - 0.991	12	0.172 ±0.078	0.075 - 0.384	6	0.154 ±0.05	0.102 - 0.242
Co	ppm	56	0.091 ±0.066	0 - 0.236	18	0.683 ±1.46	0.003 - 5.57	128	0.076 ±0.035	0.013 - 0.186	44	0.099 ±0.113	0.013 - 0.658	12	0.105 ±0.044	0.039 - 0.263	6	0.094 ±0.043	0.044 - 0.209
Cr	ppm	56	1.47 ±1.01	0.35 - 4.72	18	81.2 ±182	0.434 - 681	128	7.5 ±7.82	0.634 - 68.1	44	13.5 ±41.7	0.458 - 266	12	4.43 ±2.37	1.25 - 10.7	6	3.16 ±1.82	0.764 - 6.23
Cu	ppm	56	2.19 ±1.06	0.318 - 4.77	18	4.76 ±5.12	0.972 - 22.1	128	4.65 ±1.63	1.59 - 15.4	44	5.06 ±1.93	2.2 - 12.7	12	5.01 ±1.13	2.7 - 7.73	6	5.39 ±1.49	3.63 - 8.09
Fe	ppm	56	47 ±17.4	21.6 - 112	18	314 ±614	26.9 - 2337	128	135 ±64.5	61.2 - 570	44	183 ±262	55.8 - 1643	12	245 ±107	118 - 650	6	200 ±103	94 - 476
K	ppm	56	18170 ±8426	6971 - 45997	18	18795 ±6670	4894 - 33347	128	29452 ±12107	1978 - 63197	44	31669 ±11423	7242 - 65279	12	29953 ±5011	21818 - 40277	6	26897 ±4481	20968 - 36337
Mg	ppm	56	1000 ±283	504 - 1779	18	988 ±261	620 - 1717	128	2251 ±638	916 - 4532	44	2047 ±531	1119 - 3614	12	1448 ±234	1078 - 1815	6	1307 ±158	1146 - 1592
Mn	ppm	56	10.6 ±2.55	2.94 - 15.4	18	20.5 ±24.7	7.52 - 103	128	49.4 ±26.5	6.26 - 193	44	52.3 ±25.1	20.1 - 132	12	33.1 ±8.61	18.7 - 56.6	6	31.7 ±10.2	17.2 - 54.8
Mo	ppm	56	17.2 ±16.2	0.253 - 80.4	18	21.5 ±32.4	0.269 - 136	128	64.4 ±68.5	0.352 - 293	44	47.5 ±61.7	0.387 - 212	12	0.46 ±0.082	0.34 - 0.595	6	0.472 ±0.072	0.332 - 0.572
Mo	ppm	56	16.9 ±16	0.092 - 78	18	20.9 ±31.3	0.047 - 130	128	65.8 ±70.4	0.068 - 297	44	48.7 ±63.8	0.063 - 217	12	0.182 ±0.085	0.064 - 0.341	6	0.148 ±0.059	0.085 - 0.257
Na	ppm	56	522 ±334	114 - 1846	18	445 ±264	94 - 1136	128	924 ±569	219 - 3041	44	879 ±601	224 - 2882	12	554 ±98.9	392 - 727	6	541 ±135	347 - 775
Ni	ppm	52	0.286 ±0.139	0.005 - 0.761	18	62.2 ±144	0.15 - 544	128	0.427 ±0.204	0.082 - 1.12	44	0.612 ±0.97	0.101 - 6.7	12	0.534 ±0.126	0.347 - 0.878	6	0.553 ±0.175	0.367 - 0.928
P	ppm	56	2363 ±889	716 - 4767	18	2353 ±749	1274 - 4163	128	2651 ±1341	175 - 5660	44	2764 ±1131	177 - 5103	12	3206 ±500	2238 - 4389	6	3090 ±386	2213 - 3621
Pb	ppm	14	0.038 ±0.046	0.002 - 0.181	4	0.011 ±0.007	0.001 - 0.018	124	0.105 ±0.117	0.006 - 0.771	44	0.107 ±0.089	0.011 - 0.457	12	0.239 ±0.132	0.066 - 0.591	4	0.124 ±0.101	0.015 - 0.327
Rb	ppm	16	1.03 ±0.328	0.45 - 1.77	8	1.2 ±0.24	0.872 - 1.7	28	3.21 ±0.872	1.94 - 6.23	16	3.3 ±0.91	1.54 - 5.26	12	2.9 ±0.804	1.61 - 5.18	6	2.73 ±0.854	1.63 - 4.49
S	ppm	56	2338 ±1162	447 - 5356	18	2435 ±1014	539 - 5180	128	2627 ±1465	556 - 9907	44	2693 ±1479	920 - 7587	12	3999 ±1382	2184 - 6993	6	3804 ±989	2245 - 5744
Sb	ppm	55	0.019 ±0.023	0.001 - 0.14	17	0.015 ±0.017	0.002 - 0.073	128	0.014 ±0.009	0.001 - 0.051	44	0.017 ±0.014	0.003 - 0.087	12	0.014 ±0.016	0.002 - 0.065	6	0.007 ±0.005	0 - 0.015
Se	ppm	52	0.16 ±0.146	0.001 - 0.456	15	0.21 ±0.153	0.007 - 0.461	127	0.217 ±0.171	0.003 - 0.769	44	0.258 ±0.186	0.028 - 0.803	12	0.311 ±0.121	0.075 - 0.659	6	0.232 ±0.102	0.005 - 0.382
Si	ppm	56	52.4 ±55.9	10.1 - 344	18	39 ±28	7.62 - 87.9	128	131 ±125	7.16 - 838	44	154 ±141	31 - 746	12	426 ±174	137 - 984	6	342 ±188	141 - 821
Ti	ppm	56	1.01 ±0.459	0.225 - 2.34	18	0.781 ±0.418	0.248 - 1.4	128	2.12 ±2.27	0.408 - 11.3	44	2.76 ±3.08	0.633 - 16.4	12	10.2 ±4.82	3.44 - 27.1	6	7.83 ±4.88	3.09 - 20.1
Tl	ppm	16	0.003 ±0.001	0.002 - 0.006	4	0.004 ±0.001	0.002 - 0.005	128	0.025 ±0.02	0.002 - 0.081	44	0.018 ±0.015	0.002 - 0.045	12	0.013 ±0.003	0.008 - 0.024	4	0.013 ±0.003	0.01 - 0.017
V	ppm	56	0.031 ±0.033	0.005 - 0.196	18	0.337 ±0.708	0.012 - 2.64	128	0.128 ±0.115	0.01 - 0.58	44	0.164 ±0.172	0.029 - 1.19	12	0.494 ±0.249	0.151 - 1.4	6	0.393 ±0.251	0.147 - 1.07
Zn	ppm	56	14.4 ±6.47	3.37 - 30.8	18	15.9 ±7.44	6.7 - 37.5	128	13.2 ±9.81	-1.353 - 47.2	44	15.7 ±11.5	2.78 - 61.6	12	23.1 ±5.2	15 - 36.9	6	24.1 ±5.75	17.4 - 34.5
Acide ascorbique	mg EAA/gMS	56	1.03 ±0.574	0.103 - 2.67	18	1.01 ±0.486	0.386 - 2.1												
FRAP	μmole ET/gMS	56	4.87 ±2.66	1.22 - 12.7	18	5.82 ±2.64	2.39 - 11.3												
ORAC	μmole ET/gMS	56	18.1 ±6.37	8.09 - 44.3	18	16.4 ±4.8	5.5 - 26.2												
Polyphenols	mg EAG/gMS	56	2.22 ±0.807	0.968 - 4.41	18	2.43 ±0.849	1.23 - 4.6												

Parmi les éléments dosés, nombre d'entre eux présentent une variabilité de teneurs importantes dans les différents organes analysés. C'est le cas des principaux éléments nutritifs considérés dans cette étude, le N, le P, le K, et le S. Ceci peut être considéré comme un préalable essentiel à l'établissement de modèles de calibration. Ces éléments sont dans des concentrations relativement élevées pour pouvoir évaluer de potentiels modèles de prédiction de ces variables. A l'inverse, quinze de ces éléments présentent des teneurs extrêmement faibles (<10ppm en moyenne) dans les différents échantillons analysés, tels que le Cu, l'Ag, le As ou encore le Co, ce qui pourrait fortement compromettre la fiabilité des potentiels modèles établis pour ces variables. Pour les plantes entières, le jeu de données est principalement constitué de mesures de teneurs en N, car seuls les échantillons de l'essai réalisé en 2021 ont été analysés par ICP-MS.

Les résultats obtenus suite aux différents modèles de régression par PLS testés sont présentés dans le tableau 11.

Sur les 168 PLSR testées (pour les 36 variables sur blancs frais et secs, les 32 variables sur feuilles fraîches et sèches ainsi que sur plantes sèches présentées dans le tableau 10), 25 présentent des coefficients de prédictions (R^2_p) supérieurs ou égaux à 0.6 et des RMSE_p faibles au regard des données (3 sur plantes sèches, 3 et 9 sur blancs frais et secs respectivement, 1 et 9 sur feuilles fraîches et sèches respectivement ; tableau 11).

Tableau 11 : Résultats des modèles de régression par PLS mis en œuvre sur les données collectées lors des 3 essais réalisés dans le cadre du projet PoirOAD.

Element	Tissus frais										Poudre sèche														
	Feuille					Blanc					Feuille					Blanc					Plante entière				
	ncomp	R ² _{CV}	RMSE _{CV}	R ² _P	RMSE _P	ncomp	R ² _{CV}	RMSE _{CV}	R ² _P	RMSE _P	ncomp	R ² _{CV}	RMSE _{CV}	R ² _P	RMSE _P	ncomp	R ² _{CV}	RMSE _{CV}	R ² _P	RMSE _P	ncomp	R ² _{CV}	RMSE _{CV}	R ² _P	RMSE _P
N	6	0,36	0,66	0,35	0,0074645	2	0,13	0,56	0,15	0,0071577	10	0,85	0,3	0,88	0,0014669	7	0,79	0,28	0,73	0,0590343	9	0,89	0,22	0,94	0,0483795
C	6	0,35	0,88	0,58	0,0556003	3	0,59	0,91	0,60	0,0845886	6	0,57	0,78	0,37	0,0493941	5	0,74	0,74	0,77	0,018109	3	0,47	0,74	0,61	0,1396897
Ag	2	0,35	0,01	0,59	0,0011598	1	0,2	0,01			3	0,6	0,01	0,29	0,0006741	1	0,4	0,01			0				
Al	0					0					1	0,27	148,42			0					0				
As	1	0,06	0,15			3	0,2	0,02	0,48	0,0356557	8	0,62	0,09	0,51	0,0001086	3	0,64	0,01	0,71	0,0338996	0				
B	8	0,42	11,35	0,33	0,712904	5	0,17	3	0,32	0,7660004	5	0,48	10,63	0,61	0,2389498	5	0,6	2,07	0,70	0,5084685	0				
Ba	1	0,38	12,09			0					5	0,66	8,31	0,49	2,6549243	1	0,07	5,22			0				
Be	6	0,5	0	0,80	0,0011174	0					3	0,77	0	0,82	0,0005569	0					0				
Ca	8	0,57	10023,98	0,58	657,92526	5	0,45	1150,08	0,49	275,29961	6	0,83	6155,55	0,88	33,987781	1	0,29	1347,84			2	0,56	1248,23	0,54	564,76777
Cd	1	0,14	0,27			0					3	0,56	0,19	0,68	0,0074889	0					1	0,12	0,07		
Co	1	0,25	0,03			3	0,58	0,04	0,20	0,6161634	4	0,42	0,03	0,28	0,0278198	1	0,62	0,04			0				
Cr	0					0					6	0,5	6,15	0,18	7,3843412	0					0				
Cu	0					1	0,57	0,69			3	0,21	1,39	0,18	0,2447952	2	0,54	0,71	0,02	2,3127324	0				
Fe	0					2	0,26	14,88	0,42	269,8568	7	0,55	48,93	0,13	55,780996	2	0,43	13,04	0,32	269,77063	0				
K	2	0,33	10390,13	0,32	459,425	3	0,29	7055,78	0,51	485,42909	3	0,39	8952,84	0,32	533,0199	5	0,56	5468,89	0,58	679,21101	4	0,44	3672,67	0,37	1436,6936
Mg	0					2	0,18	253,57	0,35	28,325766	3	0,11	596,02	0,16	172,10017	2	0,58	182,98	0,60	40,802313	1	0,23	200,39		
Mn	7	0,1	25,21	0,10	1,313912	3	0,53	1,72	0,12	10,884122	5	0,33	21,04	0,40	1,4023343	1	0,39	1,98			1	0,42	6,41		
Mo	4	0,37	53,27	0,50	9,4337049	1	0,34	13,07			3	0,67	38,75	0,73	0,398727	1	0,44	12,09			0				
Mo	2	0,27	60,01	0,25	3,6814409	2	0,42	12,06	0,38	6,6129897	2	0,61	43,42	0,66	1,9053105	1	0,46	11,71			2	0,41	0,06	0,45	0,0423283
Na	1	0,05	559,14			2	0,35	266,43	0,55	12,34525	4	0,53	377,49	0,60	99,704659	2	0,63	200,36	0,68	7,1600525	0				
Ni	0					2	0,39	0,11	0,00	61,847613	4	0,29	0,18	0,01	0,1425548	2	0,38	0,11	0,00	61,852988	0				
P	2	0,18	1214,42	0,19	9,7951419	0					7	0,53	900,27	0,52	108,80215	2	0,33	718,07	0,21	26,524721	1	0	487,27		
Pb	0					0					3	0,13	0,1	0,14	0,0116644	0					0				
Rb	3	0,46	0,67	0,10	0,611338	6	0,62	0,19	0,04	0,3638831	2	0,08	0,78	0,37	0,0700606	4	0,17	0,29	0,33	0,0262365	3	0,58	0,52	0,55	0,0938817
S	1	0,03	1454,4			5	0,46	847,2	0,35	255,47988	8	0,54	976,27	0,45	338,36562	2	0,41	885,04	0,57	42,539087	5	0,34	1051,05	0,73	391,10594
Sb	2	0,26	0,01	0,00	0,0017856	0					3	0,43	0,01	0,09	0,0033108	0					0				
Se	0					2	0,64	0,09	0,54	0,0327963	1	0,07	0,16			2	0,61	0,09	0,64	0,0075456	0				
Si	8	0,41	80,1	0,38	7,1061628	1	0,09	52,93			5	0,5	96,75	0,29	15,457295	1	0,18	50,22			2	0,1	160,33	0,31	83,774251
Ti	7	0,53	1,22	0,59	0,3403559	2	0,67	0,26	0,74	0,1008296	4	0,57	1,66	0,09	0,4723716	2	0,7	0,25	0,87	0,113174	0				
Tl	2	0,23	0,02	0,22	0,003216	0					4	0,72	0,01	0,83	0,0027497	0					0				
V	7	0,33	0,07	0,33	0,0205867	0					4	0,62	0,08	0,04	0,0415067	1	0,02	0,03			0				
Zn	0					2	0,4	4,94	0,46	0,205975	9	0,76	4,98	0,54	0,2556905	4	0,58	4,15	0,42	0,1513105	0				
Acide ascorbique						2	0,15	0,48	0,11	0,0881097						4	0,51	0,36	0,30	0,0348256					
FRAP						3	0,53	1,76	0,67	0,555698						3	0,57	1,67	0,71	0,3229055					
ORAC						0										2	0,29	10,32	0,67	1,1538317					
Polyphenols						2	0,31	0,73	0,44	0,0317324						4	0,51	0,61	0,49	0,0628135					

Les relations entre les teneurs en azote déterminées par IRMS et prédites en employant les modèles établis sur les données spectrales des bases de données de validation sont présentées dans la figure 41. Les modèles de détermination de la teneur en azote à partir de spectres obtenus sur matériel sec donnent d'excellents résultats, avec des coefficients de prédictions R^2_p très élevés (respectivement de 0.94, 0.88 et 0.73 sur plantes entières, feuilles et blancs). Les R^2_p calculés pour le modèle établi sur feuille fraîche et blanc frais ne sont cependant pas satisfaisants avec ce jeu de données ($R^2_p = 0.35$ et 0.15 respectivement, Figure 41).

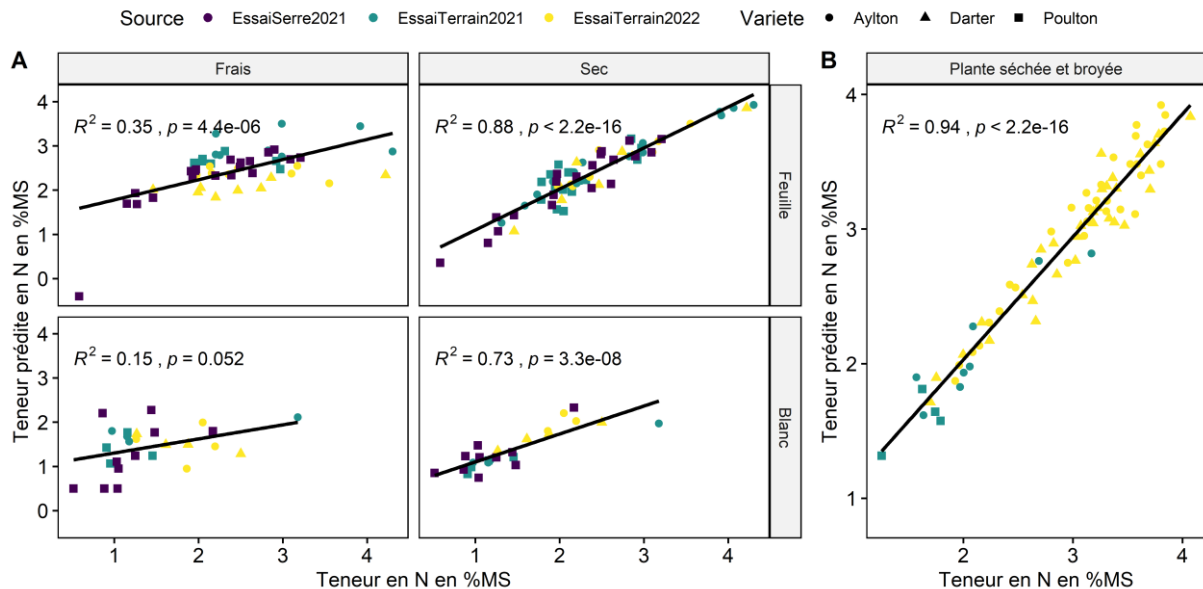


Figure 41 : Relations entre teneurs en N déterminées par IRMS sur les données de validation (25% des données) et teneurs en N prédites à partir des données spectrales. Les prédictions ont été calculées à partir des modèles établis sur la base de données de calibration (75% des données) générée avec les données des 3 essais réalisés dans le cadre du projet PoirOAD.

Des modèles de régression par PLS pour d'autres éléments pouvant présenter un intérêt ressortent de l'analyse avec de bons coefficients de prédictions, comme ceux établis pour le Ca ou le Mo sur poudre sèche de feuille, les activités antioxydantes ORAC et FRAP sur poudre sèche de blanc ou encore le S au niveau de la plante entière (Tableau 11). Ce dernier modèle mériterait d'être évalué avec un jeu de données plus conséquent.

III.2.f.i. Exploitation des modèles de prédiction de la teneur en azote sur les différentes bases de données spectrales collectées en cours d'essais

Les modèles de prédictions de la teneur en N établis à partir des spectres collectés sur tissus séchés ont été employés sur les données collectées pour les différents échantillons mesurés sur les deux essais. Ces teneurs en N prédites dans les différents organes sont respectivement présentées dans la figure 42 pour l'essai mené en 2021 et dans les figures 43 et 44 pour l'essai mené en 2022.

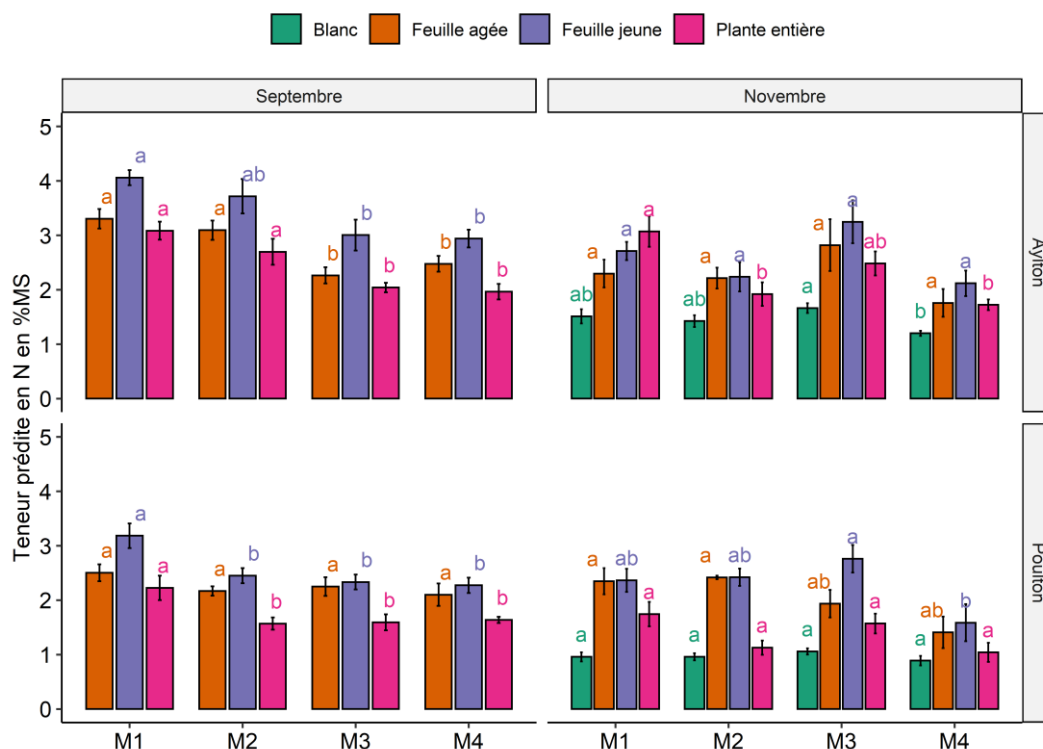


Figure 42 : Teneurs en N prédites à partir des spectres collectés en 2021 sur tissus séchés en employant les modèles de prédictions établis sur les données des trois essais

En 2021, nous pouvons ainsi observer que les données de prédictions des teneurs en N calculés grâce aux modèles établis sur tissus séchés sont tout à fait comparables avec celles déterminées par IRMS et présentées dans le § III.2.c.i (Figure 30). Aylton présente des teneurs en N prédites plus élevées que Poulton dans les différents organes ainsi que dans la plante entière. En septembre, les teneurs en N prédites au niveau des feuilles âgées chez Aylton et des feuilles jeunes et de plantes entières pour les deux variétés sont affectées par les modalités de fertilisations mises en œuvre. En novembre, bien que les différences soient moins marquées, on observe pour la modalité 4 de plus faibles teneurs en N dans la plante entière chez Aylton et dans les feuilles jeunes chez Poulton par rapport à la modalité 1.

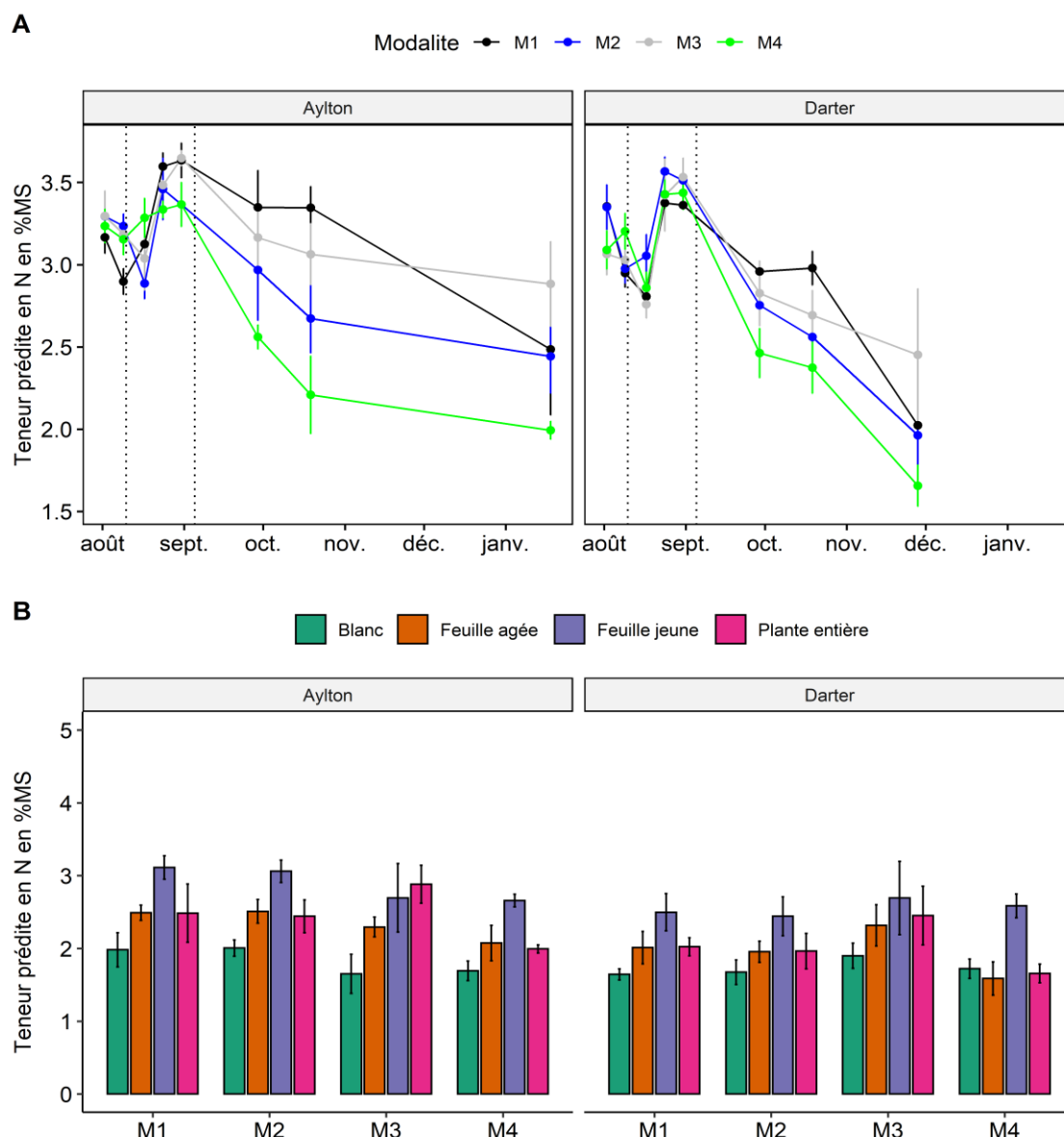


Figure 43 : Teneurs en N prédites à partir des spectres collectés en 2022 sur plante entière séché en cours de culture (A) et sur les différents organes séchés à maturité (B) en employant les modèles de prédictions établis sur les données des trois essais.

En 2022, les teneurs en N prédites au cours du temps dans la plante entière suivent des évolutions tout à fait similaires à celles mises en évidence précédemment par les analyses IRMS (§III.2.c.ii ; Figure 33). De même, les teneurs en N prédites à maturité dans les différents organes montrent des tendances comparables à celles déterminées par IRMS (Figure 34)

Ainsi, pour les deux essais, les résultats de prédiction des teneurs en N obtenus à l'aide des modèles établis sur tissus séché sont tout à fait comparables à ceux observés à partir des analyses réalisées par IRMS.

Le modèle établi entre les teneurs en N et les spectres collectés sur feuilles fraîches a donné des résultats décevant par rapport à ce qui était espéré à l'issu de l'essai en conditions contrôlées. Il a cependant été employé sur les données spectrales collectées sur feuilles fraîches lors des essais menés

en 2021 et 2022 (Figure 44).

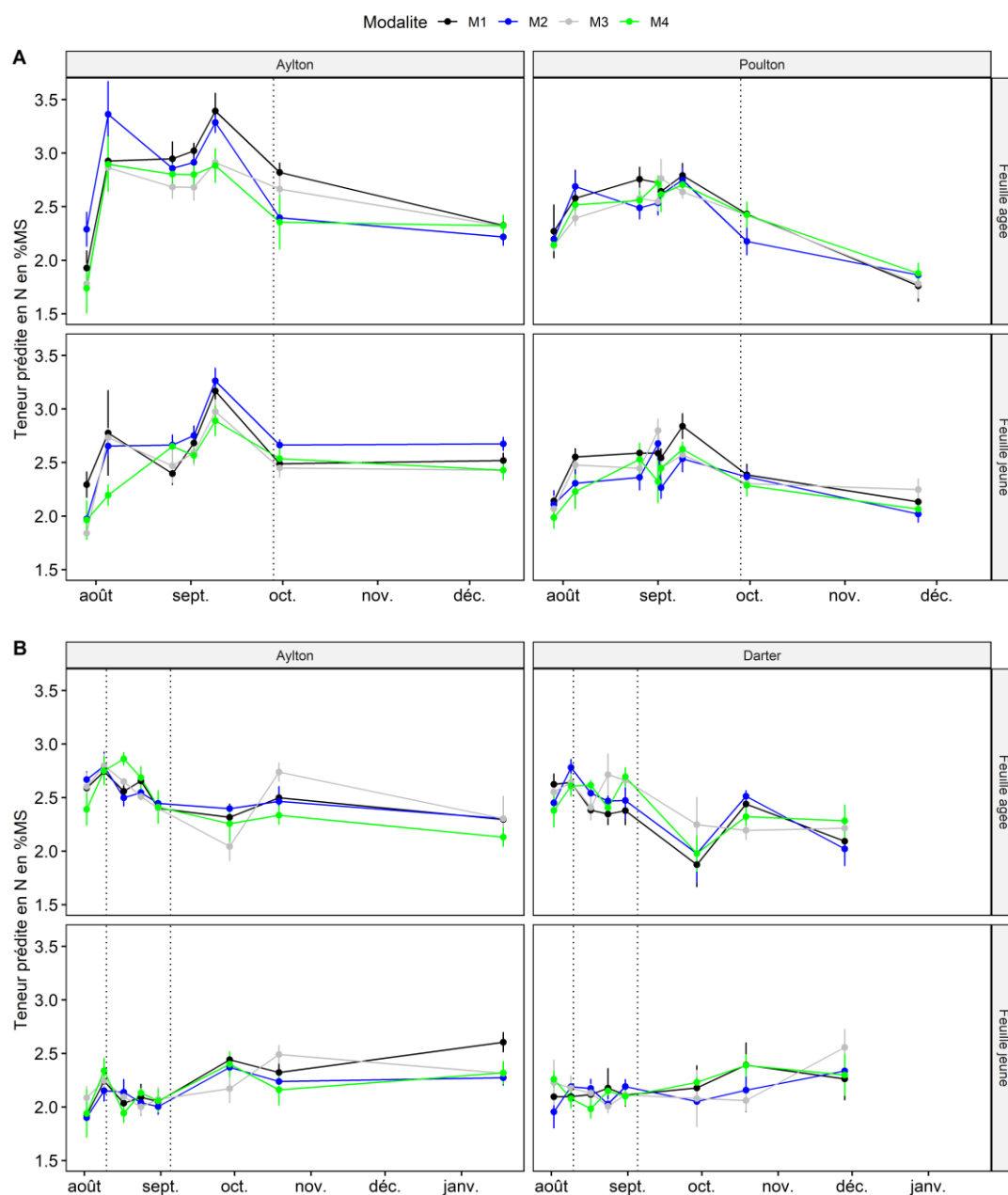


Figure 44 : Evolution des teneurs en N prédites à partir des données spectrales collectées sur feuilles fraîches lors des essais suivis en 2021 (A) et 2022 (B) en employant les modèles établis sur les données des trois essais

En 2021, les teneurs en N prédites au niveau foliaire à partir des spectres collectés sur tissus frais semblent évoluer en début de cycle selon les modalités mises en œuvre : on observe en effet durant cette période des teneurs en N prédites plus faibles dans les modalités 3 et 4 par rapport aux deux autres modalités. Ces différences sont davantage marquées chez Aylton que chez Poulton. Cependant, elles demeurent très faibles et non répétées de manière systématiques. De plus, elles ne sont plus marquées sur les deux dernières mesures réalisées, en octobre et à maturité.

En 2022, les teneurs en N prédites au niveau foliaire à partir des spectres collectés sur tissus frais ne présentent pas de différences significatives à mettre en lien avec les modalités mises en œuvre. Ces

observations mettent en évidence que les modèles de prédiction établis à partir de ces spectres ne sont pas fiables pour permettre le suivi de la teneur en N de feuilles fraîches en cours de culture.

Différents jeux de données ont été pris en compte afin d'espérer exploiter ces données collectées sur feuille fraîche et d'établir un modèle de prédiction des teneurs en N à partir de spectres NIRS établis sur matériel frais. Les données de chaque essai et/ou de chaque variété ont été pris en compte de manière indépendante. Parmi toutes les combinaisons testées, il apparaît que les meilleurs modèles de prédiction de la teneur en N à partir des spectres collectés sur feuilles fraîches sont obtenus lorsque seules les données de Poulton, collectées lors de l'essai en conditions contrôlées et lors de l'essai au champ réalisé en 2021, sont considérées ($R^2_{CV}=0.47$, $RMSE_{CV}=0.60$, $R^2_P=0.59$ et $RMSE_P=6.9.10^{-02}$). Intégrer les données de Aylton, de Darter, ou de ces deux variétés réduit la fiabilité des modèles de prédictions (baisse des R^2_{CV} et R^2_P et augmentation des $RMSE_{CV}$ et $RMSE_P$, données non présentées). Cependant, ce modèle n'est pas validé sur les données des deux autres variétés, Aylton et Darter, et demeure de faible qualité par rapport au modèle établi à partir des spectres collectés sur feuilles séchées et broyées.

Le séchage et le broyage des échantillons apparaît ainsi un préalable essentiel à la détermination d'une teneur en N fiable à partir d'une mesure de réflectance par spectrophotométrie proche infrarouge (NIRS).

IV. Conclusion, discussion et perspectives

Les enseignements à tirer des actions menées dans le cadre du projet PoirOAD sont nombreux et portent des aspects complémentaires nécessaires à l'amélioration de la gestion de la fertilisation du poireau. Les résultats obtenus ont permis une meilleure compréhension de la gestion des différents nutriments par la plante et des impacts associés à leur éventuel manque de disponibilité. Les outils ont été évalués dans le cadre convenu, et ont pour certains démontré leur potentiel pour devenir à moyen terme des outils d'aide à la décision pour l'optimisation de la fertilisation du poireau.

IV.1. Les essais ont amélioré les connaissances concernant la gestion des nutriments par le poireau cultivé

Les essais menés en conditions contrôlées et en conditions de productions dans le cadre du projet PoirOAD ont permis de renforcer les connaissances sur la gestion des nutriments par le poireau cultivé.

En conditions contrôlées, les effets de carences en N, P, K ou S ont été évalués sur la croissance et le développement du poireau. Les carences en P, K ou S appliquées n'ont pas eu d'impact significatif sur la croissance et le développement de cette plante, et ce même après 57 jours de carences. Dans nos conditions d'expérimentations, le poireau s'est ainsi montré capable de résister à des carences en P, K ou S relativement longues. A contrario, la carence en N a ralenti le développement et réduit la croissance de nouveaux organes, principalement des jeunes feuilles. Ces effets, déjà distingués après 31 jours de carence, ont été d'autant plus importants après 57 jours de carence en N. Le poireau a cependant démontré par cet essai sa résistance importante à une déficience en N, la croissance et le développement n'étant que légèrement affectés après 31 jours de carence en N. Les différentes carences appliquées se sont traduites sur la composition des poireaux, affectant chacune négativement la teneur en l'élément considéré de manière spécifique dans les organes analysés. Ces différences sont mises en évidence dès 31 jours de carence, avant d'observer des impacts sur la croissance et le développement de la plante. La carence en N a diminué comme attendu la teneur en N des organes analysés, mais aussi leur teneur en P et S. Cet effet met en exergue la dépendance des métabolismes P et S à l'activité du métabolisme N. Ainsi, la composition élémentaire du poireau renseigne sur ses conditions de fertilisation, et des déficiences en éléments peuvent être détectées avant même d'observer des symptômes de limitation de la croissance. Les analyses biochimiques réalisées sur les blancs de poireaux suggèrent des impacts négatifs de la carence en N sur la capacité de résistance du poireau au stress oxydatif, la teneur en polyphénols et les capacités antioxydantes étant réduites dans ces organes par rapport à la situation Control. Cet essai a permis de générer des échantillons de feuilles et de blancs de poireaux au contenu contrasté, précieux pour calibrer les outils évalués dans le cadre du projet et évaluer leur capacité à qualifier le statut nutritionnel d'une culture de poireaux en conditions de production. Bien que les autres éléments ne soient pas à négliger, l'azote peut être considéré comme l'élément essentiel à prendre en compte dans le cadre d'une fertilisation ajustée aux besoins.

En condition de production, les essais réalisés en 2021 et en 2022 ont montré des résultats nuancés et apporté de précieuses informations sur la gestion de la nutrition par le poireau en plein champ. Alors

qu'en 2021, les rendements ont été graduellement affectés par les niveaux de fertilisation appliqués, ils ont été supérieurs en 2022, et moins significativement affectés par les modalités mises en œuvre. Ce contraste pourrait être lié aux conditions météorologiques différentes observées sur ces 2 années d'essai. Les températures enregistrées en 2021 ont été plus faibles que celles observées en 2022, durant l'été et l'automne, ce qui se traduit par un cumul de températures reçues par la culture menée en 2022 supérieur à celui observé en 2021. De plus la récolte de Aylton de 2022 a été réalisée en janvier, soit près de 1.5 mois après celle de Aylton réalisée en 2021. En 2022, cette variété a ainsi pu recevoir 2486°Cj cumulés contre 1959 °Cj cumulés en 2021. Les températures plus élevées observées en 2022 pourraient également avoir favorisé la mise à disposition de nutriments par le sol par rapport à 2021. De plus, le reliquat N plus élevé à la plantation en 2022 qu'en 2021 pourrait avoir davantage participé au développement de la culture durant les premiers mois. Malgré ces nuances, nous observons les deux années d'essais des impacts des modalités de fertilisation sur les rendements et sur la composition des poireaux cultivés, ainsi que des effets positifs du fractionnement de fertilisation par rapport à des apports équivalents à la plantation. La variété Aylton présente de plus forts besoins en N que Poulton en 2021 et Darter en 2022, qui s'expliquent par des teneurs en N plus élevées mais aussi des rendements légèrement supérieurs à ces deux variétés. Ces besoins font d'Aylton une variété potentiellement plus sensible à la carence en N. S'orienter vers des variétés présentant des besoins en N plus faibles et adaptées aux situations où l'azote est faiblement disponible pourrait constituer un levier majeur pour permettre une réduction des apports de fertilisant tout en maintenant des rendements élevés.

En 2021, les rendements sont affectés de manière significative par les modalités de fertilisation mises en œuvre. On observe également en septembre des impacts des traitements sur la composition des poireaux cultivés : les teneurs en N sont réduites dans les modalités 3 et 4, ayant reçus à cette date seulement 10% des apports de la modalité 1. Le rendement à la récolte finale est fortement réduit dans la modalité 4, n'ayant reçu que 10% des apports de la modalité 1 à la plantation. Le réapport de fertilisant réalisé dans la modalité 3 permet de maintenir le rendement à un niveau comparable à celui observé pour la modalité 2, ayant reçu à la plantation le même apport. Bien que relativement similaire entre les modalités à maturité, la teneur en N de la plante apparaît cependant légèrement augmentée dans les poireaux de la modalité 3 par rapport à ceux de la modalité 2, mettant en évidence un fort prélèvement d'azote sur la période ayant suivi le réapport. Nous l'avons mis en évidence par le calcul de la quantité de N prélevée par la culture en septembre et à maturité à partir des teneurs en N et de la biomasse déterminées à ces dates. Alors qu'une grande part de l'azote retrouvé à maturité dans les poireaux des modalités 1, 2 et 4 a déjà été prélevée début septembre, ce prélèvement important des poireaux de la modalité 3 en fin de cycle permet un maintien des rendements et des teneurs en N à des niveaux élevés. A la récolte, le prélèvement d'azote total calculé avec ce fractionnement apparaît plus élevé que pour un apport équivalent à la plantation. Les teneurs en P, K et S ont également été affectées en cours d'essai par les modalités de fertilisations mises en œuvre, mais demeurent à des niveaux comparables entre modalités à maturité. Dans nos conditions, seul l'azote apparaît ainsi limitant pour le développement de la culture dans les modalités 2, 3 et 4. Le prélèvement de ces éléments va grandement dépendre de la croissance, et donc de la disponibilité en N.

En 2022, le suivi cinétique de la croissance et des teneurs en azote confirme les observations des deux essais précédent, avec un niveau d'information plus précis encore : les impacts des modalités de fertilisation sur les teneurs en N de la plante entière se manifestent bien plus tôt que sur la biomasse et ce pour les deux variétés étudiées. Les différences de développement observées dans la modalité 4 se sont en effet manifestées tardivement, au mois d'octobre alors que les teneurs en N des plantes ont décroché pour les modalités 2, 3 et 4 dès la fin août. Ainsi, la teneur en N de la plante peut renseigner sur son niveau de fertilisation bien avant que des impacts sur la croissance et le développement ne puissent survenir. Cette mesure peut ainsi permettre de prévenir d'éventuels effets négatifs d'un niveau de fertilisation limitant sur le rendement si un réapport peut encore être envisagé dans le temps de culture restant. Le calcul et le suivi de l'évolution de la quantité d'azote prélevée par la culture au cours du temps dans les différentes modalités de l'essai réalisé en 2022 nous permet d'identifier les périodes au cours desquelles le prélèvement est le plus important dans ces différentes conditions (Figure 45).

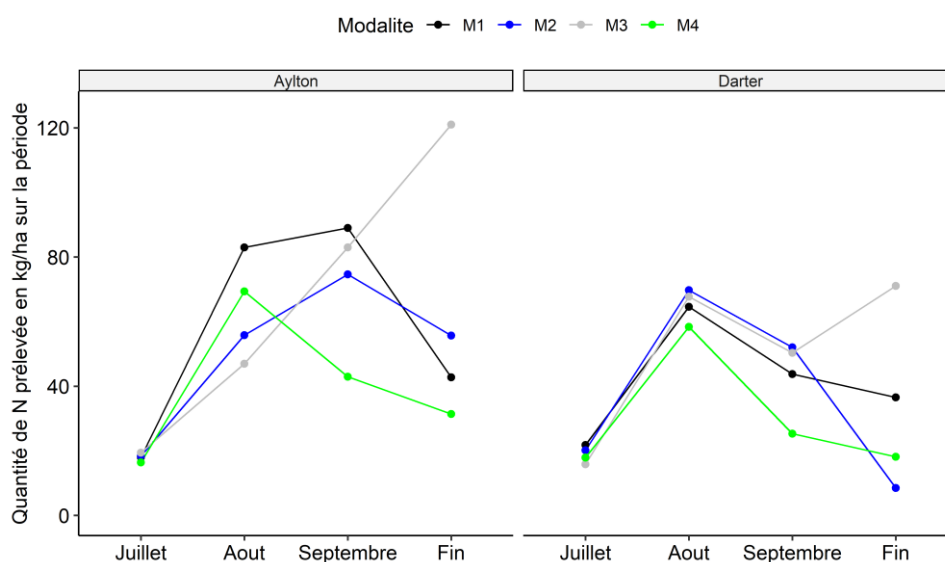


Figure 45 : Evolution des quantités d'azote prélevées au cours de chaque période (de la plantation à fin juillet, en août, en septembre et d'octobre à la récolte finale (fin)) chez les 2 variétés de poireaux cultivées (Aylton et Darter) lors de l'essai 2022.

Sur le premier mois de culture (juillet), 20 kgN/ha ont été absorbé par la culture dans toutes les modalités et pour les deux variétés. En fonction de l'analyse du reliquat, les besoins peuvent donc potentiellement être assurés sur ce premier mois de culture par l'N disponible dans le sol à la plantation. Dans la modalité ayant reçu l'ensemble des besoins de la culture à la plantation (M1), on observe un prélèvement important en août et en septembre. Aylton prélève plus de 83 kgN/ha et 89 kg/ha sur ces deux mois, alors que Darter prélève 65 kg/ha sur août et 45 kg/ha sur septembre dans ces conditions de fertilisation. Le prélèvement en fin de culture n'est pas négligeable, il représente 40 UN chez Aylton dans la modalité M1 (Figure 45). La quantité d'azote prélevée en septembre est fortement réduite dans la modalité 4 par rapport à la modalité 1, signe d'une déficience en N disponible au niveau du sol. On observe dans la modalité 3 un très fort prélèvement de N en fin de culture par rapport aux autres modalités, effet positif associé au fractionnement de fertilisation mis

en œuvre dans cette modalité. Le fractionnement de fertilisation a ainsi permis un maintien du prélèvement à des niveaux élevés sur cette période, et s'est traduit, par rapport à un apport équivalent à la plantation (M1), par une augmentation des teneurs en N, des rendements ainsi que de la quantité d'azote prélevée par la culture à maturité.

IV.2. Suivi du statut nutritionnel du végétal par les outils évalués

Les outils évalués ont pour certains donné des résultats prometteurs pour le futur développement d'OAD.

Malgré un potentiel très intéressant sur carotte et chou pommé mis en évidence dans le cadre du projet NutrInnov, le **Multiplex** n'a malheureusement pas donné de résultats concluants sur le poireau en conditions contrôlées. Cependant, des tendances intéressantes ont été observées sur l'essai mis en place en conditions de productions en 2021. Cet appareil souffre néanmoins d'un défaut majeur : la société Force-A qui exploitait sa commercialisation et son développement a cessé son activité, et à ce jour aucune autre entreprise n'a repris la main sur sa commercialisation. S'orienter vers d'autres appareils de mesures apparaît l'unique option se présentant à ce jour.

Le **XRF** employé sur tissus frais a montré sa capacité en conditions contrôlées à suivre la fertilisation P et K, bien que les données collectées aient présenté des variabilités importantes. Ces variabilités se sont révélées d'autant plus fortes lors de l'essai réalisé en conditions de production en 2021, bien que des différences associées aux modalités aient été observées en cours de culture au niveau foliaire. Peu d'éléments ont été détectés de manière systématique par le XRF employé sur tissu frais lors de ces deux essais. De plus, les calibrations des données XRF collectées sur tissus frais aux données ICP-MS ne sont pas concluantes, indiquant que ces mesures ne sont pas suffisamment fiables pour permettre d'analyser précisément le contenu élémentaire. A contrario, les données XRF collectées sur feuilles, blancs ou plantes entières séchées et broyées présentent d'excellents niveaux de corrélations avec les données des analyses ICP-MS, et ce pour la grande majorité des éléments dosés par ces deux méthodes. **Employé sur tissu séché et broyé, le XRF pourrait donc être utilisé pour analyser le contenu élémentaire de poireaux en cours de culture et statuer sur leur niveau d'alimentation en P et K notamment. Employé sur tissu séché et broyé, le XRF constitue également un outil de choix pour déterminer les teneurs en de nombreux éléments, notamment en oligoéléments, de manière fiable.** Des expérimentations dédiées à la gestion des fertilisations P, K, S ou en oligoéléments pourraient être conduites afin de développer l'utilisation de cet appareil en tant qu'OAD.

Sur les trois appareils évalués dans le projet PoirOAD, le **NIRS** est certainement celui qui a présenté les résultats les plus pertinents et prometteurs pour suivre le statut nutritionnel du poireau, de par la capacité, à partir de spectres collectés sur tissus séchés et broyés de feuilles, de blancs ou de plantes entières d'en **prédire la teneur en N de manière rapide et fiable**. Par cette mesure et une détermination de la biomasse, il apparaît dès lors possible de calculer la quantité d'azote prélevée par la culture, et de déterminer ainsi son niveau d'alimentation. En conditions contrôlées, les teneurs en N prédites à partir de spectres collectés sur feuilles jeunes fraîches ont diminué relativement tôt après l'application de la carence en N, avant l'apparition de symptômes, suggérant que **cette mesure par NIRS puisse être employée pour piloter la fertilisation azotée**. Cependant, les modèles de prédictions

établis en intégrant au jeu de données les échantillons issus des essais réalisés en conditions de production en 2021 et en 2022 se sont avérés moins fiables, et les suivis des teneurs en N prédits au niveaux foliaires à partir de ces modèles ne se sont pas révélés associés aux conditions de fertilisations mises en œuvre. Utiliser ces mesures spectrales sur feuilles fraîches ne semble donc pas pertinent pour exploiter cet appareil en tant qu'OAD pour le pilotage de la fertilisation azotée. A contrario, les excellents modèles de calibration obtenus à partir des données spectrales collectées sur tissus séché et broyé permettent une prédiction de la teneur en N de feuilles, de blancs et de plantes entières de manière fiable et rapide. Ainsi employé **sur des échantillons séchés et broyés de feuilles, de blancs ou de plantes entières prélevés en cours de culture, le NIRS pourrait ainsi être employé afin d'en déterminer la teneur en N, de statuer sur l'état de nutrition azoté de la culture, et d'aider ainsi à décider si une fertilisation azotée est nécessaire ou non.** Par la prise en compte de la biomasse produite au moment de la mesure, l'analyse NIRS sur plante entière permet de déterminer de manière simple la quantité d'azote prélevé par la culture et de statuer sur son niveau de fertilisation N. Les évolutions similaires des teneurs en N prédites par le NIRS sur plantes entières et déterminées par IRMS suggèrent que le NIRS devrait être employé en priorité après 2 mois et 3 mois de culture afin d'évaluer les quantités d'azote prélevées par la culture à ces dates. Le NIRS pourrait être également employé pour sélectionner les variétés adaptées aux situations de disponibilité en azote limitante, via un référencement des variétés dans des conditions de fertilisation contrastées. Cet appareil présente également un potentiel intéressant pour évaluer la capacité antioxydante des blancs de poireaux. Cette mesure pourrait être utilisée pour évaluer le niveau de résistance de la culture dans des conditions données.

IV.3. Ajuster les apports aux besoins de la culture par le fractionnement et avec l'aide des outils évalués

Les observations issues des deux essais menés en conditions de production nous permettent de proposer des conseils pouvant contribuer à l'ajustement du plan de fertilisation aux besoins de la culture :

- Appliquer la méthode du bilan pour estimer la dose de fertilisant à apporter
 - Calculer/mesurer les différents postes d'N disponible pour la culture selon (Reliquat, N issu de la minéralisation, N issu du précédent cultural)
 - Déterminer les besoins de la variété considérée (analyse teneur en N x rendement estimé)
 - La dose de N à apporter correspondra à ce besoin retranché des différents postes d'N disponible
- 20 UN seront nécessaires à l'implantation de la culture sur le premier mois. Si le reliquat est inférieur à ce besoin, un apport correspondant à 10% des besoins peut être réalisé.
- Un apport après un mois de culture correspondant à 60% des besoins retranché du reliquat et de l'apport éventuel réalisé à la plantation peut être réalisé
- Un apport après 2 mois de culture correspondant à 40% des besoins retranché des autres postes de N disponibles (N issu de la minéralisation, N issu du précédent cultural) peut être réalisé

Cette stratégie pourra être avantageusement complétée par l'usage régulier du NIRS afin de déterminer le niveau de prélèvement de l'azote par la culture au cours du temps et d'identifier ainsi

d'éventuels déficiences en N pouvant conduire à des réductions de rendements. Nous pouvons préconiser d'utiliser le NIRS avant le deuxième apport réalisé après 2 mois de culture, après 3 mois de culture ainsi qu'à maturité afin d'évaluer les effets de la conduite tenue. A défaut de références fiables établies sur les différentes variétés et les différents créneaux de production, une zone témoin fertilisée à la plantation selon le bilan de fumure sera comparée au reste de la parcelle conduite à l'aide de l'appareil. Une réduction de dose au deuxième apport pourra être envisagée si les données de biomasses et de teneurs en N prédites au niveau de la plante entière (et donc les quantités de N prélevées) ne présentent pas de différence par rapport à la zone témoin. D'après nos données, cette réduction pourrait être de 20 UN, correspondant à la différence de quantité de N absorbé par la modalité 3 par rapport à la modalité 1 dans l'essai mené en 2022, et ce sans conséquence sur le rendement. Le maintien de la dose du deuxième apport au niveau préconisé pourra se solder par une légère augmentation du rendement et de la teneur en N des poireaux récoltés, qui pourra être évaluée à maturité afin de statuer sur l'efficacité du plan de fertilisation pratiqué.

Qu'elle que soit la stratégie de fertilisation employée et l'origine des apports, déterminer la quantité d'azote prélevé à maturité permet d'évaluer son niveau de valorisation, et de justifier ainsi de la bonne conduite de la culture et de son impact réduit sur l'environnement tout en réduisant le coût économique lié à ces fertilisants. Cet usage pourrait être mis en application afin de justifier de pratiques agricoles plus sobres et respectueuses de l'environnement (démarche Haute Valeur Environnementale, contribution aux limitations des pertes par lixiviation du nitrate, des émissions d'oxydes d'azote et/ou par volatilisation d'ammoniac (nouvelles réglementations liées au PRÉPA⁵).

IV.4. Optimiser l'utilisation des outils évalués afin de développer des outils fiables à moyen ou long terme pour ajuster la fertilisation

Maintenant que l'intérêt et le potentiel des technologies évaluées dans ce projet a pu être démontré et mis en pratique, développer des outils d'aides à la décision pour l'ajustement de la fertilisation basé sur ces technologies suppose bien évidemment un investissement conséquent. En effet, une utilisation optimisée de ces outils suppose que les modèles établis reposent sur des bases de données représentatives des conditions de culture dans lesquelles ils seront employés, reflétant la diversité des terroirs, mais aussi des variétés ou des conditions de fertilisations. Une telle optimisation pourra se faire à moyen long terme à condition que des moyens conséquents y soient consacrés.

Des essais pluriannuels sur un nombre de variétés plus important et dans des conditions différentes pourraient permettre d'évaluer et d'affiner différentes méthodologies pour l'exploitation de ces données à des fins de pilotage de la fertilisation. Un référencement des besoins en N des différentes variétés cultivées dans les différentes conditions de culture qu'elles rencontrent permettra de proposer des plans de fertilisation adaptés. A terme, la définition d'indice de nutrition en azote pourrait voir le jour pour la culture du poireau afin d'ajuster les apports en fonction des contextes pédoclimatiques et objectifs de rendement. Le travail entrepris dans ce projet constitue une base

⁵ Plan national de Réduction des Emissions de Polluants Atmosphériques

solide pour ce potentiel futur développement.

V. Annexes

V.1. Figures supplémentaires

Tableau S1 : Taux de données non acquises pour tous les éléments potentiellement détectables par le XRF sur feuilles ou blanc de poireau frais ou séché et broyé de l'essai mené en conditions contrôlées.

% de données non acquises	Feuilles fraîches	Feuilles sèches	Blanc frais	Blanc secs
Ag	99	99	100	100
Al ₂ O ₃	96	100	88	100
As	98	99	100	98
Au	97	95	92	94
Ba	99	100	100	99
Bi	100	100	98	96
CaO	2	1	0	0
Cd	100	100	100	100
Ce	100	100	100	100
Cl	32	6	50	10
Co	100	96	100	98
Cr	72	67	78	82
Cu	8	29	70	41
Fe	0	1	0	0
Hf	93	95	96	97
Hg	99	98	100	97
K ₂ O	3	2	6	0
La	97	96	100	96
MgO	0	5	0	0
Mn	82	9	82	48
Mo	97	12	94	76
Nb	100	100	100	100
Ni	95	99	100	100
P ₂ O ₅	13	1	66	9
Pb	98	99	98	99
Pd	100	100	100	100
Pt	99	97	100	98
Rb	99	85	98	91
Rh	100	100	100	100
S	78	1	26	7
Sb	100	100	100	100
Se	99	100	100	99
SiO ₂	96	100	94	100
Sn	96	95	100	96
Sr	97	43	100	84
Ta	64	93	94	97
Th	99	100	100	99
Ti	98	80	100	89
Tl	93	94	98	100
U	100	100	100	100
V	100	100	100	100
W	99	100	100	100
Y	96	99	100	99
Zn	79	23	90	8
Zr	95	96	100	100

Tableau S2 : Synthèse des modèles de prédiction obtenus par PLS à partir des bases de données spectrales SNV et SG de feuilles et de blancs de poireaux frais et secs cultivés en conditions contrôlées. ncomp : nombre de composantes retenues pour le modèle donné, R^2_{cv} : coefficient de régression linéaire de validation croisée, RMSECV : racine-carrée de l'erreur de validation croisée.

Element	Unité	Feuille												Blanc											
		Poudre sèche						Tissu frais						Poudre sèche						Tissu frais					
		Base "sg"			Base "snv"			Base "sg"			Base "snv"			Base "sg"			Base "snv"			Base "sg"			Base "snv"		
		ncomp	R^2_{cv}	RMSECV	ncomp	R^2_{cv}	RMSECV	ncomp	R^2_{cv}	RMSECV	ncomp	R^2_{cv}	RMSECV	ncomp	R^2_{cv}	RMSECV	ncomp	R^2_{cv}	RMSECV	ncomp	R^2_{cv}	RMSECV	ncomp	R^2_{cv}	RMSECV
C	%MS	1	0,58	0,71	1	0,55	0,74	1	0,52	0,76	1	0,38	0,86	0			1	0,15	0,79	0			1	0,18	0,77
N	%MS	7	0,86	0,31	8	0,87	0,3	4	0,55	0,56	3	0,56	0,56	7	0,76	0,29	6	0,86	0,23	1	0,38	0,5	2	0,25	0,55
Ag	ppm	0			0			0			0			2	0,18	0	0			0			0		
Al	ppm	0			0			0			0			0			1	0,15	30,2	0			0		
As	ppm	3	0,5	0,12	3	0,47	0,12	1	0,1	0,16	0			0			0			0			0		
B	ppm	3	0,6	10,52	3	0,56	11,36	1	0,1	15,94	2	0,22	14,81	3	0,66	2	2	0,66	2,04	4	0,62	2,12	6	0,65	2,05
Ba	ppm	3	0,79	7,42	4	0,79	7,43	1	0,52	11,32	2	0,59	10,46	0			0			0			0		
Be	ppm	0			0			0			0			0			0			0			0		
Ca	ppm	3	0,85	6474	5	0,85	6394,4	3	0,54	11226	2	0,54	11326	1	0,29	1318,7	1	0,19	1419,6	0			2	0,26	1346,1
Cd	ppm	1	0,19	0,25	1	0,3	0,23	1	0,11	0,26	0			0			0			0			0		
Co	ppm	0			0			0			0			0			0			0			0		
Cr	ppm	0			0			0			0			0			0			0			0		
Cu	ppm	0			0			0			0			0			0			0			0		
Fe	ppm	0			0			0			0			0			0			0			0		
K	ppm	3	0,37	9200,6	8	0,48	8265,7	0			1	0,1	11013	2	0,48	6579,1	6	0,62	5556,8	1	0,41	6940,3	2	0,35	7348
Mg	ppm	0			0			0			0			1	0,46	200,18	2	0,53	187,57	1	0,16	251,77	5	0,4	211,41
Mn	ppm	2	0,34	18,66	4	0,41	17,49	0			0			0			0			0			0		
Mo	ppm	2	0,2	52,67	1	0,29	48,84	1	0,15	53,5	1	0,11	54,65	0			0			0			0		
Mo	ppm	1	0,17	54,39	1	0,28	50,58	0			0			0			0			0			0		
Na	ppm	3	0,43	448,28	3	0,41	461,35	1	0,07	579,56	1	0,08	576,4	1	0,39	223,5	2	0,52	197,92	1	0,18	261,32	1	0,12	270,99
Ni	ppm	0			0			0			0			0			0			0			0		
P	ppm	1	0,35	992,47	3	0,45	894,64	1	0,25	1070,4	1	0,2	1102,4	3	0,51	659,79	2	0,53	646,44	8	0,42	701,42	6	0,38	733,11
Pb	ppm	1	0,18	0,1	1	0,21	0,09	1	0,18	0,1	0			0			0			0			0		
S	ppm	1	0,33	764,84	3	0,41	718,46	1	0,16	856,8	2	0,29	789,37	1	0,29	833,77	1	0,42	757,73	0			2	0,23	849,4
Sb	ppm	1	0,25	0,01	1	0,22	0,01	1	0,18	0,01	0			0			0			0			0		
Se	ppm	1	0,14	0,17	1	0,12	0,17	0			0			0			0			0			0		
Si	ppm	0			0			0			0			0			0			0			0		
Ti	ppm	0			0			0			0			1	0,38	0,23	1	0,18	0,27	1	0,17	0,27	2	0,29	0,25
V	ppm	0			1	0,16	0,05	0			0			0			0			0			0		
Zn	ppm	3	0,28	3,85	1	0,25	3,96	0			0			1	0,62	3,22	5	0,81	2,24	4	0,55	3,42	4	0,55	3,5
Acide Ascorbique	mg AA/gMS													1	0,47	0,44	2	0,59	0,39	1	0,25	0,53	2	0,33	0,49
Capacité antioxydante (FRAP)	µmole ET/g													1	0,43	1,11	2	0,69	0,82	1	0,43	1,13	2	0,49	1,03
Capacité antioxydante (ORAC)	µmole ET/g													1	0,2	4,01	1	0,25	3,91	1	0,2	4,01	4	0,33	3,68
Phénols totaux	mg EAG/g													1	0,43	0,51	2	0,62	0,42	1	0,43	0,51	3	0,53	0,46

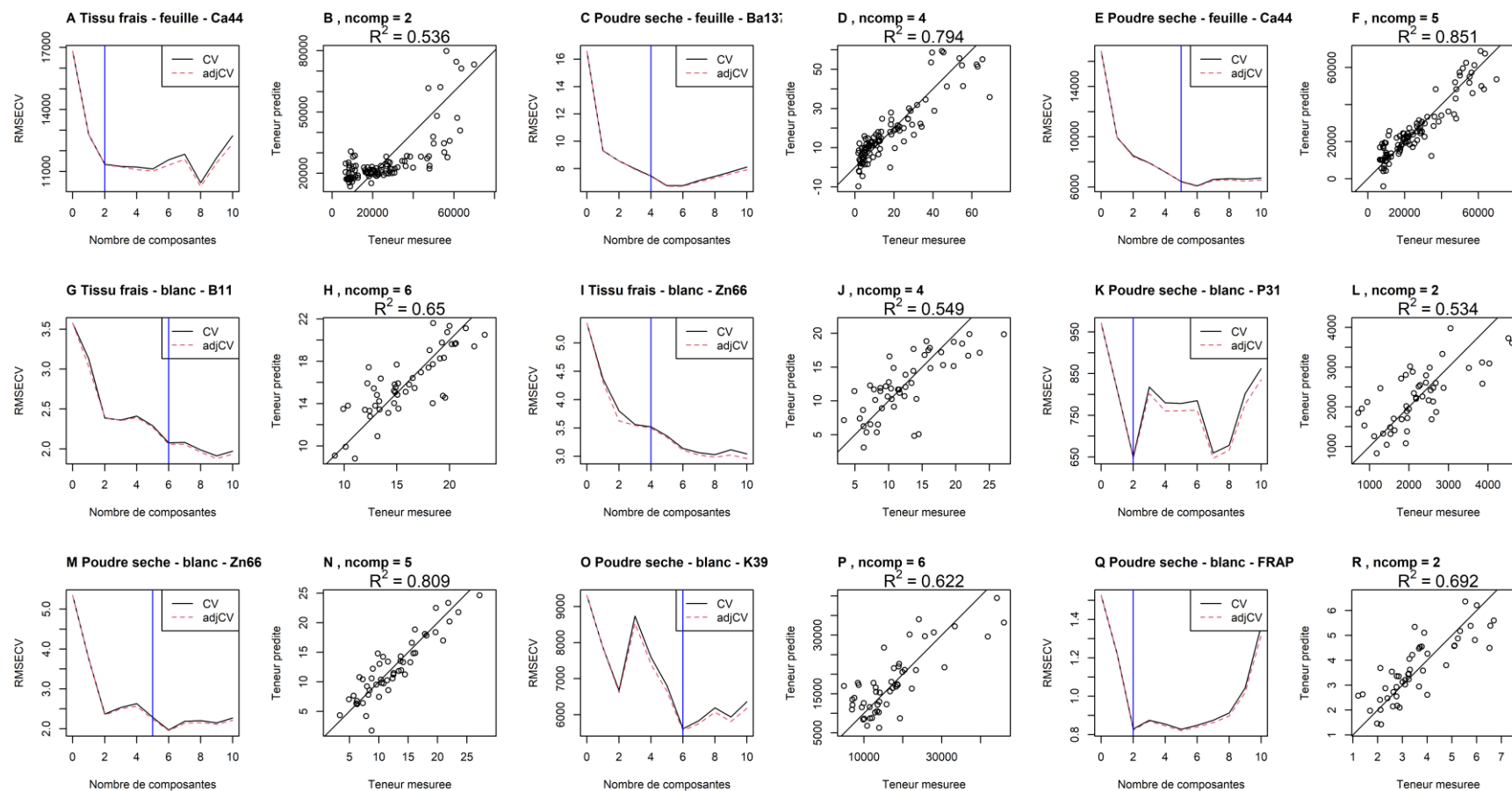


Figure S1 : Résultats de régressions PLS réalisées pour différents éléments déterminés par ICPMS (en ppm) ainsi que pour la capacité antioxydante FRAP à partir des bases de données spectrales de feuilles de poireaux fraîches (A,B), sèches (C,D,E,F), de blancs de poireaux frais (G,H,I,J) et secs (K à R) obtenues dans l'essai en conditions contrôlées et traitées suite au lissage de Savitzky-Golay sans dérivation des spectres obtenus (Base dite "snv"). A,C,E,G,I,K,M,O,Q : évolution de la RMSE de validation croisée (CV) en fonction du nombre de composantes retenu pour le modèle – la ligne verticale donnant le nombre de composantes optimal selon la méthode "onesigma". B,D,F,H,J,L,N,P,R : relation entre valeurs mesurées et valeurs prédites par le modèle avec le nombre de composantes optimal retenu.

V.2. Annexe 1 : Indicateurs de réalisation des actions du projet

Phase/Étape	Contenu de l'action	Indicateurs de réalisation	Comptabilisation des indicateurs
Phase 1 : Coordination du projet	- Gestion administrative, financière et technique du projet - Coordination du projet - Animation du comité de pilotage (COPI) - Réunions techniques : restitution et discussion des résultats des phases 2, 3 et 4 - Coordination de la rédaction des rapports techniques et financiers, ainsi que du rapport final - Participation à la rédaction des comptes rendus de réunions	- Nombre de réunions/ COPI - Fiches d'émargements de participation aux réunions de coordination projet	3 comités de pilotages
Phase 2 : Evaluer les capacités et la pertinence des technologies	Expérimentation en conditions contrôlées Réponses des appareils à des alimentations contrastées en N, P, K et S sur poireau Evaluation des technologies sur des critères établis : prise en main, rapidité, reproductibilité et sensibilité de la mesure, capacité à détecter une déficience spécifique de manière précoce, coût, niveau de maturité et de faisabilité pour une utilisation au champ, niveau de technicité. Définition d'indices/identification de variables indicatrices de statuts nutritionnels Création d'une banque d'échantillons végétaux au contenu élémentaire contrasté	- Nombre, type de technologies testées - Nombre de fiches techniques - Nombre d'échantillons contrastés générés	3 technologies testées : - Fluorimétrie (Multiplex) Les fiches techniques du projet Nutrinnov sont toujours d'actualité 150 échantillons contrastés générés
Phase 3 : Calibration des appareils aux analyses de laboratoire	Analyses élémentaires et biochimiques Analyse mathématique des données Comparaison de données acquises par les capteurs optiques et les analyseurs d'éléments minéraux à des dosages chimiques effectués en laboratoire sur la banque d'échantillons créée en phase 2. Etablissement de courbes de références pour les indices de nutrition pertinents.	- Nombre d'analyses effectuées - Nombre d'indicateurs potentiellement utilisables en plein champ et interprétation associée - Niveau de maturité des technologies pour une évaluation au champ	Issu de l'essai en conditions contrôlées (phase 2) : - 150 analyses IRMS - 150 analyses ICP-MS - 50 mesures de teneurs en acides ascorbique - 50 mesures de teneurs en polyphénols - 50 mesures de capacité antioxydantes par méthode ORAC - 50 mesures de capacité antioxydantes par méthode FRAP Issu des essais en conditions de production (phase 4) : - 452 analyses IRMS - 150 analyses ICP-MS - 48 mesures de teneurs en acides ascorbique - 48 mesures de teneurs en polyphénols - 48 mesures de capacité antioxydantes par méthode ORAC - 48 mesures de capacité antioxydantes par méthode FRAP Les fiches techniques du projet Nutrinnov sont toujours d'actualité Multiplex : TRL 4 XRF : TRL 6 NIRS : TRL 6
Phase 4 : Valider Les technologies innovantes et les calibrations pour le pilotage de la nutrition au champ	Expérimentations en conditions de productions Réponse des appareils à des modalités de fertilisation contrastées sur poireau Essai 1 : Facteur fractionnement de la fertilisation Essai 2 : Facteurs variétés x fractionnement de la fertilisation (modalités sélectionnées suite à l'essai 1) et modalité pilotée Objectifs : i) Mise en application des indicateurs de nutrition définis en conditions contrôlées (phases 2 et 3). Evaluation dans nos conditions de production au regard de la qualité commerciale et sanitaire des produits ii) Validation des technologies sur des critères établis : prise en main, rapidité, cohérence, reproductibilité et sensibilité de la mesure.	- Nombre d'essais réalisés, - Nombre, type de technologies testées - Nombre de fiches techniques améliorées / phase 2 - Niveau de maturité des technologies évaluées en fin de projet - Nombre de technologies prêtes pour un transfert sur nos cibles	2 essais réalisés 3 technologies testées sur essai 1 - Fluorimétrie (Multiplex) - Spectrométrie à rayons X (XRF) - Spectrométrie proche infra rouge (NIRS) 1 technologie testée sur essai 2 : - Spectrométrie proche infra rouge (NIRS) Les fiches techniques du projet Nutrinnov sont toujours d'actualité Multiplex : TRL 4 XRF : TRL 7 NIRS : TRL 6 Entre 0 et 2 en fonction de la capacité d'adaptation des cibles Les conseillers techniques doivent se former pour utiliser les technologies
Phase 5 : Capitaliser et diffuser les références produites aux commanditaires, bénéficiaires et cibles	- Capitalisation / synthèse des résultats : réalisation de fiches techniques dédiées à la bonne mise en œuvre des technologies validées par l'étude - Diffusion des fiches techniques : i) par type de technologie mature (validées en phase 4), en particulier aux agriculteurs et conseillers techniques agricoles. ii) par type de technologie jugée pertinente en phase 3, en particulier aux acteurs impliqués dans la R&D et aux acteurs privés de la filière pour de futurs projets de développement. - Valorisation de l'ensemble des contenus produits via le site web des partenaires (a minima du chef de file) - Réalisation d'articles de vulgarisation présentant le projet, ses objectifs et ses résultats dans Jardins du Littoral et/ou des revues agricoles et scientifiques (par ex. Plant Methods) - Organisation d'une journée technique sur le site du Sileban à destination des publics cibles du projet (producteurs et conseillers agricoles entre autres) - Réalisation d'interventions complémentaires spécifiques à chaque partenaire lors de commissions techniques, réunions professionnelles, assemblées générales ou des journées sur parcelles d'essais. - Capitalisation des résultats du projet vers d'autres publics. Sont pressenties : i) participation en région à des événements tels que la Fête de la Science, les journées de l'Excellence et/ou de l'Innovation, journées de La Fédération de recherche Normandie Végétale 4277 organisées à l'université de Caen, module d'approfondissement du Master Biologie Agrosciences de Normandie Université) ii) participation au COMIFER iii) édition de recommandations pratiques aux fournisseurs de solutions afin d'améliorer leur produit.	- Nombre d'événements organisés (interventions, journées technique...) - Public cible touché (nombre, qualité) dont nombre d'agriculteurs et conseillers agricoles impliqués - Nombre de publications, d'articles de vulgarisation, type de public touché. - Fréquentation des contenus Web	1 journée technique, destinée aux producteurs et conseillers techniques 1 article dans la Newsletter du Sileban 1 article dans les Jardins du Littoral destinées aux producteurs et conseillers techniques Site web du Sileban piraté