

2024-2025

Master 1 de Biologie végétal

RAPPORT DE STAGE

Réponse à l'eau et irrigation (système et pilotage) en production de semences de betterave potagère

TITOUAN LUBIN

28 décembre 2001

Sous la direction de Nathalie LEDUC

STAGE REALISE A LA FNAMS

DU 14 AVRIL AU 14 AOUT

Maître de stage : Serge BOUET

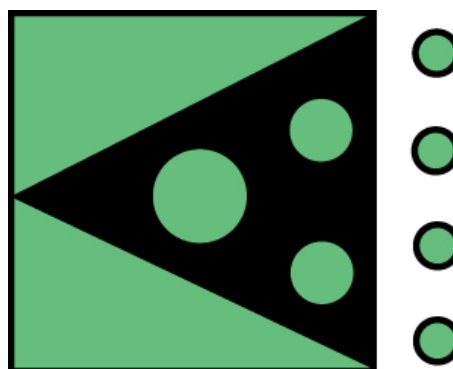
Jury

Jérémy CLOTAULT : présidente

José GENTILHOMME : membre

Soutenu publiquement le

01/07/25



FNAMS

AVERTISSEMENT

L'université n'entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans les travaux des étudiant·es : ces opinions doivent être considérées comme propres à leurs auteurs.

ENGAGEMENT DE NON PLAGIAT

Engagement à signer et à joindre à tous les rapports, dossiers, mémoires ou thèse

Je, soussigné LUBIN Titouan

déclare être pleinement conscient que le plagiat de documents ou d'une partie d'un document publiée sur toutes formes de support, numérique ou papier, constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée. En conséquence, je m'engage à citer toutes les sources que j'ai utilisées pour écrire ce rapport.



signé par l'étudiant le 23 / 06 / 2025

REMERCIEMENTS

Avant toute chose, je tiens à dire un grand merci du fond du cœur à toutes les personnes qui ont marqué ces quelques mois de stage, par leur aide, leur présence et leur humour.

Je tiens à remercier chaleureusement Serge pour m'avoir accueilli au sein de la station et permis de réaliser ce stage dans un cadre agréable et stimulant. J'ai particulièrement apprécié la liberté qui m'a été laissée pour mener mes expérimentations, ainsi que les échanges, parfois brefs mais toujours utiles, qui m'ont aidé à avancer. Malgré un emploi du temps chargé, Serge a su se rendre disponible quand j'avais besoin d'un conseil ou d'un éclairage, ce que j'ai sincèrement apprécié. Grâce à cette expérience, j'ai pu gagner en autonomie et découvrir de manière concrète le quotidien du travail en station expérimentale.

Un merci tout particulier à Lou, qui a été mon repère depuis le premier jour. Merci de m'avoir guidé, expliqué, soutenu. Merci pour ta patience, pour ta clarté, et pour avoir pris le temps de m'apprendre les bases de l'entreprise sans jamais me faire sentir perdu. Ton accompagnement m'a beaucoup apporté.

Merci à Marie, d'avoir été là pile quand j'avais besoin de toi, notamment pendant la mise en place de mes expérimentations (et tous les petits imprévus qui allaient avec). Ta présence m'a rassuré plus d'une fois, et ton énergie sur le terrain a vraiment fait la différence.

Un grand merci également à Caroline, Thibaut et Iseu. Merci pour vos conseils, vos réponses à mes (nombreuses) questions, votre expertise mais aussi votre humour et votre accueil.

Et enfin, un merci tout particulier à Vincent, Étienne, Gabriel, Lisa et Maël. Vous avez apporté une bonne dose de fun à cette aventure, et vos blagues, fous rires et moments partagés resteront parmi mes meilleurs souvenirs de ce stage.

LISTE DES ABREVIATIONS

FNAMS : Fédération Nationale des Agriculteurs Multiplicateurs de Semences

s.d. : sans date

PMG : Poids de Mille Graines

FG : Faculté Germinative

RFU : Réserve Facilement Utilisable

Cb : Centibar

ANOVA : Analyse de la Variance

Mi : Micro-aspersion

GaG : Goutte à goutte

SOMMAIRE

Avertissement	
Engagement de non plagiat	
Remerciements	
Liste des abréviations	
Sommaire	
Introduction	1
Enjeux agronomiques et contexte	1
Outils innovants pour l'irrigation	2
Matériel et Méthodes	5
Site expérimental et dispositif général	6
Conduite culturale et mesures	7
Résultats	9
Matière sèche.....	9
Rendement grainier	9
Poids de Mille Graines	10
Faculté germinative - FG	10
Eau d'irrigation apportée	11
Quantités totales d'azote absorbé	11
Calibres des graines.....	12
Discussion	13
Goutte-à-goutte vs aspersion	13
Pilotage de l'irrigation	13
Dose d'azote	14
Perspectives	15
Perspectives techniques	15
Perspectives agronomiques et scientifiques	15
Perspectives agronomiques et scientifiques	16
Conclusion	18
Annexes	
Annexe I	
Bibliographie	19
Table des illustrations	
Table des tableaux	
Table des graphiques	
Lexique	
Abstract	
Résumé	

INTRODUCTION

La FNAMS (Fédération Nationale des Agriculteurs Multiplicateurs de Semences) est une organisation professionnelle agricole fondée en 1956, spécialisée dans la production de semences. Elle représente plus de 17 000 agriculteurs multiplicateurs en France et consacre l'essentiel de son activité à des travaux techniques ainsi qu'à la mise en place de références technico-économiques pour les cultures porte-graine(FNAMS, s.d.).

Ses principales missions sont les suivantes :

1. Élaborer et diffuser des itinéraires techniques adaptés à chaque espèce (céréales, protéagineux, fourragères, potagères, etc.), afin d'améliorer la qualité des semences produites et la rentabilité des cultures, tout en respectant les exigences réglementaires ;
2. Défendre les intérêts des agriculteurs multiplicateurs auprès des organisations professionnelles, des pouvoirs publics et des élus, notamment au sein de l'interprofession semences ;
3. Animer le réseau des multiplicateurs à l'échelle régionale et nationale pour encourager les échanges et la diffusion d'innovations.

Basée à Paris, la FNAMS dispose de 7 stations régionales d'expérimentation. La station technique de Brain-sur-l'Authion (Maine-et-Loire), où s'est déroulé mon stage, abrite la direction technique nationale. Dans la filière semences française, la FNAMS joue un rôle central en tant que référent technique pour les producteurs. Ce leadership s'accompagne toutefois d'exigences économiques et réglementaires élevées. D'un côté, les producteurs doivent répondre aux attentes du marché (qualité sanitaire, taux de germination, calibres, etc.) dans un contexte de concurrence internationale. De l'autre, ils évoluent dans un cadre réglementaire de plus en plus strict, notamment en ce qui concerne la durabilité de la production agricole. En parallèle, les pressions liées aux ressources naturelles, notamment l'eau, s'intensifient : les épisodes de sécheresse et les restrictions d'irrigation se multiplient en France. Cela pousse la filière à innover pour économiser cette ressource essentielle. Consciente de ces enjeux, la FNAMS oriente depuis plusieurs années son programme technique vers la protection intégrée des cultures et le développement de pratiques agricoles plus durables(FNAMS, s.d.).

ENJEUX AGRONOMIQUES ET CONTEXTE

La production de semences de betterave potagère est une culture particulièrement technique, soumise à de fortes exigences agronomiques et environnementales. Son cycle long, qui est bisannuelle (semis août , récolte août suivant), impose une gestion rigoureuse des ressources hydriques et nutritives(FNAMS, 2023). En France, les épisodes de sécheresse estivale et les restrictions d'irrigation se multiplient, affectant directement les périodes sensibles de la betterave semencière, notamment l'implantation en fin d'été et la montaison-floraison au printemps suivant (INRAE, 2022). Ces phases sont critiques : un stress hydrique durant ces stades peut entraîner une chute importante du rendement en semences, voire une montée à graines hétérogène ou avortée. L'irrigation doit donc à la fois compenser les déficits en eau sans provoquer de saturation du sol, inhibant ainsi le risque d'asphyxie racinaire ou le lessivage des nutriments(INRAE, 2022).

À ces contraintes hydriques s'ajoutent des exigences liées à la fertilisation azotée. En zone vulnérable, les apports d'azote sont strictement encadrés par la réglementation, avec des plafonds calculés selon la méthode du bilan prévisionnel. (Ministère de l'Agriculture – DRAAF Centre-Val de Loire, 2017).

Cette gestion est d'autant plus délicate pour la betterave porte-graine que son cycle couvre deux années civiles (semis en été N, récolte en été N+1). Une partie de l'azote absorbé à l'automne est utilisée pour le développement végétatif (racine, rosette), mais doit également être remobilisée au printemps suivant pour accompagner la floraison et le remplissage des graines. Ce fractionnement biologique induit un risque de pertes par lessivage hivernal, mais rend aussi difficile l'ajustement des doses (SEMAE, 2015). Un déficit d'azote au printemps peut pénaliser la production, mais une sur-fertilisation à l'automne engendre des pertes environnementales. Dans ce contexte, la tentation d'ajouter une marge de sécurité est grande, d'où l'importance de mieux comprendre les effets d'un excès d'azote et d'affiner le pilotage pour atteindre une efficacité maximale sans dépassement réglementaire.

OUTILS INNOVANTS POUR L'IRRIGATION

Face à ces défis, la FNAMS a engagé un essai expérimental à la station de Brain-sur-l'Authion visant à tester des systèmes innovants d'irrigation et de pilotage. Deux systèmes ont été choisis pour l'irrigation : l'aspersion (pour des raisons pratique en petite parcelle expérimentale, il s'agit de micro-aspersion) et le goutte-à-goutte de surface, chacun présentant des caractéristiques techniques adaptées aux enjeux de la culture.

Irrigation : goutte-à-goutte de surface vs aspersion

Avant que ne soit mené l'essai conduit sur la betterave potagère porte-graine, différents travaux et retours d'expérience faisaient apparaître des avantages et des inconvénients techniques, économiques et agronomiques pour chacun de ces systèmes. L'irrigation goutte-à-goutte est souvent caractérisée comme moins consommatrice d'eau que l'aspersion classique ; certaines publications évoquent une réduction de 20 à 30 % des volumes utilisés. Dans la pratique, à production égale, le goutte-à-goutte peut permettre d'obtenir des performances similaires à celles de l'aspersion sous contrainte hydrique (ARVALIS, 2013). Le choix du système à adopter dépend donc d'un arbitrage entre l'efficacité de l'irrigation, le coût du matériel et les effets agronomiques sur la culture.

Le goutte-à-goutte de surface applique l'eau localement au pied des plantes, ce qui réduit considérablement les pertes par évaporation et le ruissellement par rapport à un arrosage par canon. En apportant l'eau directement au niveau des racines, il limite l'humidification inutile des inter-rangs et évite d'arroser les adventices. Ces avantages en font une solution particulièrement adaptée aux cultures à haute valeur ajoutée nécessitant une gestion précise des intrants (maraîchage, arboriculture, semences potagères), où le surcoût peut être justifié. Des références bibliographiques mentionnent déjà l'usage du goutte-à-goutte pour la production de semences, y compris à l'étranger, par exemple pour la carotte porte-graine en Oregon, ce qui laissait présager un intérêt potentiel pour la betterave porte-graine.

En contrepartie, l'installation d'un réseau de goutte-à-goutte représente un investissement initial important, ainsi qu'un surcroît de travail en amont et en aval de la saison.



Source : LT

Figure 1 – Photo d'asperseur au sein de parcelles de betteraves prise sur la station Brain le 20/06/2025

La mise en place nécessite des équipements spécifiques (réseau de tuyaux, goutteurs, station de filtration) ainsi que du temps pour installer puis retirer les lignes chaque année. Le dispositif est exposé à des problèmes d'entretien : par exemple, les orifices des goutteurs peuvent se colmater si la qualité de l'eau est insuffisante, et le remplacement régulier du matériel (tuyaux, filtres) entraîne des dépenses récurrentes non négligeables. Un suivi rigoureux est donc requis pour garantir la durabilité de l'installation et éviter des pertes d'uniformité dans l'irrigation. En France, selon les enquêtes agricoles, l'aspersion reste de loin la méthode d'irrigation dominante (utilisée sur environ 94 % des surfaces irriguées), tandis que le goutte-à-goutte ne couvrait en 2010 que 8 % des surfaces irriguables, principalement en maïs et en pomme de terre, dans des exploitations spécialisées. Cette diffusion relativement limitée s'explique en grande partie par le coût élevé du goutte-à-goutte sur de grandes surfaces, ainsi que par la complexité de sa mise en œuvre à l'échelle d'une exploitation céréalière ou betteravière. Enfin, certaines études soulignent que le goutte-à-goutte n'apporte pas nécessairement de gain significatif de rendement par rapport à une aspersion bien gérée avec un volume d'eau équivalent, ce qui peut nuancer l'intérêt économique de cette technique lorsque l'eau n'est pas une ressource limitante (ARVALIS, 2013). En face, l'aspersion (canon enrouleur, rampe, etc.) reste historiquement la technique de référence adoptée sur les grandes surfaces. Elle doit son succès à sa simplicité de mise en œuvre et à sa polyvalence. Un seul enrouleur peut irriguer plusieurs parcelles successivement, sans nécessiter d'installation fixe coûteuse. Le matériel d'aspersion est par ailleurs très souvent déjà présent dans les fermes, et son coût à l'hectare est raisonnable comparé au goutte-à-goutte (de l'ordre de 1000 à 1500 €/ha pour un canon conventionnel) (Chambres d'agriculture, 2021). D'un point de vue agronomique, arroser par le dessus du feuillage reproduit le mode de pluie naturelle, ce qui peut parfois rafraîchir les plantes en période estivale et favoriser un enracinement plus profond, en incitant les racines à explorer un volume de sol plus étendu que sous un goutte-à-goutte localisé.

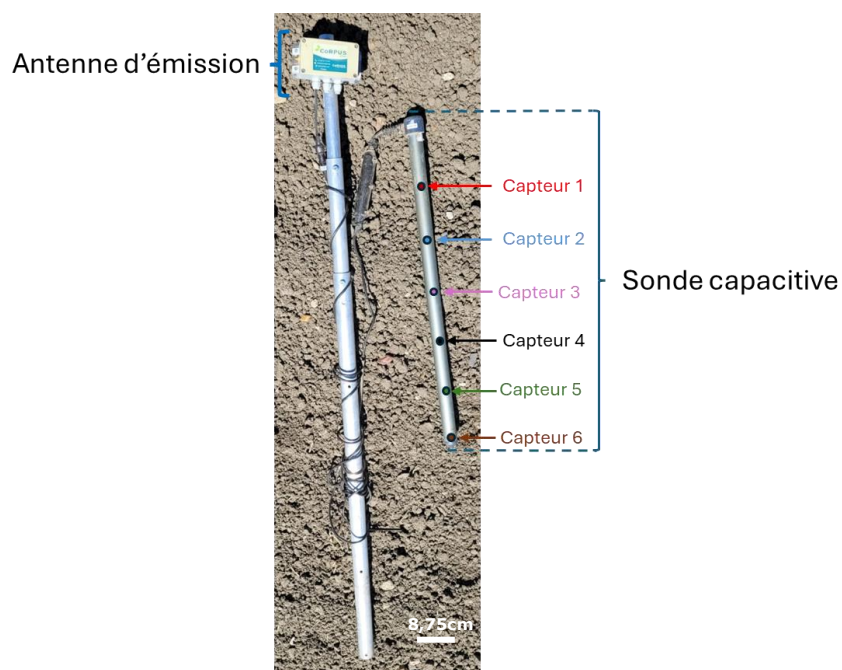
Cependant, l'aspersion présente plusieurs inconvénients bien documentés. D'abord, elle est nettement plus gourmande en énergie, en raison des fortes pressions de service nécessaires pour projeter l'eau à distance. Par exemple, il a été estimé que pour irriguer 30 hectares de maïs, un système goutte-à-goutte nécessite environ 15 kW de puissance de pompage, contre environ 35 kW pour un canon asperseur (ARVALIS, 2013). Deuxièmement, l'aspersion est plus sensible aux aléas climatiques : le vent peut perturber la trajectoire des jets et entraîner une distribution hétérogène de l'eau au sol, créant des zones sur- ou sous-arrosées. À cela, il faut ajouter qu'en cours de route ou après dépôt au sol, une certaine fraction de l'eau risque de s'évaporer, réduisant ainsi l'efficacité d'application par rapport à un système goutte-à-goutte. Ces pertes par évaporation sont d'autant plus importantes que les apports sont réalisés en plein jour, par temps ensoleillé ou venteux. De plus, tandis que le goutte-à-goutte maintient le feuillage au sec, l'arrosage par aspersion mouille la canopée : cela crée un microclimat humide susceptible de favoriser le développement de maladies fongiques (rouilles, oïdium, cercosporiose...) sur la betterave. L'eau stagnante sur les feuilles peut également lessiver certains traitements phytosanitaires ou provoquer des brûlures foliaires en plein soleil. Enfin, l'impact de gouttes de grosse taille sur un sol nu peut entraîner un effet de battance (croûte de surface), surtout sur les terres limoneuses fragiles, ce qui nuit à l'infiltration de l'eau et à la structure du sol. Ces inconvénients agronomiques, associés à l'efficacité réduite de l'aspersion en conditions défavorables (vent, chaleur), ont justifié l'exploration d'alternatives plus efficaces dans une perspective d'agriculture durable.

Dans ces essais, l'aspersion a été remplacée par la micro-aspersion, plus facile à mettre en œuvre. (voir figure 1)



Source : LT

Figure 2 – Photo prise sur la station Brain le 11/05/25 de deux sonde tensiométrique posé à 60 cm de profondeurs (à gauche) et 30 cm de profondeur (à droite)



Source : LT

Figure 3 – Photo prise sur la station Brain le 15/05/25 d'une sonde capacitive

Pilotage de l'irrigation : sondes tensiométriques vs sondes capacitives

Ces instruments permettent de baser les décisions d'irrigation sur des données objectives (niveau de sécheresse du sol) plutôt que sur de simples estimations empiriques. Leur utilisation combinée à des dispositifs d'irrigation performants tend à maximiser l'efficacité de l'eau, en garantissant que chaque apport soit réellement justifié par l'état hydrique de la culture. Les sondes tensiométriques (voir figure 2) mesurent la tension matricielle de l'eau du sol, c'est-à-dire la force avec laquelle l'eau est retenue dans le sol et l'effort que doivent fournir les racines pour l'absorber. Ces sondes sont utilisées depuis longtemps et bénéficient d'un retour d'expérience considérable : les seuils de tension correspondant aux stades de stress des principales cultures sont bien documentés, et l'interprétation des mesures est directe et universelle (exprimée en centibars, indépendamment du type de sol) (Tscheiller, 2018). Par ailleurs, la tensiométrie peut être utilisée quel que soit le mode d'irrigation (goutte-à-goutte ou aspersion), sans qu'il soit nécessaire d'étalonner l'appareil pour chaque parcelle. On considère généralement qu'une plage de tension comprise entre 0 et ~200 cbar couvre les besoins de pilotage des cultures irriguées classiques. Au-delà, le sol est trop sec et le tensiomètre classique atteint la limite de sa plage de mesure. En résumé, les sondes tensiométriques constituent un outil robuste, fiable et adaptable à de nombreuses situations, pour suivre l'évolution de la disponibilité en eau du sol.

Les tensiomètres ont cependant quelques contraintes. D'une part, leur plage de mesure limitée signifie que, par exemple, en cas de sécheresse sévère, ils ne pourront plus fournir de lecture utile. Il faut donc éviter de laisser le sol s'assécher au-delà de ce que le tensiomètre peut détecter. D'autre part, ils nécessitent un entretien régulier : il faut les installer avec précaution (bon contact terre-capsule), puis les vérifier à intervalles réguliers pour s'assurer qu'aucune bulle d'air ne perturbe la mesure. De plus, en hiver, il faut les retirer ou les protéger pour éviter les risques de gel. Bien que ces précautions soient nécessaires, la fiabilité des tensiomètres manuels est généralement jugée satisfaisante, et leur temps de réponse est rapide une fois bien installés. Leur simplicité et leur faible coût ont favorisé leur adoption généralisée pour le pilotage de l'irrigation en cultures de plein champ telles que le maïs grain, le maïs semence, la pomme de terre ou les betteraves.

En parallèle, d'autres méthodes plus récentes ont émergé, telles que les sondes capacitives (voir figure 3). Ces dernières mesurent la teneur en eau volumique du sol (pourcentage d'humidité) en exploitant les propriétés diélectriques du sol. Concrètement, il s'agit de sondes capacitatives multi-niveaux composées de capteurs électroniques placés à différentes profondeurs, qui évaluent en continu l'humidité locale du sol. Cela permet d'obtenir un profil hydrique global de la zone enracinée, en visualisant la distribution de l'eau selon la profondeur. L'intérêt agronomique réside à la fois dans le suivi de l'apport d'eau dans les couches superficielles et dans la recharge des horizons plus profonds, à la suite d'une pluie ou d'un arrosage. Ces données sont généralement transmises en temps réel, ce qui facilite un suivi permanent et réactif de l'état du sol, sans intervention humaine (les mesures étant consultables à distance grâce à une application). Cela permet ainsi d'ajuster finement les tours d'eau et les doses d'irrigation en fonction de l'évolution journalière de l'humidité, ce qui s'inscrit pleinement dans les démarches d'irrigation de précision.

Malgré ces atouts, les sondes capacitatives présentent des inconvénients qu'il convient de prendre en compte avant leur mise en œuvre. Premièrement, leur principe de mesure impose de calibrer l'appareil en fonction du type de sol. La relation entre la constante diélectrique mesurée et la teneur réelle en eau dépend en effet de la texture et de la composition du sol. Une calibration spécifique par type de sol est donc nécessaire pour garantir la précision des lectures ; à défaut, les valeurs fournies.

peuvent s'écarter sensiblement de la réalité. Ce besoin de calibrage rend la technologie un peu plus complexe à déployer à grande échelle, comparée à la tensiométrie, qui fournit une indication universelle du stress hydrique sans ajustement préalable. De plus, les sondes capacitatives sont associées à un coût élevé, le prix d'une sonde multi-profondeur et de son dispositif d'enregistrement se chiffre en milliers d'euros, soit un investissement nettement supérieur aux quelques centaines d'euros nécessaires pour équiper une parcelle en tensiomètres classiques.

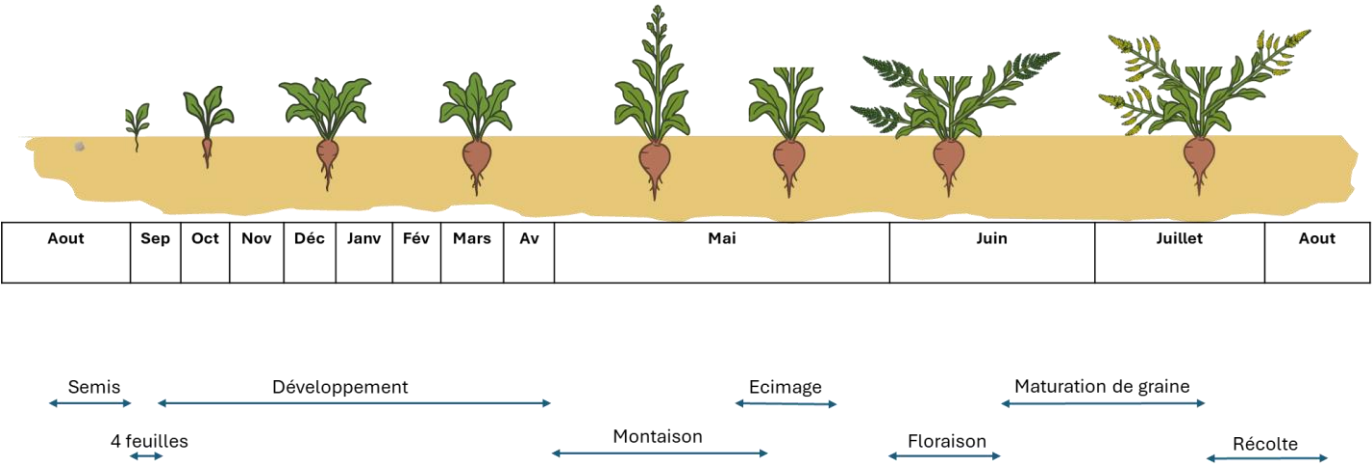
À cela, il faut ajouter que les capteurs électroniques peuvent dériver avec le temps (dérive des capteurs, usure de la batterie ou de l'électronique), ce qui oblige à des vérifications périodiques et à d'éventuelles recalibrations. De plus, le choix de la localisation de la sonde apparaît comme primordial pour éviter un positionnement dans une zone en sous- ou sur-irrigation permanente, ce qui fausserait l'évaluation des besoins réels de la culture. Enfin, en termes de diffusion dans le secteur agricole, les sondes capacitatives restent moins répandues que les tensiomètres en cultures de plein champ. Elles sont principalement adoptées dans certaines filières à forte valeur ajoutée ou à haute technicité, comme en viticulture, en arboriculture, en maraîchage sous serre, ou pour les cultures de semences en irrigation localisée. Dans ces contextes, la nécessité de suivre de près l'humidité du sol et d'optimiser chaque apport d'eau justifie le surcoût de la technologie. Néanmoins, leur utilisation tend à se développer progressivement, à mesure que les outils connectés se démocratisent et que la recherche d'une efficacité maximale de l'eau d'irrigation devient un enjeu central.

Le croisement de ces différentes approches dans le cadre de l'essai FNAMS vise à maximiser l'efficacité des apports tout en apportant des références agronomiques solides pour la filière. En couplant mesure de la quantité d'eau apportée et mesure de la contrainte ressentie par la plante, il devient possible d'adapter très finement les apports, au plus près des besoins réels de la betterave porte-graine. L'objectif est clair : sécuriser les rendements en semences, améliorer la qualité des lots, et réduire l'empreinte environnementale de la culture dans un contexte de ressource limitée. Dans ce contexte, la problématique de l'étude peut être formulée ainsi : quels systèmes d'irrigation et quels outils de pilotage permettent d'améliorer l'efficacité de l'usage de l'eau sans nuire à la productivité d'une culture exigeante en eau ? Par ailleurs, la dose d'azote calculée par le bilan prévisionnel est-elle bien ajustée aux besoins réels de la plante ? Il s'agit donc d'un enjeu d'optimisation multi-critères de l'itinéraire technique, s'appuyant sur les nouvelles technologies, tout en conservant une rigueur agronomique.

OBJECTIFS DE L'ETUDE :

Pour répondre à cette problématique, un essai pluriannuel expérimental a été mené à la station de Brain-sur-l'Authion entre 2020 et 2023. Il visait plusieurs objectifs concrets :

- **Comparer deux systèmes d'irrigation** (micro-aspiration vs goutte-à-goutte de surface) en culture de betterave porte-graine, pour évaluer leur impact sur la consommation d'eau, le rendement et la qualité des semences.
- **Tester différents outils de pilotage de l'irrigation**, en comparant la gestion basée sur le bilan hydrique climatique à celle fondée sur l'utilisation de sondes tensiométriques et capacitatives.
- **Évaluer la pertinence de la méthode du bilan prévisionnel d'azote** pour cette culture, en comparant la dose « normale » calculée à une modalité sur-fertilisée. L'objectif est de vérifier si cette dose suffit à atteindre le rendement optimal ou si un apport supplémentaire d'azote peut améliorer la production, avec le risque d'augmenter aussi les pertes par lessivage.



Source : LT

Figure 4 - Schéma du cycle biologique de la betterave potagère porte graines

	Facteurs		
Traitements	Système d'irrigation	Outil de pilotage	Dose d'azote
T1	Pas d'irrigation	Pas d'irrigation	Bilan
T2	Goutte à goutte	sonde tensiométrique	Bilan
T3	Goutte à goutte	sonde capacitive	Bilan
T4	microaspersion	sonde tensiométrique	Bilan
T5	microaspersion	sonde capacitive	Bilan
T6	microaspersion	sonde tensiométrique	Bilan +40U

Tableau 1 – Résumé des modalités

MATERIEL ET METHODES

SITE EXPERIMENTAL ET DISPOSITIF GENERAL

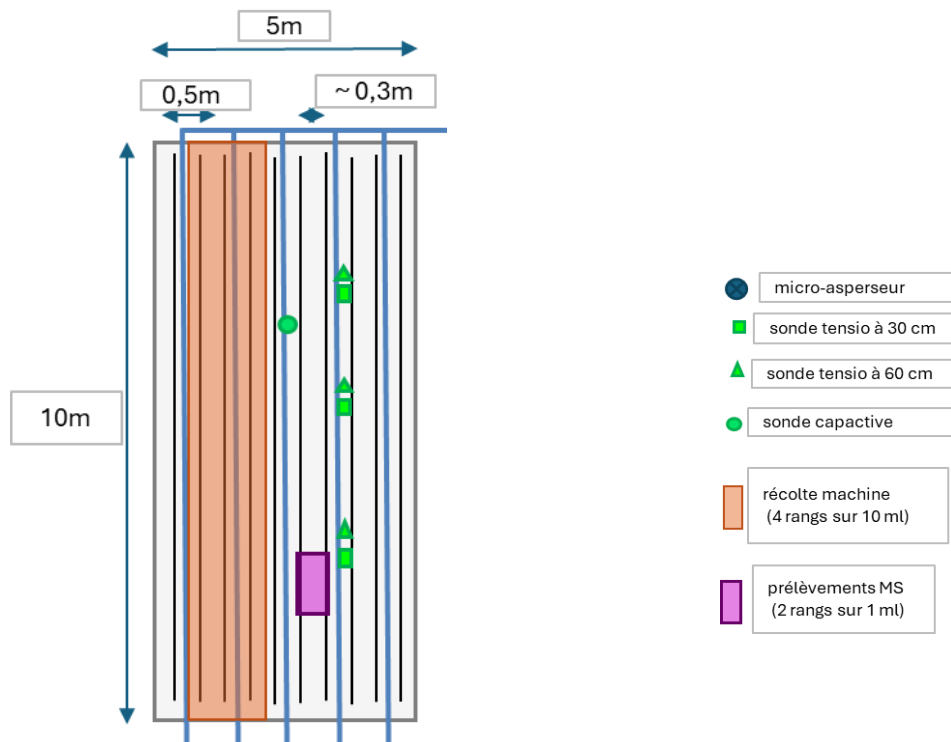
Les essais ont été menés à la station technique de la FNAMS à Brain-sur-l'Authion (49). Chaque année, un essai cultural a été conduit sur un cycle complet de production de semences, de la mise en place de la culture jusqu'à la récolte des graines l'année suivante. La culture de betterave semencière (voir figure 4) est bisannuelle : semis effectué fin été N (autour de mi-août), levée 1 à 2 semaines plus tard, développement automnal de la racine et des feuilles. Au printemps de l'année N+1, les betteraves vernalisées reprennent leur croissance (montaison), émettent une tige florale et fleurissent en fin de printemps (mai-juin). La maturation des graines en juillet, la plante étant généralement andainée puis battue en juillet-août N+1 pour récolter les semences.

Le dispositif expérimental couvre les campagnes de récolte 2020 à 2025. La présente étude porte sur les campagnes 2020 à 2023. Il s'agissait d'essais en plein champ menés en blocs randomisés, avec 4 répétitions par traitement (parcelle élémentaire). Chaque année, l'essai comportait jusqu'à 8 modalités de traitement combinant l'irrigation et la fertilisation. Les parcelles élémentaires mesuraient environ 20 à 30 m² chacune. Les blocs étaient disposés de manière à minimiser l'hétérogénéité du sol.

TRAITEMENTS TESTES

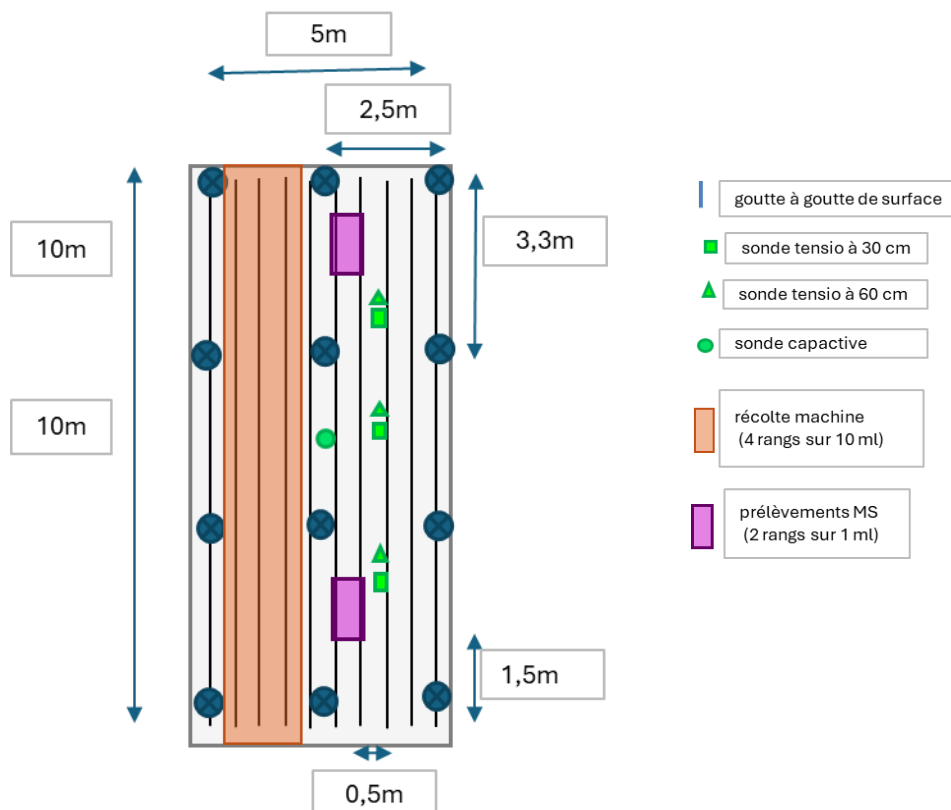
Cinq traitements principaux (dont un témoin) ont été définis (voir tableau 1), combinant trois facteurs : système d'irrigation, mode de pilotage de l'irrigation et dose d'azote. Ces facteurs et modalités découlent des objectifs énoncés plus haut. Les traitements effectifs mis en place sont listés ci-dessous :

- Témoin non irrigué (pas d'irrigation, dose N « bilan ») : parcelles cultivées sans aucun apport d'irrigation (hors pluies naturelles), recevant la dose d'azote standard calculée par bilan. Ce témoin visait à quantifier le rendement sans irrigation et à servir de référence pour la productivité et la consommation en eau minimale.
- Goutte-à-goutte + Pilotage tensiométrique (dose N bilan) : irrigation par goutte-à-goutte de surface, pilotée par des sondes tensiométriques, avec la dose d'azote normale. Ce traitement représente une gestion innovante de l'eau combinée à un outil de pilotage tensiométrique pour respecter au mieux les besoins de la plante.
- Goutte-à-goutte + Pilotage capacitif (dose N bilan) : irrigation goutte-à-goutte pilotée par sondes capacitives mesurant l'humidité du sol, dose d'azote normale.
- Micro-aspersion + Pilotage tensiométrique (dose N bilan) : irrigation par micro-aspersion pilotée aux tensiomètres, dose d'azote normale.
- Micro-aspersion + Pilotage capacitif (dose N bilan) : aspersion pilotée par sondes capacitives, dose d'azote normale.
- Micro-aspersion + Pilotage tensiométrique (dose N sur-fertilisée) : aspersion pilotée aux tensiomètres, avec une dose d'azote augmentée de +40 unités (kg N/ha) par rapport au bilan. La sur-fertilisation a été réalisée en apportant un surplus d'azote à l'automne.



Source : Serge BOUET

Figure 5 - Plan d'une parcelle élémentaire en goutte à goutte de surface



Source : Serge Bouet

Figure 6 - Plan d'une parcelle élémentaire en micro-aspersion

Il convient de noter que, pour des raisons techniques, toutes les modalités n'ont pas été mises en œuvre chaque année.

CONDUITE CULTURALE ET MESURES

Irrigation

Les systèmes d'irrigation ont été installés sur les parcelles concernées après l'écimage. Pour le goutte-à-goutte (voir figure 5), des lignes de tuyaux goutteurs ont été disposées à la surface du sol le long des rangs de betteraves (espacés d'environ 50 cm), avec des goutteurs espacés de 20 à 30 cm. Pour la micro-aspersion (voir figure 6), chaque parcelle était équipée de plusieurs micro-asperseurs couvrant uniformément la parcelle. Les apports d'eau ont été déclenchés en fonction des relevés des sondes.

Dans les modalités tensiométriques, des tensiomètres ont été installés dans le sol de chaque parcelle, à deux profondeurs (30 cm et 60 cm). Ces capteurs mesurent la tension de succion exercée par le sol sur l'eau (exprimée en centibars). Deux seuils d'alerte avaient été définis : avant la floraison, une irrigation était déclenchée dès que la tension mesurée à 30 cm dépassait ~120 cb (indiquant un assèchement important de la zone racinaire superficielle) et que la tension à 60 cm dépassait 80 cb (assèchement en profondeur) ; après le début de la floraison, des seuils plus bas (30 cm > ~80 cb) étaient utilisés pour éviter tout stress pendant la fructification. Lorsqu'ils atteignaient les seuils, on procédait à une irrigation. Dans les modalités capacitatives, une sonde capacitive multi-niveaux était placée au centre de chaque parcelle, mesurant l'humidité volumique du sol à différentes profondeurs (0–100 cm). Le critère de décision retenu correspondait à la consommation de la Réserve Facilement Utilisable (RFU) : une irrigation était lancée lorsque l'humidité du sol à la profondeur la plus explorée par les racines tombait en dessous du seuil, c'est-à-dire lorsque la quantité d'eau facilement disponible était quasi épuisée. La sonde capacitive fournissant des relevés continus, l'interprétation se faisait via une plateforme connectée, en surveillant la courbe de teneur en eau et en identifiant le moment où elle atteignait ce niveau plancher.

En cas de pluies significatives, les irrigations étaient suspendues le temps que le sol s'assèche à nouveau sous les seuils. L'ensemble des volumes d'eau apportés a été enregistré pour chaque traitement et chaque année.

Azote

Pour chaque campagne, une analyse de sol à l'entrée et à la sortie de l'hiver (reliquats nitrates) a été effectuée, et la dose totale d'azote à apporter pour atteindre l'objectif de rendement semencier a été calculée en tenant compte des fournitures du sol. Cette dose dite « normale » a ensuite été répartie entre l'automne et le printemps : on a apporté une fraction modérée à l'automne (~30 kg N/ha), puis le solde en fin d'hiver/début de reprise. Pour la modalité sur-fertilisation, un surplus de +40 kg N/ha a été ajouté, porté essentiellement sur l'apport d'automne (70 kg N/ha au lieu de 30). Toutes les autres modalités ont reçu la dose normale.

Entretien cultural

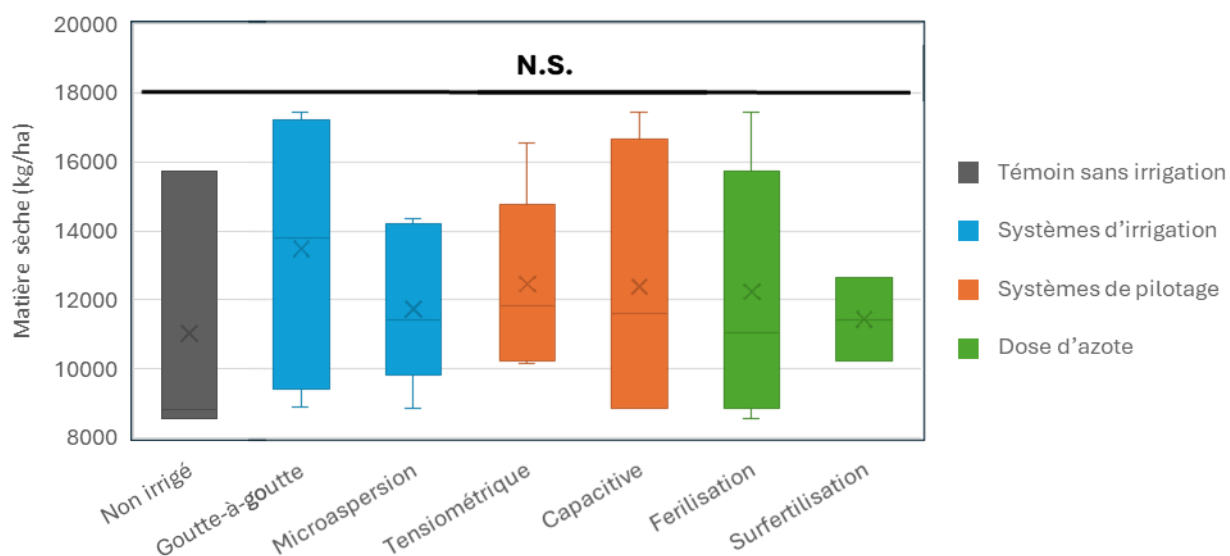
La protection phytosanitaire et l'entretien des parcelles ont été réalisés de façon uniforme sur l'ensemble de l'essai, afin de ne pas introduire de biais. Désherbages manuels et chimiques ont été réalisés selon les besoins. Des fongicides ont été appliqués préventivement contre les maladies foliaires (cercosporiose, oïdium) sur toutes les parcelles.

Récolte et mesures

À maturité (juillet de l'année N+1), les parcelles ont été récoltées individuellement. Un échantillon de graines par parcelle a été prélevé pour les analyses de qualité : la faculté germinative (FG) a été déterminée par un test de germination en laboratoire, ainsi que le poids de mille grains (PMG). De plus, la distribution des calibres de graines a été évaluée par tamisage (répartition % dans différentes classes de diamètre). Parallèlement, la biomasse végétative a été mesurée à maturité sur chaque modalité. Ces échantillons ont ensuite été broyés et analysés pour leur teneur en azote total, afin de calculer la quantité d'azote absorbée par les plantes (kg N/ha) à la fin du cycle, pour chaque traitement.

RESULTATS

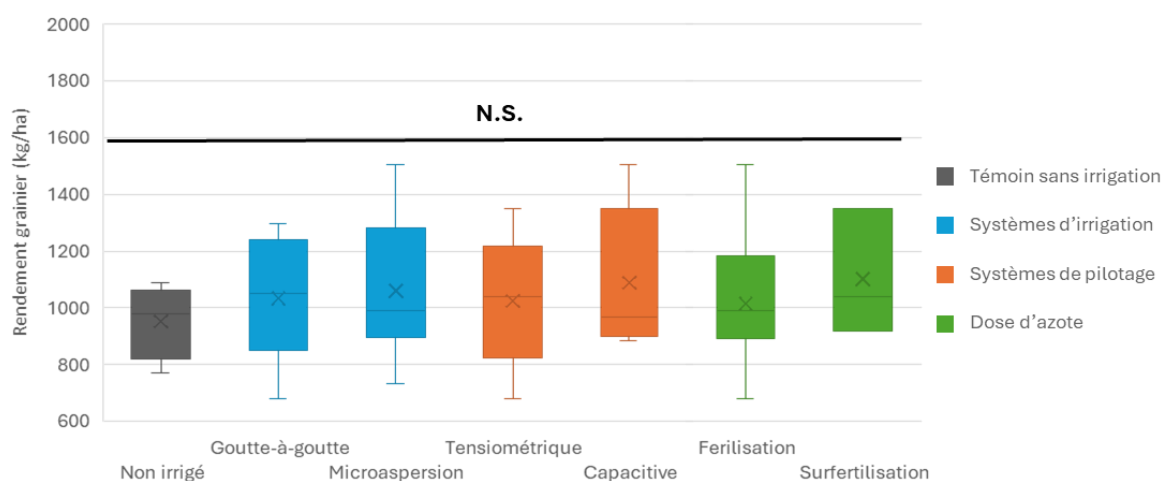
Matière sèche mesurée par modalité (2020 - 2023)



Source : LT

Graphique 1 – Graphique de la biomasse sèche à maturité(kg/ha) obtenus par traitement sur les campagnes 2020 à 2023.

Rendement grainier mesurée par modalité



Source : LT

Graphique 2 – Graphique des rendements en graines (kg/ha) obtenus par traitement sur les campagnes 2020 à 2023.

RESULTATS

La totalité des résultats sont exposés en annexe 1

MATIERE SECHE

La teneur en matière sèche (voir graphique 1) des graines a été relativement stable au cours des quatre années, sans tendance nette en fonction des traitements. Les moyennes entre les modalités présentent de faibles écarts, suggérant que la matière sèche est essentiellement déterminée par la variabilité naturelle ou des facteurs climatiques plutôt que par les pratiques culturales appliquées (irrigation, fertilisation).

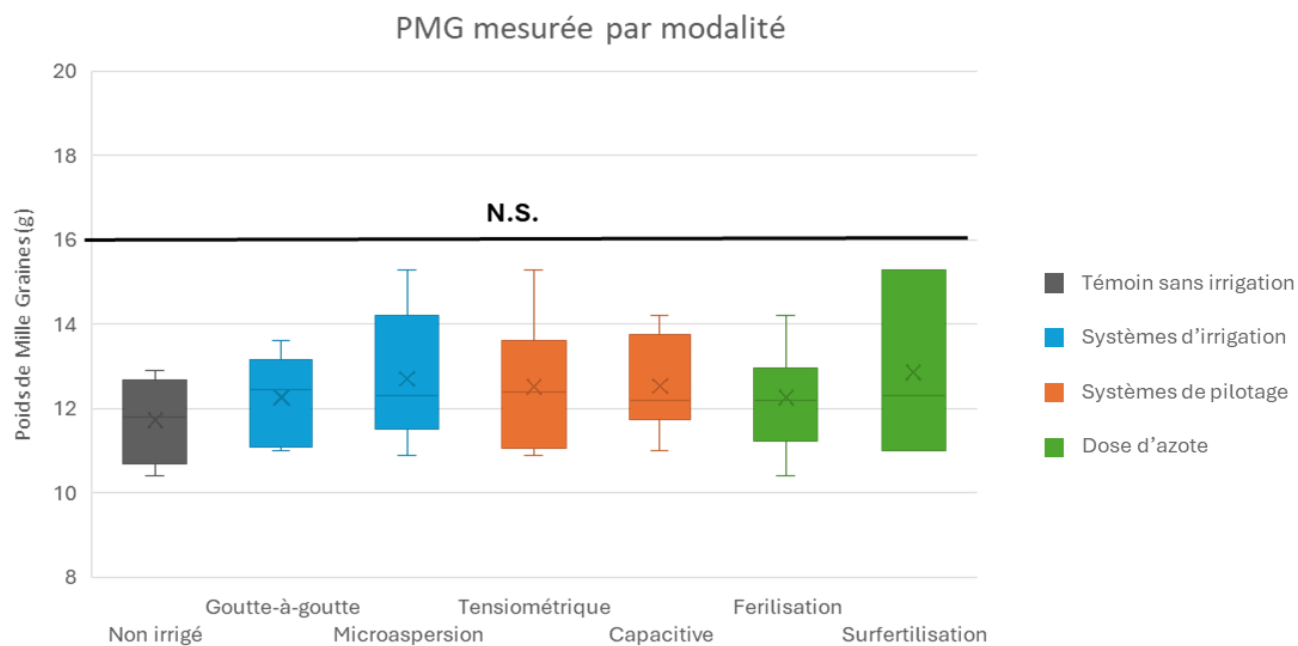
L'ANOVA unifactorielle n'a pas révélé d'effet significatif de l'irrigation (goutte-à-goutte vs microaspersion) sur la matière sèche. De même, l'ANOVA considérant uniquement le facteur pilotage (sonde capacitive vs tensiométrique) indique une absence d'effet significatif, tout comme l'ANOVA pour le facteur azote (dose normale vs sur-fertilisation).

Les analyses à deux facteurs (irrigation × pilotage, irrigation × azote, pilotage × azote) n'ont mis en évidence aucune interaction significative, et l'ANOVA à trois facteurs confirme l'absence d'effets principaux ou d'interactions significatives pour la matière sèche.

En conclusion, ces résultats montrent que ni l'apport d'irrigation, ni le mode de pilotage, ni le supplément azoté n'ont modifié la matière sèche des graines de manière statistiquement détectable. Autrement dit, la teneur en matière sèche ne semble pas être affecté par nos différents traitements expérimentaux appliqués dans ces essais.

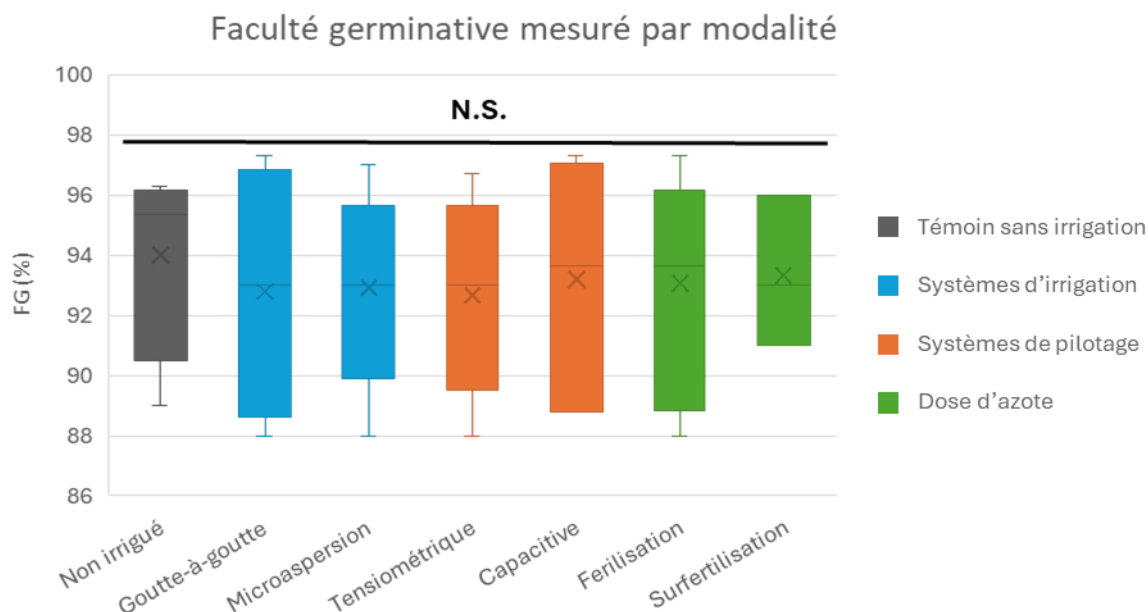
RENDEMENT GRAINIER

Le rendement grainier (voir graphique 2) a varié d'une année sur l'autre, mais les parcelles irriguées ont systématiquement eu tendance à produire plus de semences que le témoin non irrigué. En moyenne, les rendements ont été plus élevés sous irrigation (par goutte-à-goutte ou micro-aspersion) que sous le régime sec, tandis que les différences liées au type d'irrigation, au pilotage et à l'azote paraissent plus faibles. L'ANOVA unifactorielle montre que les traitements irrigués (goutte-à-goutte et aspersion) n'affichent pas des rendements supérieurs à ceux du témoin non irrigué ou entre les modes d'irrigation utilisé. De même, le facteur pilotage seul n'a pas d'effet significatif sur le rendement, et l'augmentation de la dose d'azote (sur-fertilisation) n'a pas non plus induit de gain de rendement significatif dans l'ANOVA unifactorielle. Les ANOVA bi- et trifactorielles ne montre aucune interaction significative.



Source : LT

Graphique 3 – Graphique des PMG (g) obtenus par modalités sur les campagnes 2020 à 2023



Source : LT

Graphique 4 – Graphique des faculté germinative (%) obtenus par traitement sur les campagnes 2020 à 2023.

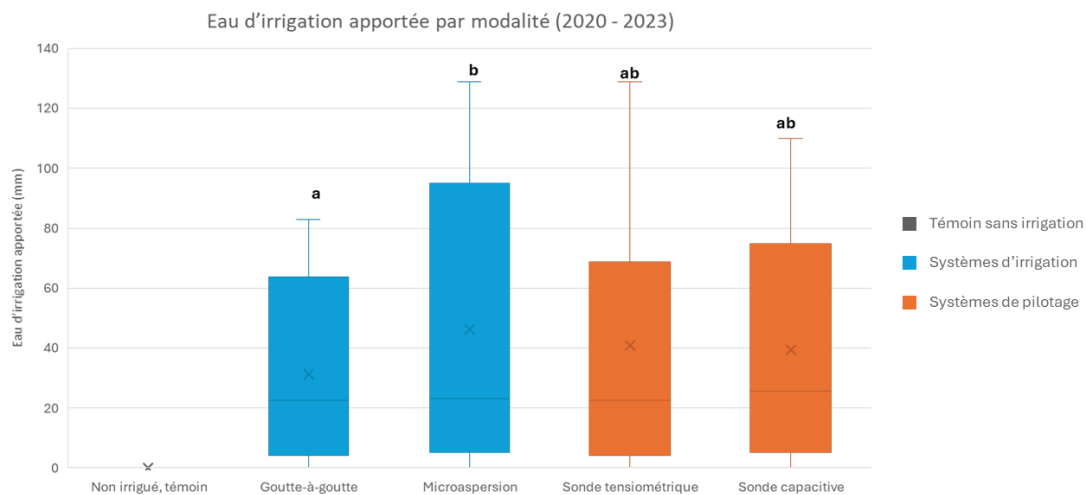
POIDS DE MILLE GRAINES – PMG

Pour le PMG (voir graphique 3), les variations sont restées modestes d'une année à l'autre, ainsi que d'une modalité à une autre. Les niveaux caractéristiques du PMG sont restés similaires à la moyenne espérée, avec une variation d'à peine quelques grammes entre les essais. L'ANOVA unifactorielle indique que ni l'irrigation, ni le pilotage de l'irrigation, ni l'apport en azote ne présentent d'influence significative sur le PMG. Les tests à deux facteurs (irrigation×pilotage, etc.) et l'ANOVA à trois facteurs confirment l'absence d'effets principaux ou d'interactions significatives.

Ces résultats indiquent que la taille moyenne des graines est restée stable, quelles que soient les modalités culturales testées. En d'autres termes, l'appoint d'eau supplémentaire et la forme de pilotage n'ont pas affecté la qualité des graines du point de vue du PMG, de même que la sur-fertilisation n'a exercé aucun impact observable sur la masse de mille graines.

FACULTE GERMINATIVE – FG

La faculté germinative (voir graphique 4) des graines a été très bonne et homogène entre les traitements. Aucun effet visuel majeur n'apparaît dans les moyennes de germination d'un lot à l'autre. L'ANOVA unifactorielle n'a mis en évidence aucun effet significatif de l'irrigation sur la germination. De même, ni le mode de pilotage, ni la dose d'azote ne modifient de façon statistiquement significative la faculté germinative. Les analyses bi- et trifactorielles confirment qu'aucun facteur étudié (irrigation, pilotage, azote), ni aucune interaction, ne porte sur la germination. Ces résultats confirment que la qualité germinative des graines produites est restée excellente et inchangée, quelles que soient les pratiques testées. Ni l'irrigation, ni l'outil de pilotage, ni la sur-fertilisation n'ont altéré la germination des graines dans les conditions de ces essais. La germination étant déjà élevée, l'absence d'effet indique que les traitements culturaux sont tous équivalents.



Source : LT

Graphique 5 – Graphique de l’eau d’irrigation apportée (mm)par modalités sur les campagnes 2020 à 2023.

Traitement	2020	2021	2022	2023	Moyenne	Significativité ANOVA au risque de 5 %
Bilan	–	102	165	144	139	N.S.
	–	–	–	150		
	–	114	–	–		
	–	–	178	144		
	–	115	–	–		
surfertilisation	–	128	146	138	137	N.S.

Source : LT

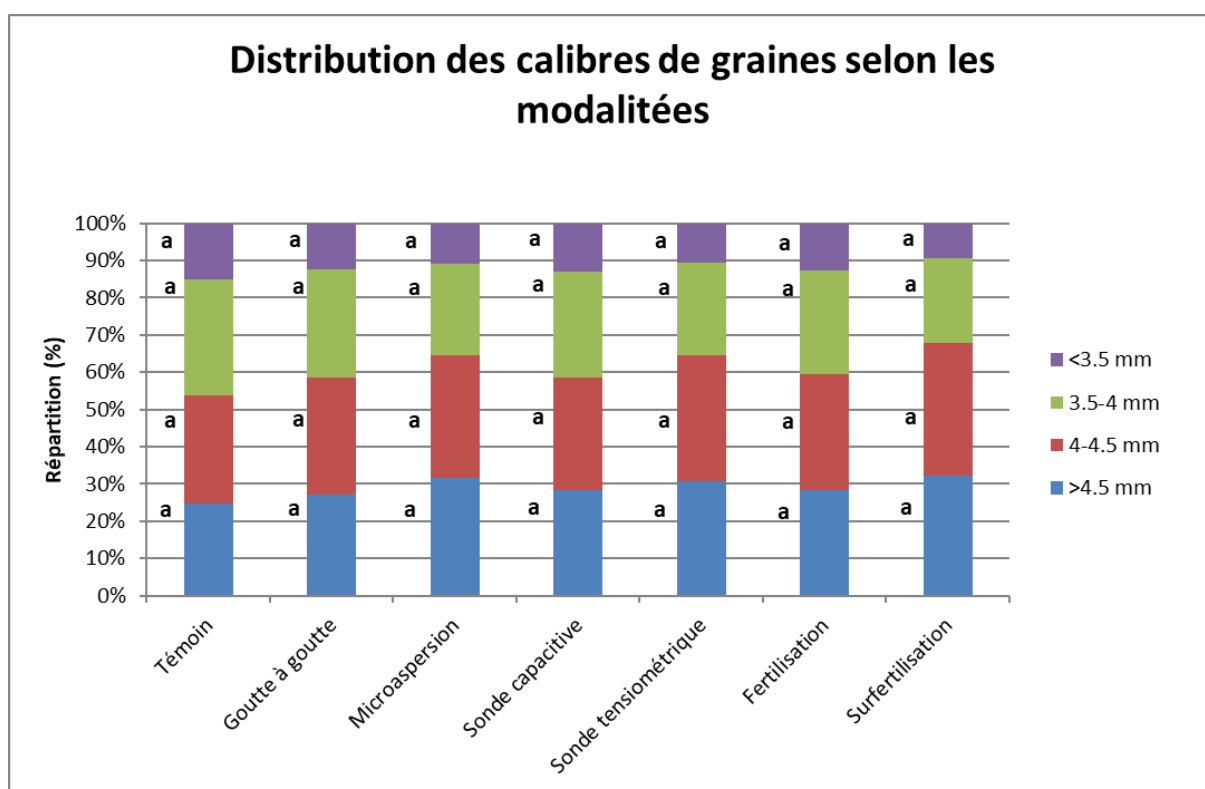
Tableau 2 – Tableaux des quantités totale d’azote absorbé par la plante à maturité (kg N/ha)obtenus par traitement sur les campagnes 2020 à 2023. Les cellules vides (–) indiquent que la modalité n’était pas testée cette année-là.

EAU D'IRRIGATION APPORTEE

Pour la quantité d'eau d'irrigation apporté (voir graphique 5), les analyses indiquent que sur les parcelles en micro-aspersion davantage d'eau a été apporté comparativement à , celles en goutte-à-goutte où la quantité apportée est moindre. De plus, la sonde capacitive entraîne un apport d'eau plus important comparé à la sonde tensiométrique. L'ANOVA unifactorielle démontre un effet significatif du mode d'irrigation sur le volume d'eau appliqué. Le goutte à goutte utilise significativement moins d'eau que la micro-aspersion. Le facteur pilotage ne montre pas d'effet significatif isolé. En ANOVA à deux facteurs, on observe une interaction irrigation×pilotage significative, ce qui indique que l'écart entre pilotages dépend de la technique d'irrigation utilisée.

QUANTITES TOTALES D'AZOTE ABSORBE

La surfertilisation azotée (voir tableau 2)n'a pas augmenté l'azote absorbé par la plante, au contraire : en 2022, la modalité surfertilisée (146 kg/ha) est inférieure à la modalité normale (178 kg/ha) en aspersion tensio. Ceci suggère que l'excès d'azote n'a pas été valorisé en production végétale supplémentaire (il a pu rester dans le sol en fin de cycle). En 2023, on a également un niveau un peu moindre en surfertilisé (138 vs 144 kg/ha).



Source : LT

Graphique 6 – Graphique de répartition (%) des graines par classe de calibre, pour chaque traitement en 2022-2023.

Modalité	% TAM >4,5R	% 4,5>TAM>4	% 4>TAM >3,5	% TAM <3,5
MA	38,811 a	29,836 a	23,651 b	7,702 b
GAG	29,180 b	30,782 a	29,108 a	10,931 a
Pr > F(syst irrig)	0,003	0,062	0,005	0,019
Significatif	Oui	Non	Oui	Oui
capacitive	33,308 a	29,079 b	27,379 a	10,234 a
tensio	34,683 a	31,539 a	25,379 a	8,399 a
Pr > F(outil pilotage)	0,611	0,000	0,233	0,151
Significatif	Non	Oui	Non	Non

Source : Coraline Ravenel

Tableau 3 – Tableau de répartition du calibre des graines pour chaque traitement en 2022

CALIBRES DES GRAINES

En moyenne pluriannuelle, les essais n'ont pas mis en évidence de différences significatives de calibre entre les systèmes d'irrigation, les outils de pilotage ou les niveaux de fertilisation (voir graphique 6).

Cependant, un focus sur l'année 2022 (voir tableau 3), marquée par un stress hydrique sévère, révèle une influence significative sur la taille des graines produits. Dans ce contexte climatique contraint la micro-aspersion (MA) génère une proportion plus élevée de graines de gros calibre. En effet 38,8 % des graines dépassent 4,5 mm contre 29,2 % en goutte-à-goutte. Parallèlement, la micro-aspersion produit moins de petites graines (<3,5 mm). La classe intermédiaire 3,5–4 mm est également significativement plus faible sous micro-aspersion que sous goutte à goutte, au profit des classes supérieures. Ces résultats indiquent que la micro-aspersion favorise un remplissage plus complet des graines, probablement en raison d'une humidité ambiante plus importante.

En revanche, aucune différence significative n'a été observée entre les outils de pilotage (tensiomètre vs capacitive) sur les différentes classes de calibre, à l'exception de la classe 4–4,5 mm où la sonde tensiométrique semble favoriser une légère augmentation. Cette différence isolée reste difficile à interpréter en l'absence d'effet sur les autres classes, et ne permet pas de conclure à un effet marqué du type de capteur. Globalement, ces résultats suggèrent que le système d'irrigation joue un rôle plus déterminant que l'outil de pilotage dans la structuration du calibre des semences.

DISCUSSION

Les résultats obtenus pendant ces quatre années d'expérimentation apportent plusieurs enseignements clés pour la conduite de la betterave potagère porte-graine, en particulier dans un contexte de ressources limitées. Globalement, l'objectif de « produire autant avec moins d'eau et sans excès d'engrais » semble atteignable, comme le montre le maintien du rendement sous goutte-à-goutte ou avec la dose normale d'azote.

Goutte-à-goutte vs aspersion

L'un des résultats majeurs est que le système de goutte-à-goutte a permis une économie d'eau importante (~32 % de volume en moins en moyenne) tout en maintenant un rendement semencier équivalent à celui obtenu par aspersion. Ce constat est d'une importance pratique considérable, dans un contexte où les besoins en eau se heurtent aux limites de disponibilité. Le goutte-à-goutte répond ainsi aux exigences de production en betterave semencière, comme cela a déjà été observé pour d'autres espèces porte-graine.

Dans notre essai, aucune augmentation significative du rendement n'a été observée en goutte-à-goutte par rapport à l'aspersion. Toutefois, le maintien du rendement avec une dose d'eau bien inférieure est en soi remarquable. Cela suggère que l'aspersion apportait un excès d'eau, susceptible d'être perdu (évaporation,,), sans bénéfice réel pour la culture, tandis que le goutte-à-goutte a fourni une juste quantité sans pertes. Dans un contexte de restriction sévère de l'eau, le goutte-à-goutte pourrait préserver la production.

Même si cela n'a pas été chiffré, ce système pourrait aussi limiter certaines maladies, en gardant le feuillage sec, on freine l'oïdium ou la cercosporiose. Un point de vigilance toutefois concerne la répartition de l'eau. Il est indispensable que chaque plante reçoive une quantité suffisante. Dans notre essai, l'espacement des gouteurs et des rangs était adapté. Mais une conception mal optimisée du réseau pourrait conduire à des zones sous-irriguées. La maintenance du système (risques de colmatage) doit aussi être assurée. En résumé, le goutte-à-goutte est recommandé pour économiser l'eau sans perte de rendement ou de qualité des semences.

PILOTAGE DE L'IRRIGATION

Les deux méthodes de pilotage de l'irrigation testées (tensiomètre et sonde capacitive) ont donné des résultats globalement semblables. Les parcelles pilotées au tensiomètre ont reçu des volumes d'eau similaires à celles pilotées à l'aide de sondes capacitives, et les rendements en graines sont restés équivalents. L'objectif de l'essai était justement de vérifier si un pilotage basé sur des sondes capacitives, plus modernes, pouvait égaler les performances d'un pilotage tensiométrique plus classique. Les résultats montrent que c'est bien le cas, ce qui ouvre la voie à une possible diffusion de cette solution chez les multiplicateurs.

Sur le plan pratique, ces deux outils présentent des profils d'utilisation très différents. Le tensiomètre, peu coûteux et techniquement simple, reste relativement peu utilisé dans les exploitations. Cela s'explique surtout par la contrainte de pose multiple (plusieurs sondes à différentes profondeurs), et la nécessité d'effectuer des relevés fréquents et d'interpréter les courbes

. Ce suivi régulier demande du temps et de la rigueur, ce qui peut freiner son adoption par les agriculteurs.

À l'inverse, la sonde capacitive, bien que plus onéreuse à l'achat, présente plusieurs avantages en matière de praticité. En effet une seule sonde bien placée suffit généralement pour une parcelle, et le système fonctionne de manière automatisée. Les données sont transmises à distance, en continu, avec une bonne précision et peu de maintenance. Cette simplicité d'usage peut en faire une solution attractive.

En conclusion, les deux systèmes sont efficaces pour piloter l'irrigation en betterave porte-graine, mais leur accessibilité et leur facilité d'usage diffèrent fortement. Le choix dépendra avant tout des préférences de l'utilisateur, de son organisation de travail, et du niveau d'équipement souhaité, plutôt que de différences agronomiques de performance.

DOSE D'AZOTE

La dose d'azote calculée par le bilan prévisionnel est suffisante pour maximiser le rendement de la betterave porte-graine. Ajouter davantage ne fait que gaspiller l'engrais. Nos deux années de tests avec +40 unités d'azote n'ont montré aucun gain sur la biomasse, le rendement ou la qualité. Ajouter davantage n'est pas valorisé et représente une source de pollution en nitrate à posteriori.

Ces essais portent donc un message clair pour les agriculteurs. Il est inutile de « surdoser par sécurité pour être sûr ». Cela n'améliore pas la production et peut même être contre-productif : prolongation de la végétation au détriment de la fructification, sensibilité accrue aux maladies.

Le surplus d'azote n'ayant pas été absorbé, il a probablement été résiduel dans le sol et exposé au lessivage automnal et hivernal. Il faut donc respecter la dose optimale est préférable pour des raisons agronomiques et environnementales.

PERSPECTIVES

PERSPECTIVES TECHNIQUES

Sur le plan technique, plusieurs pistes d'amélioration apparaissent pour optimiser l'irrigation et la fertilisation azotée en betterave potagère porte-graine. Pour commencer, le réseau d'irrigation pourrait bénéficier d'améliorations matérielles. Il serait notamment possible d'envisager d'aller plus loin en testant le goutte-à-goutte enterré. L'enfouissement des tubes permettrait de limiter davantage les pertes par évaporation et de maintenir le sol humide directement au niveau racinaire, avec à la clé des économies d'eau supplémentaires (MON IRRIGATION, 2025). Cette technique aurait en outre l'avantage de limiter la pousse d'adventices entre les rangs (moins de surface arrosée) et de protéger le matériel d'irrigation contre les agressions extérieures. En contrepartie, elle nécessiterait un entretien rigoureux (risque de colmatage, intrusions racinaires) et une conception soignée du réseau. De manière générale, quel que soit le dispositif utilisé, il faudra veiller à une bonne uniformité de la distribution en eau, en effet, le goutte-à-goutte requiert un espacement des goutteurs adapté et un contrôle régulier du débit afin que chaque plante reçoive sa juste part d'eau. Une amélioration technique simple consisterait à installer des compteurs ou débitmètres par sous-parcelle, afin de suivre précisément les volumes appliqués et détecter d'éventuelles hétérogénéités.

L'automatisation constitue également une perspective prometteuse. Il serait envisageable de mettre en place un pilotage automatique de l'irrigation, où les données transmises par les sondes commanderaient directement l'ouverture des vannes. Un tel système intelligent réagirait en temps réel aux besoins de la culture, et pourrait être couplé aux données météorologiques. Le couplage aux données météorologiques consisterait à intégrer les prévisions de pluie et l'évapotranspiration estimée. Par exemple, suspendre une irrigation si une précipitation significative est annoncée, ou au contraire anticiper une vague de chaleur en augmentant provisoirement la fréquence d'arrosage. Ce type d'outil combiné (sondes + météo) permettrait d'optimiser encore les apports, en évitant aussi bien les excès que les manques.

PERSPECTIVES AGRONOMIQUES ET SCIENTIFIQUES

Du côté agronomique et scientifique, notre étude soulève des questions qui méritent d'être explorées par la recherche. La première concerne la relation entre l'état hydrique de la plante ou du sol et le calibre des graines formées. Nos résultats ont laissé supposer que, dans un contexte de stress hydrique marqué (par exemple durant l'été 2022), le type d'irrigation influence la taille des semences obtenues. La micro-aspiration a généré une proportion plus importante de gros grains qu'un goutte-à-goutte économe en eau. On peut supposer qu'une humidité de l'air et du couvert végétal plus élevée, sous aspiration, ait favorisé un remplissage plus complet des graines. Ce point mériterait d'être approfondi par des essais spécifiques, en testant différents régimes hydriques (allant d'un apport non limitant à une restriction contrôlée) et en analysant leurs effets sur le remplissage des graines, le poids de mille grains et la répartition des calibres. Mieux cerner dans quelle mesure un déficit hydrique modéré impacte le calibre ou le poids des semences aiderait à définir les marges de manœuvre. Jusqu'où peut-on aller dans la réduction des apports sans altérer la qualité semencière ?

Par ailleurs, on pourrait analyser plus finement l'état hydrique de la culture par d'autres indicateurs (potentiel hydrique foliaire, imagerie infrarouge pour la température de couvert) afin de corréliser ces mesures au développement des semences. Cela permettrait de valider ou non l'usage de capteurs indirects (caméras, drones) pour repérer des zones en début de stress avant qu'il n'affecte la production.

En ce qui concerne la fertilisation azotée, un suivi du devenir de l'azote non absorbé serait instructif. Nos données indiquent qu'un excès d'azote n'est pas valorisé par la plante et peut persister dans le sol jusqu'à maturité. Des analyses de sol post-récolte, permettraient de quantifier ces reliquats et d'estimer le risque de lessivage à l'automne. Sur un plan plus fondamental, il serait utile d'étudier l'effet d'une nutrition azotée plus fine sur la physiologie de la betterave porte-graine. Par exemple, vérifier si une légère restriction en azote à certaines phases pourrait favoriser la mise à fleurs et la fructification (car un excès de N peut prolonger la phase végétative au détriment de la production de graines).

Enfin, il conviendrait d'anticiper les effets à long terme et les stress cumulés, notamment si l'on se projette sur des rotations culturales prolongées. Par exemple, la répétition annuelle d'une irrigation localisée pourrait-elle modifier la structure du sol ou la distribution racinaire ? Un suivi à long terme permettrait de détecter une éventuelle accumulation de sels minéraux dans la zone des goutteurs, ou un tassement différentiel du sol lié à la présence de zones sèches entre les bandes irriguées.

PERSPECTIVES ECONOMIQUES ET ENVIRONNEMENTALES

Au-delà de ces aspects techniques, il faut tenir compte des retombées économiques et environnementales de telles innovations. Sur le plan économique, un bilan coût/bénéfice des solutions testées doit être établi. Le passage à un système d'irrigation goutte-à-goutte représente un investissement initial non négligeable (achat et mise en place du réseau de tuyaux, filtration, entretien). Cependant, cet investissement peut être amorti grâce aux économies d'eau réalisées et à la sécurisation de la production en période de sécheresse ou de restrictions. Dans notre essai, la réduction d'environ un tiers du volume d'eau utilisé n'a pas altéré le rendement, ce qui implique une diminution des charges variables (pompage, énergie) pour une quantité de semences produites équivalente. Si l'eau devient une ressource de plus en plus soumise à une tarification volumétrique ou à une limitation, le goutte-à-goutte permettrait de produire là où une aspersion classique aurait été fortement limitée pour respecter les quotas. À cet égard, la technologie d'irrigation efficiente agit comme une assurance rendement face aux aléas climatiques et réglementaires.

Du côté des outils de pilotage, le choix entre tensiomètre et sonde capacitive entraîne des implications économiques différentes. Il est donc nécessaire d'évaluer le retour sur investissement de ces sondes de nouvelle génération. Si leur utilisation permet d'éviter des stress hydriques préjudiciables au rendement ou d'ajuster avec précision les volumes d'eau au point de gagner quelques pourcents en production ou en économies, alors le gain économique à moyen terme peut compenser le coût initial. Du côté agriculteur, la gestion de la main-d'œuvre compte également. Un capteur connecté qui signale automatiquement un besoin peut permettre d'éviter des déplacements quotidiens aux champs et de libérer du temps pour d'autres activités, ce qui représente un gain économique indirect non négligeable. À plus long terme, si ces dispositifs permettent de préserver le potentiel du sol (moins d'épuisement hydrique, moins de besoins en irrigation d'appoint en fin de cycle), elles contribuent à la pérennité économique de l'itinéraire technique.

Sur le plan environnemental, la réduction de la demande en eau d'irrigation diminue la pression sur les nappes phréatiques et les cours d'eau en période estivale. Dans les bassins déjà soumis à des pressions hydriques, généraliser une irrigation localisée efficace contribuerait à un meilleur équilibre entre les usages agricoles et la préservation des écosystèmes aquatiques.

Concernant la fertilisation, l'arrêt de la surdose d'azote présente un double bénéfice : économique (économies d'engrais, pas de dépenses inutiles) et environnemental. Éviter l'apport d'azote excédentaire non absorbé par la culture permet de limiter les reliquats dans le sol et donc de réduire le risque de pollution des eaux par lessivage des nitrates à l'automne. Cette gestion plus sobre en intrants s'inscrit pleinement dans les objectifs d'une agriculture durable, en cohérence avec les réglementations en vigueur (directives sur la qualité de l'eau, etc.).

CONCLUSION

Ce travail de recherche appliquée, mené sur 4 ans (2020–2023) à la station FNAMS de Brain-sur-l'Authion, a permis de réaliser plusieurs conclusions. Le goutte-à-goutte est bien plus économe en eau que l'aspersion, pour un rendement et une qualité équivalente. Les deux outils de pilotage (tensiomètre et sonde capacitive) sont efficaces, le choix dépendra des contraintes et préférences de l'utilisateur. La dose d'azote actuelle est suffisante ; la sur-fertilisation n'apporte aucun gain.

Ainsi, il est possible d'allier performance agronomique et durabilité. Ces résultats encouragent l'adoption de technologies de précision (irrigation localisée, capteurs, pilotage intelligent) pour faire face aux défis agricoles actuels, en préservant les ressources et en limitant l'impact environnemental.

ANNEXES

ANNEXE I : RESULTATS BRUTS POUR CHAQUE TRAITEMENT DE 2020 A 2023

Les cellules vides (–) indiquent que la modalité n'était pas testée cette année-là

Traitement	Année	Matière sèche (kg/ha)	Rendement grainier (kg/ha)	PMG (g)	FG (%)	Eau apportée (mm)	Quantité N absorbée plante entière à maturité (kg/ha)	Calibre>4,5	Calibre 4 - 4,5	Calibre 3,5 - 4	Calibre < 3,5
Non irrigué, témoin	2020	(–)	769,7	10,4	96,3	0	(–)	(–)	(–)	(–)	(–)
	2021	8562	989	12	95,7	0	102	(–)	(–)	(–)	(–)
	2022	15724	1088	12,9	95	0	165	26	26	31,3	12,6
	2023	8838	966	11,6	89	0	144	22,5	31,1	29,5	16,9
Goutte à goutte + Sonde tensiométrique + fertilisation	2020	(–)	680,8	11,1	96,7	24	(–)	(–)	(–)	(–)	(–)
	2022	16563	1473	13,4	94	75	209	29,6	32,4	27,9	10
	2023	11040	1073	12,5	88	17	150	27,3	31,7	27,9	13,1
Goutte à goutte + Sonde capacitive + fertilisation	2021	8883	1029	11	97,3	30	114	(–)	(–)	(–)	(–)
	2022	17440	1297	13,6	93	83	(–)	28,7	29,6	30,2	11,5
	2023	(–)	1029	12,4	89,5	17	(–)	23	31,5	30,8	14,7
Aspersion + Sonde tensiométrique + fertilisation	2020	(–)	731,1	10,9	95,3	25	(–)	(–)	(–)	(–)	(–)
	2022	14160	1213	14,7	93	128	178	39	39	22,7	6,8
	2023	10150	989	12,4	88	21	144	27,1	29,5	27,7	15,7
Aspersion + Sonde capacitive + fertilisation	2021	8862	885	12	94,3	50	115	(–)	(–)	(–)	(–)
	2022	14355	1506	14,2	97	110	(–)	37,2	29,4	24,5	9
	2023	(–)	905	12	88,8	21	(–)	24,8	30	29,1	16,2
Aspersion + Sonde tensiométrique + surfertilisation	2021	8963	918	11	96	50	128	(–)	(–)	(–)	(–)
	2022	12640	1351	15,3	93	129	146	45,5	45,8	19,6	5,3
	2023	10239	1038	12,3	91	21	138	24,1	31,2	29,8	14,9

BIBLIOGRAPHIE

1. **FNAMS**. Nos missions. In: FNAMS [en ligne]. Disponible sur : <https://www.fnams.fr/presentation/nos-missions-2> (consulté le 23 juin 2025).
2. **FNAMS**. L'équipe et les stations FNAMS. In: FNAMS [en ligne]. Disponible sur : <https://www.fnams.fr/presentation/organisation/equipe-fnams> (consulté le 23 juin 2025).
3. **FNAMS (Fédération Nationale des Agriculteurs Multiplicateurs de Semences)**. *Fiche culturale : La betterave potagère porte-graine*. Paris : FNAMS, 2017. (Fiches culturales FNAMS).
4. **INRAE (Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement)**. *Synthèse des impacts du changement climatique sur l'agriculture française* [en ligne]. Paris : INRAE, 2022, 72 p. Disponible sur : <https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/synthese-72-pages.pdf>.
5. **SEMAE (Interprofession des semences et plants)**. *Note technique : Réglementation azote (5e programme d'actions) – Bassin de production Nord-Est* [en ligne]. Paris : SEMAE, 2015, 8 p. (Note technique n° 03). Disponible sur : <https://www.semae.fr/uploads/2015-03-NTTE03azote-NE-8p.pdf>.
6. **Préfète de la région Centre-Val de Loire**. *Mise en œuvre du 7e programme d'actions nitrates en région Centre-Val de Loire* [en ligne]. Orléans : Préfecture de la région Centre-Val de Loire, 2024, 8 p. Disponible sur : <https://draaf.centre-val-de-loire.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/nitrate2-2-2.pdf>.
7. **Wittling C. et Ruelle P. (coord.)**. *Guide pratique de l'irrigation* (4e éd.). Versailles : Éditions Quæ, 2022, 352 p. DOI : 10.35690/978-2-7592-3246-8.
8. **FNAMS**. *Dossier technique : irrigation et fertilisation des cultures porte-graine*. Paris : FNAMS, 2023.
9. **WEENAT**. *Les sondes d'humidité du sol Weenat : des outils de précision pour une gestion optimisée de l'irrigation* [en ligne]. Nantes : Weenat, s.d. Disponible sur : <https://weenat.com/sondes-humidite-sol/>.
10. **ARVALIS – Institut du végétal**. *Enquête goutte-à-goutte : des avantages mais encore bien des freins*. In: ARVALIS [en ligne]. Disponible sur : https://www.arvalis.fr/sites/default/files/imported_files/400_130308_9767258276262.pdf (consulté le 23 juin 2025).
11. **Chambres d'agriculture**. *Comparaison de systèmes d'irrigation sur la culture de la pomme de terre*. In: OPERA connaissances [en ligne].

Disponible sur : https://opera-connaissances.chambres-agriculture.fr/doc_num.php?explnum_id=177089 (consulté le 23 juin 2025).

12. **Tscheiller Romain.** Le goutte-à-goutte en grandes cultures : une technique d'avenir? In: ARVALIS [en ligne]. Disponible sur : <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/le-goutte-goutte-peut-il-trouver-sa-place-en-grandes-cultures> (consulté le 23 juin 2025).
13. **Challenge Agriculture.** Qu'est-ce que la tensiométrie? In: Challenge Agriculture [en ligne]. Disponible sur : <https://www.challenge-agriculture.fr/tensiometrie/explication-tensiometrie/#:~:text=La%20tensiom%C3%A9trie%20est%20une%20technique,sol%20pour%20l'irriguer%20efficacement.> (consulté le 23 juin 2025).
14. **MON IRRIGATION.** Le principe du goutte-à-goutte enterré [en ligne]. : Mon Irrigation, 2025. Disponible sur : <https://www.mon-irrigation.com/blog/post/le-principe-du-goutte-a-goutte-enterre/> (consulté le 23 juin 2025).

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Photo d'asperseur au sein de parcelles de betteraves	3
Figure 2 : Photo de deux sonde tensiométrique posé à 60 cm de profondeurs (à gauche) et 30 cm de profondeur (à droite)	4
Figure 3 : Photo d'une sonde capacitive légendé.....	4
Figure 4 : Schéma du cycle biologique de la betterave potagère porte graines...	6
Figure 5 : Plan d'une parcelle élémentaire en micro-aspersion.....	7
Figure 6 : Plan d'une parcelle élémentaire en goutte à goutte de surface	7

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Résumé des modalités.....	6
Tableau 2 : Tableaux des quantités totale d'azote absorbé par la plante à maturité (kg N/ha)obtenus par traitement sur les campagnes 2020 à 2023. Les cellules vides (–) indiquent que la modalité n'était pas testée cette année-là.....	11
Tableau 3 : Tableau de répartition du calibre des graines pour chaque traitement en 2022	12

TABLE DES GRAPHIQUES

Graphique 1 : Graphique de la biomasse sèche à maturité(kg/ha) obtenus par traitement sur les campagnes 2020 à 2023.....	9
Graphique 2 : Graphique des rendements en graines (kg/ha) obtenus par traitement sur les campagnes 2020 à 2023.....	9
Graphique 3 : Graphique des PMG (g) obtenus par modalités sur les campagnes 2020 à 2023.	10
Graphique 4 : Graphique des faculté germinative (%)obtenus par traitement sur les campagnes 2020 à 2023.....	10
Graphique 5 : Graphique de l'eau d'irrigation apportée (mm)par modalités sur les campagnes 2020 à 2023	11
Graphique 6 : Graphique de répartition (%) des graines par classe de calibre, pour chaque traitement en 2022-2023.....	12

LEXIQUE

Porte-graine : Plante cultivée spécifiquement pour produire des graines destinées à la reproduction

Bilan hydrique : Méthode d'estimation de l'équilibre de l'eau dans le sol, basée sur le calcul des entrées (précipitations, irrigation) et des sorties (évapotranspiration, drainage) pour déterminer l'eau réellement disponible pour la plante.

Stress hydrique : Situation dans laquelle l'eau disponible pour une plante est inférieure à ses besoins physiologiques.

Bilan prévisionnel d'azote : Méthode de calcul de la dose totale d'azote à apporter à une culture.

Bisannuelle : Se dit d'une plante dont le cycle de vie s'étale sur deux années consécutives. La première année en phase végétative, la seconde en floraison et en production de graines.

Aspersion : Technique d'irrigation qui simule artificiellement la pluie par la pulvérisation d'eau sous pression via des asperseurs, afin d'arroser les cultures de façon homogène.

Goutte-à-goutte : Système d'irrigation distribuant l'eau lentement et localement, goutte par goutte, directement au pied des plantes, au niveau des racines.

Lessivage : Phénomène d'entraînement des nutriments solubles vers les couches profondes du sol par l'eau d'infiltration (pluie ou irrigation), les rendant inaccessibles aux plantes et contribuant à la pollution des nappes phréatiques.

Montaison : Stade de développement d'une plante où la tige florale s'allonge rapidement pour amorcer la floraison et la formation des graines.

Écimage : Pratique agricole consistant à couper l'extrémité supérieure des plantes afin de limiter leur hauteur et de favoriser le développement latéral.

RESUME

Réponse à l'eau et irrigation (système et pilotage) en production de semences de betterave potagère.

La betterave potagère porte-graine est une culture semencière à forte valeur ajoutée, mais caractérisée par des besoins élevés en eau et en azote. Dans un contexte marqué par la raréfaction des ressources hydriques et un encadrement réglementaire plus strict des apports azotés, ce stage a eu pour objectif d'identifier des leviers d'amélioration pour une gestion plus efficiente de l'irrigation et de la fertilisation azotée de cette culture. Pour cela, un dispositif expérimental pluriannuel, conduit de 2020 à 2023 à la station FNAMS de Brain-sur-l'Authion, a permis d'évaluer :

- deux systèmes d'irrigation (goutte-à-goutte de surface et micro-asperersion),
- deux modes de pilotage de l'irrigation (sondes tensiométriques et sondes capacitatives),
- deux niveaux de fertilisation azotée (dose préconisée par le bilan prévisionnel et sur-fertilisation de +40 kg N/ha).

L'étude a évalué l'impact de ces facteurs sur plusieurs indicateurs : rendement en semences, qualité des graines (taux de germination, poids de mille grains, répartition des calibres), consommation d'eau et absorption d'azote par les plantes. Les résultats ont mis en évidence que le goutte-à-goutte permet une économie d'eau significative par rapport à l'aspersion, sans effet négatif sur le rendement ni la qualité des semences. Les deux outils de pilotage ont conduit à des apports d'eau similaires, avec des performances agronomiques comparables. Enfin, la sur-fertilisation azotée ne s'est traduite par aucun gain de rendement ou de biomasse, confirmant la pertinence de la dose estimée par la méthode du bilan prévisionnel.

En définitive, l'expérimentation montre qu'il est possible de préserver la performance de la culture tout en réduisant les intrants, à condition de s'appuyer sur des techniques d'irrigation efficientes et une fertilisation raisonnée.

Mots-clefs : Betterave potagère porte-graine, irrigation goutte-à-goutte, aspersion, sonde tensiométrique, sonde capacitive, fertilisation azotée, rendement semencier, qualité des semences.

ABSTRACT

Water management and irrigation strategies in table beet seed production

Seed production of table beet is a high-value cropping system that demands precise management of both water and nitrogen inputs. In response to growing concerns over water scarcity and increasingly stringent nitrogen regulations, this internship project focused on optimizing irrigation and fertilization strategies for table beet seed crops. A four-year field experiment (2020–2023) was carried out at the FNAMS experimental station in Brain-sur-l'Authion (France). The study compared:

- two irrigation systems: surface drip and micro-sprinkler,
- two irrigation scheduling methods: tensiometric sensors and capacitive soil moisture sensors,
- two nitrogen fertilization levels: a recommended rate based on nitrogen budgeting and an over-fertilized treatment (+40 kg N/ha).

The trial assessed the impact of these variables on seed yield, seed quality (germination rate, thousand-seed weight, size distribution), irrigation water use, and nitrogen uptake by plants. Results showed that drip irrigation significantly reduced water use compared to micro-sprinkling, without compromising seed yield or quality. Both irrigation scheduling methods performed similarly in terms of water application and agronomic outcomes. Furthermore, over-fertilization with nitrogen did not improve seed yield or biomass, validating the effectiveness of the standard nitrogen budgeting approach.

In conclusion, equivalent seed production can be achieved using less water and without additional nitrogen, by combining efficient irrigation systems with well-calibrated nutrient management. This report outlines the study context, experimental design, major findings, and their agronomic and environmental significance.

Key words : Table beet seed crop, drip irrigation, sprinkler, tensiometer, capacitive probe, nitrogen fertilization, seed yield, seed quality