

Fertilisation et sensibilité des cultures de laitue et de tomate aux bioagresseurs

Raynal C.¹, Julhia L.², Nicot P.³

¹ Ctifl, Centre de Lanxade, 28 route des Nebouts, 24130 Prignonrieux

² Ctifl, ENSAT, avenue de l'Agrobiopole, BP 32607 Auzeville - Tolosane, 31326 Castanet -Tolosan

³ INRA, PV Domaine Saint Maurice, 67 allée des Chênes CS 60094, 84143 Montfavet Cedex

Correspondance : raynal@ctifl.fr

Résumé

Les producteurs de légumes sont confrontés à de nouveaux défis avec la réduction de l'usage des produits phytosanitaires. Limiter le recours aux moyens de lutte chimique conduit à revisiter les pratiques et à mettre en œuvre des stratégies globales à moindre risque phytosanitaire. La fertilisation est examinée dans son action sur la santé des plantes et comme levier dans la gestion des bioagresseurs. L'étude porte sur deux cultures légumières majeures en France, en termes de surfaces, la laitue et la tomate, dans leurs différents modes de production (sous abri en sol ou plein champ et sous abri ou hors sol, respectivement).

L'azote expose la laitue à *Sclerotinia spp.* et aux pucerons, en particulier. Les résultats, obtenus dans des conditions proches de la production, montrent qu'il est possible de concilier protection des plantes et production économique via une gestion raisonnée des fertilisations azotées qui passe par le fractionnement et la prise en compte des fournitures du sol. Concernant la tomate, les niveaux bas d'azote tendent à accroître la sensibilité à *Botrytis cinerea* et à réduire les attaques d'oïdium. L'application de la méthode de raisonnement des apports azotés à la tomate en culture sous abri, PILazo®, permet de réduire significativement les quantités d'azote en référence aux pratiques courantes (30% minimum) sans exposer les cultures au Botrytis et en maintenant le niveau de rendement. D'autre part, en conduite hors sol, la baisse et la modulation des concentrations en azote des solutions nutritives au cours du cycle cultural sont validées en référence aux pratiques courantes. Ces compositions sont suffisantes pour permettre l'expression du potentiel de production et ne sensibilisent pas les cultures aux bioagresseurs. Ces acquis vont pouvoir être mis à profit dans la mise en œuvre de stratégies de production à moindre risque sanitaire, associant la gestion raisonnée de l'azote, la protection biologique, le choix variétal.

Mots-clés : laitue, tomate, *Sclerotinia spp.*, *Botrytis cinerea*, *Oïdium neolycopersici*, puceron, santé des plantes, azote, fertilisation raisonnée, protection biologique

Abstract: Lettuce and tomato crops' fertilization and susceptibility to pests and pathogens

Vegetable growers are facing new challenges with the shrinking number of authorised phytopharmaceuticals. Limiting the use of chemical control makes it necessary to rethink common practices and to implement overall strategies that reduce the risks for plant health. Fertilisation is examined for its effect on plant health, and also as a lever in pest and pathogen management. This study focuses on two major vegetable crops in France in terms of acreage, i.e. lettuce and tomato, in the various production systems (protected crops in soil or field crops, and protected or soilless crops, respectively). Nitrogen makes lettuce vulnerable to *Sclerotinia spp.* and aphids, in particular. Results obtained under conditions close to commercial cropping practices showed that it is possible to reconcile crop protection and economic viability, using integrated N fertiliser management, which supposes splitting the inputs and taking into account soil reserves.

Regarding tomato, low nitrogen levels tend to increase susceptibility to *Botrytis cinerea*, while reducing powdery mildew attacks. PILazo®, the tool for integrated N supply management in protected tomato crops, made it possible to significantly reduce (by at least 30%) nitrogen inputs compared to current practices, without exposing the crop to *Botrytis* or compromising yield. Furthermore, in soilless crops, lowering and adjusting N concentrations in the nutrient solutions during the cropping cycle proved to be

a valid technique compared to common practices. Those N levels were sufficient for the expression of the production potential and did not increase the crops susceptibility to pests and pathogens. The above results will be used in the implementation of production strategies that minimise risks for plant health, combining integrated nitrogen management, biological control, and the choice of the variety.

Keywords: lettuce, tomato, *Sclerotinia spp.*, *Botrytis cinerea*, *Oïdium neolycopersici*, aphid, plant health, nitrogen, integrated fertiliser management, biological control

Introduction

Les mesures associées au Grenelle de l'environnement viennent appuyer les actions en faveur de la santé humaine et de la protection de l'environnement à travers une réglementation phytosanitaire renforcée. La protection chimique des cultures est remise en cause. De nouvelles voies de production doivent être étudiées pour progresser vers des systèmes de culture moins dépendants des traitements chimiques.

L'utilisation de la fertilisation comme levier dans la gestion des bioagresseurs représente une piste technique quasiment inexplorée dans un but opérationnel. Le projet a consisté à étudier les régimes de fertilisation favorisant la santé des plantes et renforçant leur résistance vis-à-vis des bioagresseurs. Les espèces support de cette étude sont la laitue et la tomate, cultures majeures en France en termes de surfaces (11 925 ha et 2 341 ha respectivement-Source Agreste, 2012 et FAM, 2011). Celles-ci sont particulièrement exposées aux risques de pertes d'efficacité de la protection chimique ou de dépassements des limites maximales de résidus.

Le projet a été mené en complémentarité du projet Fertileg piloté par l'INRA (Projet porté par P.Nicot, INRA PV Avignon) et coordonné au sein du GIS PIClég. Il s'appuie par ailleurs sur un travail en réseau avec un ensemble de partenaires aux niveaux national et régional : Ctifl (24, 44, 30), Aprel (84), Serail (69), LCA/Cvetmo (45), Caté (29), Fredon (62), CDDM/Arelpal (44) et Chambres d'agriculture (13, 84 et 47).

Ce partenariat scientifique et technique a conduit à établir les bases de la relation azote-bioagresseurs en conditions contrôlées de laboratoire pour orienter les expérimentations et évaluer l'effet de la fertilisation en conditions de culture puis tester des stratégies de production intégrée incluant des fertilisations à moindre risque sanitaire. La complémentarité des projets a fait intervenir des chercheurs, ingénieurs, conseillers du développement agricole avec une forte synergie d'actions autour d'un même sujet. Le projet en question a été structuré pour répondre aux objectifs consistant à évaluer l'effet de la fertilisation azotée sur la sensibilité des plantes aux bioagresseurs en conditions de culture et à intégrer les fertilisations efficaces en termes de protection des plantes dans des stratégies globales de production limitant l'usage des produits chimiques.

L'étude s'appuie sur la littérature scientifique internationale et les travaux menés à l'INRA pour caractériser précisément l'impact de la nutrition des végétaux sur leur sensibilité aux bioagresseurs en conditions contrôlées de laboratoire.

Les résultats sont présentés et discutés par espèce en ciblant les différents ravageurs et maladies à risques pour les cultures concernées et en faisant le lien avec les références acquises par le partenaire scientifique.

L'élaboration d'une base de données conçue pour les besoins de l'étude a permis de collecter les résultats issus de l'ensemble des essais avant traitement statistique au moyen du logiciel R version 3.0.1, notamment. Cette étape a été conduite avec le soutien méthodologique du laboratoire de bio-statistique de l'ENSA Toulouse.

1. Fertilisation azotée, production végétale et sensibilité des cultures de laitue aux bioagresseurs

La synthèse des travaux repose sur 28 essais répartis sur le territoire dans les zones représentatives de la production française.

Une fertilisation azotée raisonnée, associant le fractionnement et la mesure des reliquats azotés avant chaque apport pour ajuster les doses d'azote au niveau de satisfaction des besoins, est comparée à la pratique courante du producteur (un seul apport à la plantation). Au-delà de ces deux modalités retenues sur l'ensemble du réseau expérimental, une fertilisation raisonnée, réduite de 30% par rapport à la modalité de fertilisation raisonnée précédente, a été appliquée dans 80% environ des essais. Il s'agit, à travers cette troisième modalité d'examiner la voie d'amélioration de la santé des plantes *via* une fertilisation sous-optimale tout en limitant le déficit de rendement avec l'objectif de préserver le résultat économique de la production. Les modalités de fertilisation sont nommées: « Raisonnée », « Producteur » et « Faible ».

1.1 Niveau d'azote, prélèvements de la culture et production végétale

Les données présentées permettent de situer les réponses de la plante à son environnement nutritif.

La Figure 1 montre les quantités d'azote mises à disposition des cultures de laitue. Les différences entre « Raisonné » et « Faible » sont dans l'ensemble réduites du fait de reliquats relativement élevés dans certains cas.

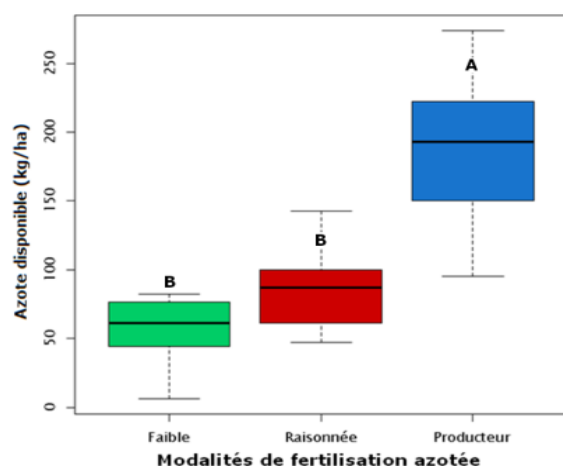


Figure 1 : Azote disponible selon les modalités de fertilisation azotée. A, B : groupes statistiques (seuil 5%)

Les analyses de plantes ont permis de calculer les mobilisations en azote à la récolte (Figure 2). Celles-ci reflètent le gradient de disponibilité en azote défini précédemment.

Le rendement brut et le rendement commercial ne sont pas différents statistiquement même si une tendance peut être observée, à savoir l'augmentation de biomasse produite à la récolte avec le niveau d'azote. A titre d'exemple, la Figure 3 donne les poids moyens par plante en réponse à l'azote. Les faibles niveaux d'azote peuvent affecter le rendement de plus de 15%, dans certaines situations (apports organiques avec une libération insuffisante d'azote tandis que les besoins augmentent, ré-apports décalés par rapport aux exigences de la plante).

En revanche, la pression de fertilisation azotée impacte la qualité des laitues avec une nette augmentation des teneurs en nitrates des laitues pour les niveaux d'azote les plus élevés. L'azote en excès s'accumule dans les vacuoles et l'azote minéral stocké peut dépasser 30% de l'azote total présent chez la laitue.

Ainsi, l'avantage d'un gain de biomasse, cependant non assuré en conditions de fertilisation azotée élevée, va être largement limité par le risque de perte de valeur marchande des laitues exposées à un enrichissement certain en nitrates.

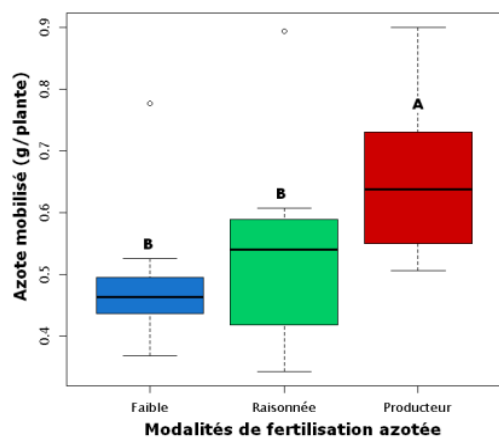


Figure 2 : Mobilisations en azote selon le niveau de fertilisation azotée. A, B : groupes statistiques (seuil 5%)

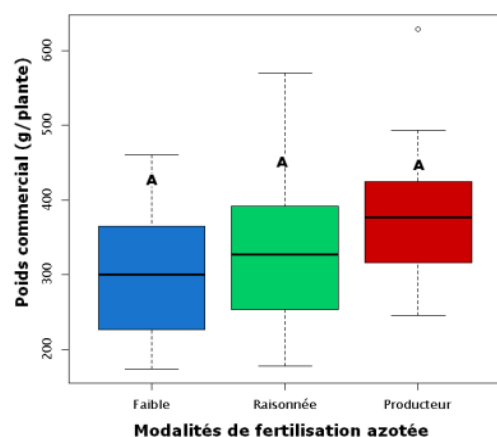


Figure 3 : Poids commercial selon le niveau de fertilisation azotée

1.2 Effet de l'azote sur la sensibilité des laitues aux bioagresseurs

Le Tableau 1 résume, pour les trois bioagresseurs les plus étudiés dans les essais, leur intensité de réponse à l'azote.

En effet, des inoculations de *Botrytis cinerea*, de *Sclerotinia minor* ou de *Sclerotinia sclerotiorum* ont été réalisées par la majorité des structures expérimentales partenaires selon des méthodologies mises au point à l'INRA et transférées dans le cadre de cette étude. Par ailleurs, différents partenaires ont procédé à des inoculations de pucerons, de *Bremia lactucae*, *in situ* et/ou *in vitro*. La technique d'inoculation permet ainsi de s'affranchir des situations où les bioagresseurs sont absents dans les essais ou à un niveau insuffisant pour distinguer des différences d'attaques selon les modalités de fertilisation azotée.

L'ensemble des données recueillies, à travers l'analyse d'images (logiciel Assess2, APS Press) pour définir les surfaces d'attaques des maladies et le comptage du nombre de pucerons, vient compléter les observations classiques réalisées selon un protocole commun, au niveau des parcelles expérimentales.

Niveau d'azote	<i>Botrytis cinerea</i>	<i>Sclerotinia</i> spp.	Pucerons
Bas	+	+	+
Moyen	+(+)	++	++
Elevé	+(+)	+++	+++

+ à +++ : gradient d'intensité des attaques de très faible à notable

Tableau 1 : Influence du niveau d'azote sur la sensibilité des laitues aux bioagresseurs

1.2.1. *Botrytis cinerea*

Les résultats des tests *in vitro* mettent en évidence une sensibilité plus marquée à *Botrytis cinerea* des laitues beurre relativement aux batavias avec un gradient de sensibilité croissant des feuilles du cœur vers les feuilles de la base de la plante, celles-ci présentant les lésions les plus étendues (Figure 4). La réaction à *Botrytis cinerea* dépend du type variétal comme noté lors des observations *in situ*.

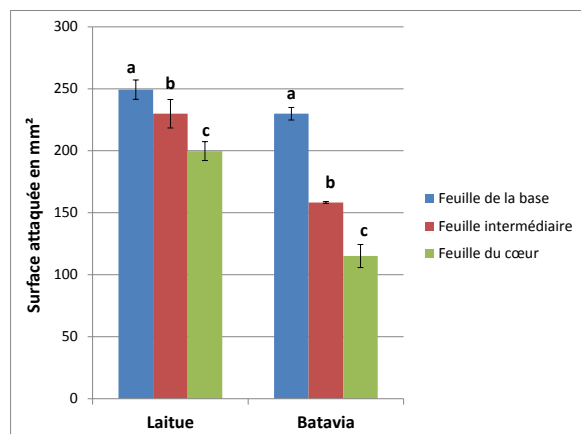


Figure 4 : Sensibilité à *Botrytis cinerea* (souche Bc1) selon le type variétal et l'âge des feuilles de laitue – Observations 40h après inoculation. a, b, c : groupes statistiques (seuil 5%)

Les attaques du champignon et son développement sur les tissus végétaux sont, en revanche, peu influencés par la fertilisation azotée, dans la limite des doses testées. Les différences mises en évidence dans la manifestation de la maladie ne sont pas significatives.

Ce résultat contraste avec celui obtenu en conditions de laboratoire par l'INRA. Dans ce cas, les plantes, cultivées en pots sur substrat neutre, sont soumises à des régimes de fertilisation couvrant une large gamme de concentrations en azote allant de 0.5 à 20 mg N/l, soit un facteur 40 entre les deux compositions extrêmes. Les teneurs correspondantes en azote des plantes se situent entre 11 et 58 mg N/g de matière sèche. Sur cette plage de valeurs, la surface des lésions croît avec le niveau d'azote. Pour les essais sous abri ou plein champ, les niveaux d'azote appliqués diffèrent d'un facteur légèrement supérieur à 2 (85 à 200 kg N/ha en moyenne), en considérant les pratiques en cours et les possibilités de réduction des apports dans les limites compatibles avec l'objectif économique des exploitations. Dans ce contexte, l'étendue des teneurs en azote des plantes est réduite comparée à celle obtenue en conditions de laboratoire. La Figure 5 permet de comparer les fourchettes de valeurs et d'observer que, pour les teneurs en azote relevées dans les essais réalisés en conditions de culture, les attaques de *Botrytis cinerea* mesurées dans les essais INRA, n'évoluent pas linéairement avec la teneur en azote des plantes.

L'effet de l'azote se manifesterait donc pour des régimes de fertilisation plus contrastés que ceux explorés dans les essais en conditions de production. En conséquence, pour des niveaux d'azote autorisant une production commerciale, la réponse à l'azote de la laitue en termes de sensibilité à *Botrytis cinerea* reste relativement homogène.

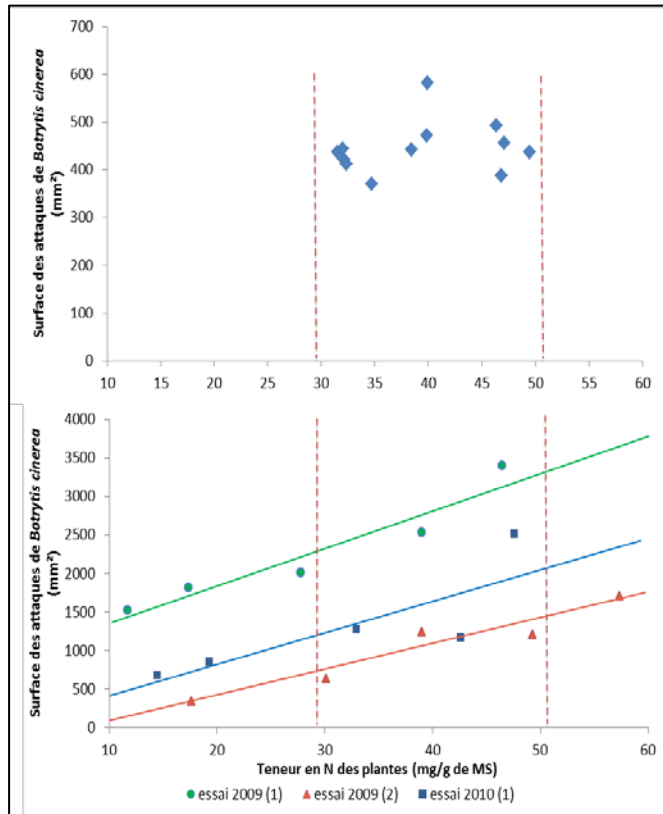


Figure 5 : Indice de sévérité des attaques de *Botrytis cinerea* et teneurs en azote comparés des laitues sous régimes différenciés au laboratoire (Lecompte F. Abro M.A., 2012) et en conditions de production (Raynal C., 2013)

1.2.2. *Sclerotinia* spp.

Les inoculations permettent de montrer l'effet de l'azote sur la sensibilité des laitues aux attaques de *Sclerotinia minor* en particulier, à l'exemple des résultats obtenus en conditions de laboratoire.

La Figure 6 rend compte de la diminution des attaques de *Sclerotinia minor* avec la baisse du niveau d'azote.

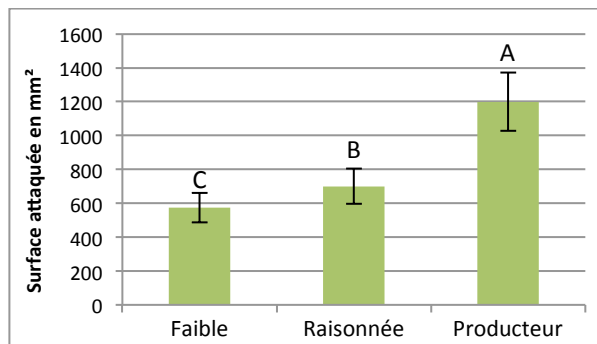


Figure 6 : Attaques de *Sclerotinia minor* sur batavia selon les régimes différenciés en azote. A, B, C: groupes statistiques (seuil 5%)

Les laitues beurre et batavia ne se distinguent pas significativement dans le niveau de sensibilité mais l'effet azote est plus marqué pour le type batavia.

Dans le cadre des essais intégrant la protection biologique, l'application du produit Sérénade Max, homologué sur laitue contre *Sclerotinia* spp. s'est avérée peu efficace. La Figure 7 montre la faible protection vis-à-vis de ce bioagresseur. Il semble susceptible de produire un meilleur résultat pour limiter les attaques sous faible pression azotée. Toutefois, à travers ces essais, l'action du produit n'est pas statistiquement établie.

Ces résultats complètent et confortent les notations réalisées à la récolte sur un échantillon de plantes représentatif de chaque parcelle élémentaire.

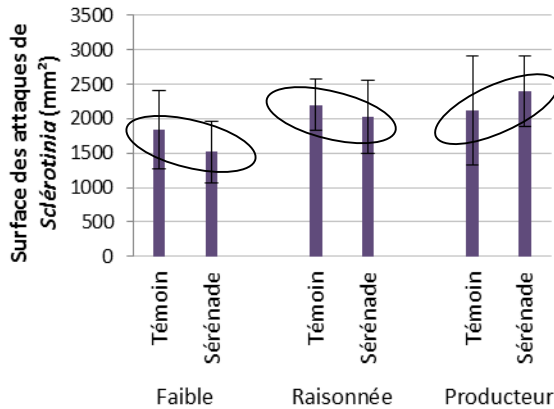


Figure 7 : Influence de l'agent de protection biologique Sérénade Max et du niveau d'azote sur les attaques de *Sclerotinia sclerotiorum*, 72 h après inoculation

1.2.3. Pucerons

La présence naturelle de pucerons dans les parcelles est variable selon les années et les essais mais, quand les populations sont significatives, le lien avec l'azote est établi ; une réduction du nombre de pucerons par plante est observée quand le niveau de fertilisation azotée diminue.

Par ailleurs, des inoculations *in situ* (*Nasanovia ribisnigri*) ont aussi été réalisées pour ne pas subir le caractère aléatoire de la présence du ravageur sur la culture. Les données recueillies viennent conforter les précédentes. Cependant, la limite de ces inoculations en culture tient au fait que les aléas climatiques (pluies, températures élevées) peuvent faire chuter les populations et masquer l'effet de l'azote.

Pour éviter ces difficultés, une méthode d'inoculation contrôlée a été appliquée. Celle-ci repose sur des inoculations *in vitro* en boîte de pétri avec couvercle insect proof et lit de gélose. Elle s'avère particulièrement pertinente pour asseoir la relation entre alimentation azotée et réceptivité des plantes aux pucerons. Elle consiste à déposer sur des fragments de feuilles de taille homogène et provenant de plantes qui ont été soumises à des régimes d'azote distincts (0 à 150 kg N/ha), un nombre déterminé de pucerons (*Nasanovia ribisnigri*) de même âge (1j). Les boîtes sont transférées dans un phytotron (T° 22 °C, HR 60%, PP 16 h) et le comptage des pucerons est réalisé toutes les 24 h pendant 8 jours. Le nombre de pucerons reste quasiment stable pendant 4 j et l'accroissement des populations intervient entre les 6^{ème} et 7^{ème} j après inoculation.

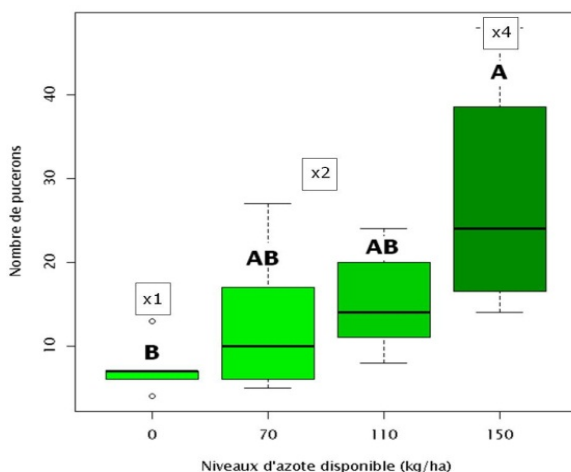


Figure 8 : Nombre de pucerons en fonction du régime azoté - Observations 8 jours après inoculation sur feuille *in vitro*. A, B: groupes statistiques (seuil 5%)

La Figure 8 représente le nombre de pucerons à 8 j. L'inoculation initiale comprend sept pucerons et les chiffres suivis d'une étoile indiquent le facteur de multiplication (nombre de pucerons à 8 j rapporté au nombre de pucerons inoculés dans les conditions contrôlées du test).

L'ensemble des travaux conduit à valider l'influence de l'azote sur le développement des pucerons. Le type batavia apparaît plus vulnérable en général.

1.2.4. *Rhizoctonia solani*

Il fait partie des champignons responsables des symptômes de pourriture du collet. Ce type de dégâts, notés à la récolte, se manifeste avec une plus grande intensité dans les milieux riches en azote (fertilisation « Producteur »), les laitues beurre apparaissant plus sensibles dans l'ensemble.

1.2.5. *Bremia lactucae* ou mildiou de la laitue

Le choix de variétés résistantes réduit le risque de cette maladie qui, une fois installée sur quelques plantes dans une parcelle, peut se répandre rapidement et compromettre le résultat économique.

Les notations effectuées en cours de culture ou à la récolte, plus particulièrement dans le cas d'inoculations du champignon au champ, traduisent l'effet aggravant de l'azote comme le soulignent les résultats de la Figure 9.

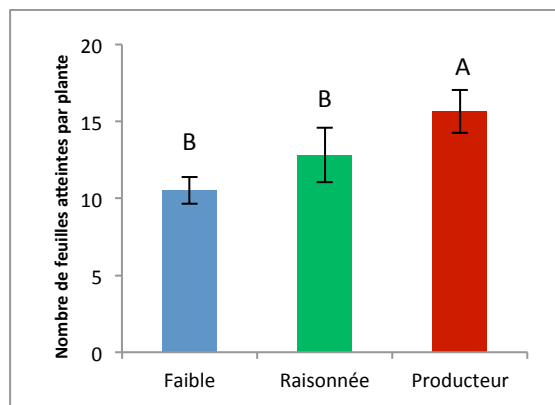


Figure 9 : Intensité des attaques de *Bremia lactucae* selon le régime de fertilisation azotée. A, B: groupes statistiques (seuil 5%)

Le type batavia semble moins sensible que les laitues beurre mais la réponse de la plante à l'azote y est plus marquée.

Par ailleurs, la protection biologique *via* le produit SDP LBG 01 F34 (phosphonate de potassium) offre une maîtrise significative du mildiou (laitues 2 à 4 fois moins atteintes), pour des infestations modérées.

En résumé, les travaux réalisés sur laitue apportent des éléments concrets pour concilier protection des plantes et production économique *via* une gestion raisonnée des fertilisations azotées.

L'azote expose la laitue aux maladies dues à *Sclerotinia spp.* notamment et aux pucerons d'où l'intérêt de minimiser le risque lié aux fertilisations élevées. De réelles marges de progrès existent sans remettre en cause l'objectif économique des productions, avec des conséquences favorables sur la santé des plantes.

Enfin, la fertilisation, en tant que facteur de gestion du risque sanitaire en culture de laitue, entre dans les stratégies de production intégrée. Celles-ci mettent en œuvre, outre une meilleure maîtrise des apports azotés, le choix variétal (Laitue beurre et batavia, respectivement plus sensibles aux maladies et aux pucerons). Enfin, la protection biologique offre des voies de progrès dans le contrôle du mildiou. Toutefois, elle requiert des investigations soutenues pour disposer de nouvelles formules ayant une action marquante sur les bioagresseurs. La protection biologique, sans être une alternative totale aux traitements chimiques, peut venir en appui et doit ainsi permettre de réduire les applications de traitements chimiques. Cette combinaison de moyens (maîtrise de l'azote, type variétal, protection biologique) ouvre de nouvelles voies de production à moindre coût sanitaire et environnemental.

2. Effets de l'azote sur la tomate conduite en sol sous abri

L'étude est fondée sur neuf essais situés dans les régions de production : Languedoc-Roussillon, Provence-Côte d'Azur et Centre. Chaque essai comprend au moins deux modalités de fertilisation : une fertilisation raisonnée selon la méthode PILazo® comparée à la pratique en cours des producteurs.

Dans un tiers des cas, une troisième modalité est appliquée et consiste en une fertilisation raisonnée sur le principe de la méthode PILazo® avec réduction des doses d'azote de 30%. Les cultures de tomate sont fertirriguées et les apports d'engrais se répartissent sur le cycle cultural ce qui autorise une gestion calquée sur les besoins réels de la culture au cours de son développement.

2.1 Niveaux d'azote, production de biomasse végétale et rendement en fruits

La Figure 10 situe les niveaux d'approvisionnement en azote selon les modalités de fertilisation, redéfinies en classes de disponibilités en azote pour la culture.

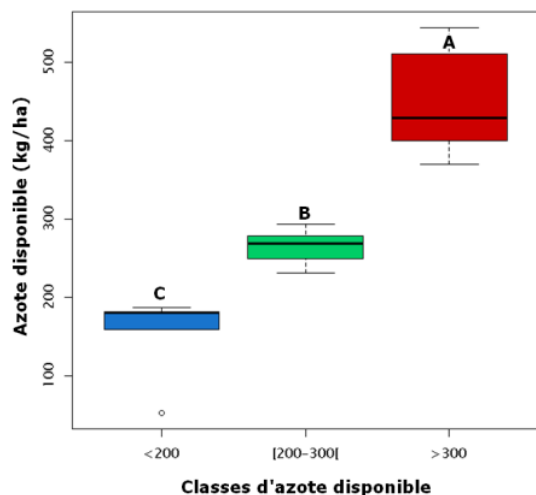


Figure 10 : Niveaux d'azote disponible par classe. A, B, C: groupes statistiques (seuil 5%)

Sur cette échelle, la réponse de la tomate en termes de production de fruits est équivalente. Les rendements brut et commercial ne se différencient pas statistiquement (Figure 11). La variabilité inter essais est importante et les essais analysés individuellement peuvent révéler, dans certains cas, une baisse de rendement liée essentiellement à une perte de calibre pour les plus faibles niveaux d'azote, les écarts observés ne sont pas différents statistiquement.

En revanche, l'état végétatif des plantes suit un gradient conforme au niveau d'azote (Figure 12). Au-delà des besoins en azote pour assurer l'expression du potentiel de production, la tomate valorise les surplus d'azote à travers l'augmentation de biomasse foliaire.

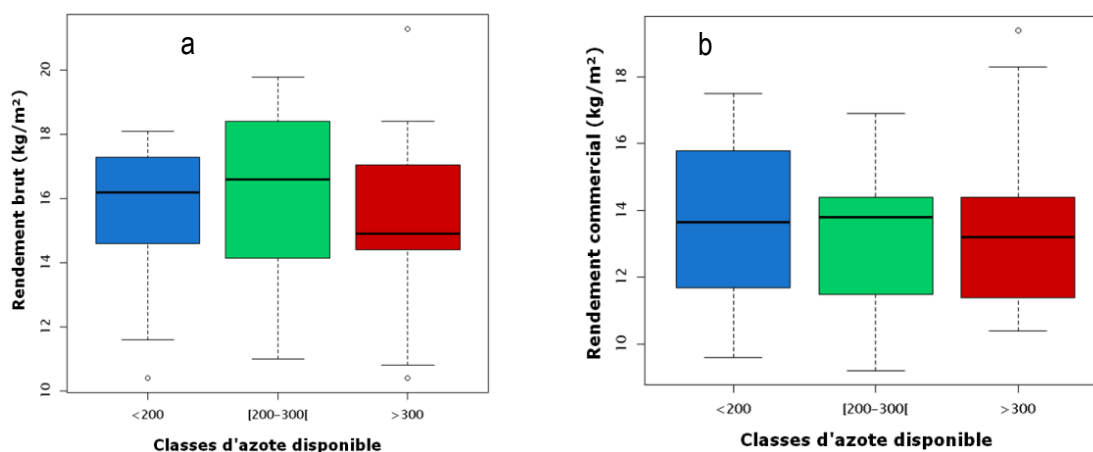


Figure 11 : Rendement brut (a) et rendement commercial (b) selon le niveau d'azote

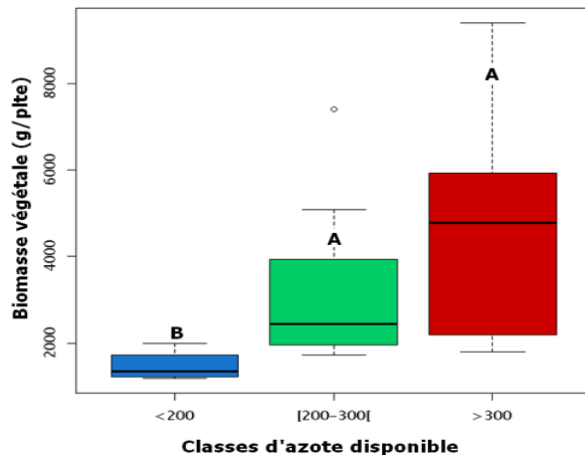


Figure 12 : Production de biomasse végétale selon le niveau d'azote. A, B: groupes statistiques (seuil 5%)

2.2 Effet de l'azote sur la sensibilité aux bioagresseurs

Parmi les problèmes sanitaires les plus conséquents en culture de tomate, se situent l'Oïdium et la pourriture grise. Les ravageurs comme les aleurodes, voire les pucerons, peuvent ainsi représenter un réel danger pour les cultures.

Les suivis en culture se révèlent insuffisants dans l'ensemble pour établir un lien probant entre les observations des attaques, quel que soit le bioagresseur considéré, et le régime azoté. La faible pression sanitaire *in situ*, la variabilité inter essais avec des zones à l'intérieur des parcelles plus affectées que d'autres en rapport avec les flux dirigés de contamination de charge variable, sont des éléments explicatifs.

Le recours aux inoculations offre des conditions plus propices, car contrôlées, à l'examen des réponses à l'azote de la tomate en termes de sensibilité aux bioagresseurs.

2.2.1. *Botrytis cinerea*

Les inoculations sont réalisées avec trois souches d'agressivité différente (BC1 et BC21 ou BC87), fournies par le laboratoire PV de l'Inra Avignon. La mise en œuvre des tests se réfère aux méthodes établies par l'Inra Avignon et intégrées au protocole des essais. Les feuilles et plaies d'effeuillage constituent les supports végétaux des inoculations contrôlées.

Les attaques sur feuilles montrent un effet azote moins tranché que sur plaies d'effeuillage qui représentent une voie d'entrée privilégiée de *Botrytis cinerea* à chaque opération de taille.

Les notations de l'intensité des attaques (grille de notes de 0 à 3) sur chicots souligne une sensibilité accrue au *Botrytis cinerea* (souche BC1, agressive) pour les plus faibles niveaux d'azote (<200 kg N/ha) (Figure 13).

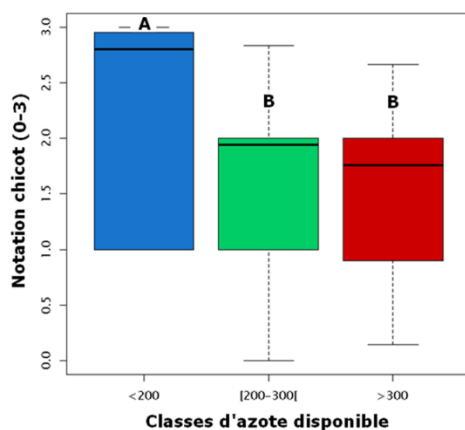


Figure 13 : Indice d'attaques de *Botrytis cinerea* (souche Bc1) sur chicots. A, B: groupes statistiques (seuil 5%)

La mesure des longueurs de chancres développés sur tiges montre un gradient de sensibilité moins établi statistiquement avec la souche BC1 qu'avec la souche BC21 (Figure 14).

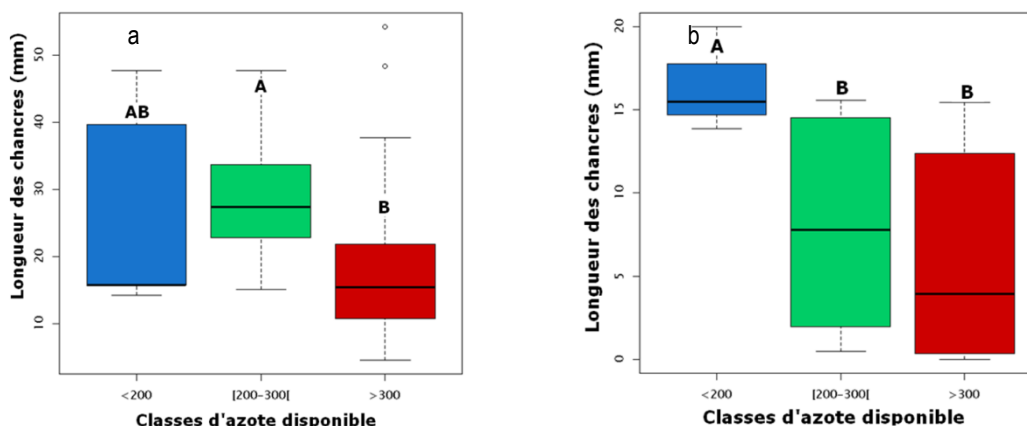


Figure 14 : Lésions sur tiges causées par les souches BC1 (a) et BC21 (b) de *Botrytis cinerea*. A, B: groupes statistiques (seuil 5%)

Ces données vont dans le sens des résultats obtenus à l'INRA en conditions de laboratoire sous milieux nutritifs contrastés contenant 0.5 à 30 me N/l (Figure 15).

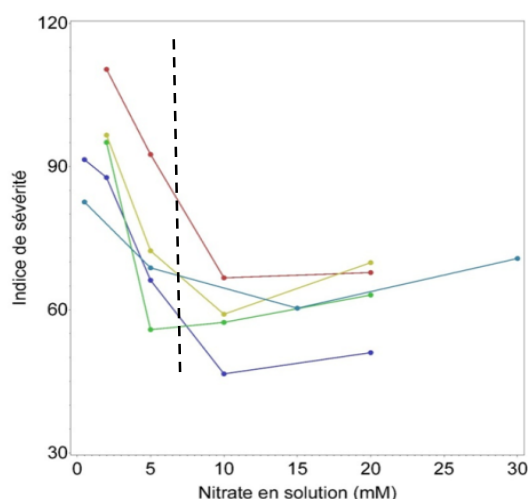


Figure 15 : Indice de sévérité des attaques de *Botrytis cinerea* selon la concentration en azote du milieu, en conditions contrôlées de laboratoire (5 essais), Abro M.A., 2013

L'indice de sévérité de la maladie diminue avec l'augmentation de la concentration en azote des solutions nutritives puis se stabilise entre 5 et 10 me N/l selon les essais. Au-delà, les attaques n'évoluent plus.

A l'exemple des résultats obtenus sur laitue en milieu contrôlé, la large gamme des compositions azotées permet d'établir une relation étroite entre la teneur en azote du végétal et la sensibilité de la plante à *Botrytis cinerea*. Toutefois, les paramètres de l'équation qui lient les deux variables dépendent de l'année et l'équilibre en sucres (fructose/sucres solubles totaux) semble un meilleur indicateur de l'état de réceptivité à *Botrytis cinerea*. Dans les essais en conditions de production, la plage étroite des teneurs en azote de la tomate était peu apte à rendre compte du gradient de sensibilité observé par année. Les premiers résultats sur la relation sucres-réceptivité des plantes laissent entrevoir la relation N-métabolisme secondaire *via* une évolution du contenu en sucres associée à l'expression des mécanismes de défense. Décrypter les processus en jeu en lien avec l'azote présente aussi l'intérêt de mieux cibler les composés capables de « tracer » l'état de sensibilité des plantes.

La protection biologique contre *Botrytis cinerea* repose, dans les conditions de culture sous abri, sur l'utilisation du produit Antibot (Agauxine) bénéficiant d'une ADE en 2012 (AMM attendue pour 2014). Les résultats indiquent que, pour un développement significatif du champignon, Antibot tend à réduire

les dégâts. Son action ne permet pas son éradication mais, dans les conditions d'une pression modérée de *Botrytis cinerea*, peut contribuer à limiter l'usage des traitements chimiques.

2.2.2. Oidium neolycopersici

Les travaux en conditions de laboratoire et en conduite hors sol, réalisés respectivement par l'Inra Avignon et l'Inra Alenya, ont fondé les premières bases de la relation entre azote et sensibilité à l'Oïdium de la tomate. Les tendances dégagées de l'étude allaient dans le sens d'une sensibilité accrue à l'Oïdium avec la hausse en azote du milieu nutritif.

Les essais réalisés en conditions de production ont intégré des tests d'inoculation d'*Oidium neolycopersici*, standardisés selon le protocole établi par l'Unité PV de l'INRA Avignon, pour étudier la réponse des cultures de tomate à ce champignon sous l'effet de l'azote.

L'application du test dans des conditions peu favorables au développement de l'Oïdium compromet fortement la qualité des données recueillies. Dans le cadre d'une contamination naturelle relativement importante, a été constatée une progression plus rapide de la maladie sous régime azoté élevé. Toutefois, ces résultats (en conditions de laboratoire et au champ) sont insuffisants pour asseoir et préciser à ce stade la relation entre l'azote et la sensibilité de la tomate à l'Oïdium.

2.2.3. Aleurodes-Acariens

La présence de ce ravageur en conditions de production a permis de souligner l'influence de l'azote sur le nombre moyen d'aleurodes par feuille. Les notations réalisées au cours du cycle cultural montrent le même gradient de sensibilité selon le niveau d'azote, à savoir une augmentation du nombre d'aleurodes avec le régime azoté.

En conditions de production également, le dénombrement des acariens à différents niveaux de la plante montre un lien avec l'azote similaire à celui rapporté pour les aleurodes.

En revanche, l'absence quasi générale de pucerons en parcelles d'expérimentation renvoie à des essais supplémentaires en conditions contrôlées pour mieux appréhender la réaction de la tomate à ce ravageur.

3. Effets de l'azote sur la tomate en culture hors sol

3.1 Composition en azote des solutions nutritives et rendement

Les résultats présentés reposent sur sept essais au total. Au cours des premiers essais, les concentrations en azote des milieux nutritifs sont égales à 7 et 18 me N/l, soit une composition réduite en azote comparée au type de conduite en usage. La comparaison des résultats de production (rendement brut, rendement commercial) n'a pas mis en évidence de différences significatives.

Puis, dans les essais suivants une modulation de l'azote dans le temps a été intégrée. Outre la différenciation des solutions nutritives dans la première partie du cycle, a été appliquée une réduction forte d'azote du stade fin du 4^{ème} bouquet à la fin des récoltes avec ou sans maintien de la conductivité électrique. Les réactions de la culture à ces schémas nutritifs doivent permettre de préciser les possibilités d'abaisser et de moduler fortement l'azote au cours du cycle cultural. L'analyse statistique des données ne montre pas de différence entre les modalités même si un léger décrochage peut se manifester au niveau du calibre mais les écarts restent limités et non significatifs.

Les références acquises permettent de compléter, conforter les données antérieures dans le sens d'une baisse des concentrations en azote dans les solutions nutritives compatible avec le maintien du niveau de production.

3.2 Sensibilité aux bioagresseurs en lien avec la nutrition azotée

Les informations sur les problèmes sanitaires et les remarques sur les observations *in situ*, données pour le mode de culture sous abri, valent aussi pour la conduite hors sol. En conséquence, nous nous intéresserons aux résultats des inoculations de *Botrytis cinerea* et d'*Oidium neolycopersici*.

3.2.1. *Botrytis cinerea*

Les inoculations réalisées sur échantillons foliaires (pastilles de feuilles prélevées avec un emporte-pièce) montrent un effet significatif de l'azote, les plus faibles concentrations en azote exposant davantage les plantes à *Botrytis cinerea*. L'influence de l'azote se manifeste par ailleurs à travers la longueur des chancre sur tiges après inoculation des plaies d'effeuillage. A titre d'exemple, la Figure 16 montre l'effet aggravant d'une solution nutritive à 7 me N/l par rapport à 18 me N/l sur l'extension des chancre. Le remplacement de la solution nutritive à 7 me N/l par une solution à 10 me N/l du 27/05 au 18/07 aboutit à une réduction des chancre. Les résultats témoignent d'un moindre risque de sensibilité à *Botrytis cinerea* avec une composition nutritive à 10 me N/l, qui ne se distingue pas dans ses effets de la solution nutritive à 18 me N/l, d'où la possibilité de baisser la concentration en azote du milieu nutritif sans que les plantes deviennent plus vulnérables à *Botrytis cinerea*.

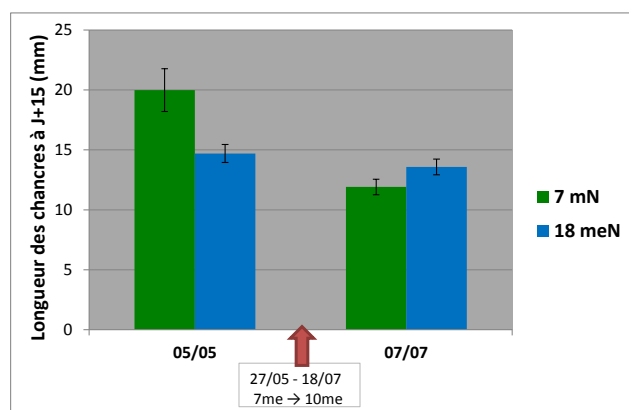


Figure 16 : Sensibilité à *Botrytis cinerea* sous deux régimes contrastés en azote, évoluant au cours du cycle cultural, en conditions de production (les observations du 05/05 et 07/07 portent sur des plantes différentes)

Dans la série d'essais avec modulation de l'azote dans le temps, sont comparées, dans la première partie du cycle de culture, des solutions nutritives à 16 et 10 me N/l. La modalité « faible » se caractérise par une concentration en azote tenant compte de l'augmentation de la sensibilité des plantes à 7 me N/l observée précédemment. Les compositions en azote sont réduites à 12 et 5 me N/l respectivement après le stade « floraison du 4^e bouquet » (F4) du fait de l'entrée dans une période à ETP croissante et donc d'exigence en eau plus élevée. La réponse aux besoins relatifs en eau et éléments minéraux de la culture sur cette phase du cycle où a lieu la production de fruits, se traduit par l'augmentation de la fréquence des fertirrigations et la baisse des concentrations en azote dont la limite est à évaluer.

Avec ces régimes azotés, aucune différence significative sur la sensibilité des plantes à *Botrytis cinerea* n'apparaît sur feuilles. Les résultats sont plus nuancés au niveau des attaques sur chicot et de la longueur des chancre mais, dans ces conditions, le *Botrytis* se développe plus intensément chez les plantes soumises au régime azoté le plus élevé.

D'autre part, les deux produits suivants de protection biologique sont testés:

- Sérénade Max (BASF), homologué contre *Botrytis cinerea* sur tomate
- Antibot (Agrauxine), bénéficiant d'une ADE en 2012 (AMM attendue en 2014).

L'effet des agents de bio-contôle sur les attaques de *Botrytis cinerea* (suite inoculation des plaies d'effeuillage) se lit dans le Tableau 2 regroupant les résultats de l'analyse statistique des notations sur plaies d'effeuillage (intensité d'attaques) d'une part, sur tige (longueur des chancre) d'autre part.

	Essais	Témoin	Sérénade Max	Antibot
(a) Intensité des attaques	1	A	B	C
	2	A	C	B
	3	A	B	
(b) Longueur des chancres sur tige	1	A	B	B

Tableau 2 : Résultats des analyses statistiques sur (a) l'intensité des attaques et (b) la longueur des chancres sur tige avec ou sans protection biologique

Les différents essais montrent l'impact significatif des deux produits de traitement biologique pour réduire la pression du bioagresseur. La Figure 17 précise l'effet conjoint de la protection biologique et du régime azoté sur les attaques de *Botrytis cinerea*, via les notations sur chicot. La gravité des symptômes est nettement atténuée avec l'application de Sérénade Max ou d'Antibot dont l'efficacité apparaît renforcée sous régime azoté modéré.

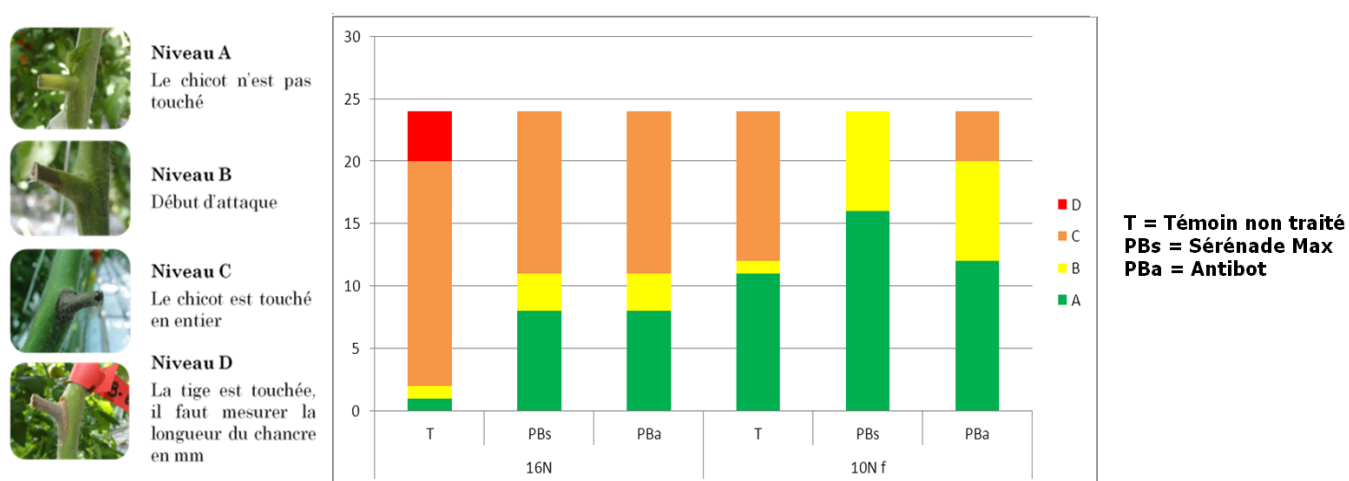


Figure 17 : Attaques de *Botrytis* (souche Bc1) selon le régime de fertilisation azotée avec ou sans protection biologique

3.2.2. *Oidium neolycopersici*

A l'exemple des essais réalisés en culture sous abri, ceux en conduite hors sol visaient l'étude de la sensibilité à l'Oïdium sous régimes azotés contrastés après inoculation *in situ* (procédure d'inoculation et grille d'observations communes pour les essais sous abri et hors sol).

La contamination artificielle s'est avérée, en général, délicate à maîtriser et le pourcentage de surface foliaire oïdiée est resté limité. Néanmoins, la tendance à l'accroissement de la maladie en fonction du niveau d'azote peut être mentionnée.

Les données concernant la relation N-Oïdium restent fragmentaires du fait des difficultés à obtenir un développement suffisant du champignon pour différencier les situations nutritives. Des travaux supplémentaires et en conditions contrôlées sur les plans climatique et nutritif, seraient à réaliser pour mieux préciser l'effet réel de l'azote sur la sensibilité de la tomate à l'Oïdium.

3.3 Influence du porte-greffe sur la sensibilité aux bioagresseurs

Trois porte-greffes sont recensés dans les essais : Maxifort, Optifort, Beaufort. Les deux porte-greffes les plus représentés régionalement sont comparés : Maxifort et Beaufort dans l'Ouest de la France, Maxifort et Optifort dans le Sud. L'effet du porte-greffe est analysé sous les régimes nutritifs contrastés décrits précédemment. Les résultats convergent et montrent que le porte-greffe n'apparaît pas essentiel

dans la réaction de la tomate aux bioagresseurs. La sensibilité des plantes est indifférente au porte-greffe dans tous les cas.

Au final, pour la tomate, une meilleure gestion du risque sanitaire (*Botrytis cinerea*, aleurodes, acariens, notamment) s'appuie sur la maîtrise des apports azotés *via* :

- le recours à une méthode de raisonnement en culture sous abri. La méthode PILazo®, appliquée en comparaison d'apports simulant les pratiques courantes, permet de réduire significativement les quantités d'azote (de l'ordre de 30% minimum) en ajustant les doses aux besoins réels de la culture.
- l'acquisition de nouvelles références sur la composition des solutions nutritives avec une baisse et une modulation des concentrations en azote du milieu nutritif au cours du cycle cultural.

Ces baisses substantielles d'azote sont sans conséquence significative sur la production de fruits et participent de ce fait à l'amélioration du résultat économique de la culture.

Ces acquis en matière de conduite des fertilisations azotées vont pouvoir être mis à profit dans les démarches de production intégrée associant aussi la protection biologique qui, à travers les produits testés, a donné des résultats prometteurs en vue de la limitation des traitements chimiques.

En conclusion

Les études en conditions contrôlées de laboratoire ont mis en évidence l'incidence de la nutrition azotée sur deux maladies importantes : *Botrytis cinerea*, en cultures de laitue et de tomate, *Oïdium neolycopersici*, en culture de tomate.

Les expérimentations réalisées en conditions de production confortent les résultats de laboratoire tout en précisant, pondérant et élargissant à d'autres bioagresseurs (*Sclerotinia spp.*, *Bremia lactucae* et pucerons pour la laitue, aleurodes et acariens pour la tomate) l'effet de régimes azotés compatibles avec les objectifs économiques des exploitations.

L'ensemble des travaux témoigne de la place de l'azote parmi les facteurs à risques au niveau de la sensibilité des cultures de laitue et de tomates aux bioagresseurs. A l'issue du projet, des connaissances nouvelles ont été acquises. Des références, outils de raisonnement ont été définis pour être mis à profit dans la gestion maîtrisée de l'azote.

Les niveaux d'azote assimilés aux pratiques courantes ont, chez la laitue, un effet aggravant vis-à-vis des attaques de mildiou, de *Sclerotinia* et de pucerons. Le type variétal entre aussi en ligne de compte. Les conclusions vont dans le même sens pour la tomate où l'azote intervient surtout dans la manifestation de *Botrytis cinerea*, voire des aleurodes et acariens en conditions de production. Aucun effet du porte-greffe n'est mis en évidence. Moduler les apports d'azote en fonction des besoins réels de la culture sur le cycle cultural, pour tous les modes de culture, et utiliser les fournitures du sol pour ajuster les fertilisations en cultures sous abri, autorisent des baisses substantielles de fertilisant, de nature à renforcer la santé des plantes.

La protection biologique a montré un certain intérêt pour réduire les infestations de mildiou chez la laitue et de *Botrytis cinerea* chez la tomate, en particulier.

Références bibliographiques

Abro M.A., 2013. Nitrogen fertilization of the host plant influences susceptibility, production and aggressiveness of *Botrytis cinerea* secondary inoculum and on the efficacy of biological control. Thèse Doctorat Université d'Avignon et Pays de Vaucluse, 171 p.

Awmack C.S., Leather S.R., 2002. Host plant quality and fecundity in herbivorous insects. Annual review of entomology 47, 817-844.

- Cortesero A.M., Stapel J.O., Lewis W.J., 2000. Understanding and Manipulating. Plant Attributes to Enhance Biological Control. *Biological Control* 17, 35-49.
- Dmitriev A., Djatsok J., Grodzinsky D., 1996. The role of Ca²⁺ in elicitation of phytoalexin synthesis in cell culture of onion (*Allium cepa* L.). *Plant Cell Rep.* 15, 945-948.
- Dordas C., 2008. Role of nutrients in controlling plant diseases in sustainable agriculture. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 28, 33-46.
- Duffy B.K., Defago G., 1999. Macro and microelement fertilizers influence the severity of Fusarium crown and root rot of tomato in a soilless production system. *HortScience* 34, 287-291.
- Gelli A., Higgins V.J., Blumwald E., 1997. Activation of plant plasma membrane Ca²⁺- permeable channels by race-specific fungal elicitors. *Plant Physiol.* 113, 269-279.
- Hoffland E., Jeger M.J., van Beusichem M.L., 2000. Effect of nitrogen supply rate on disease resistance in tomato depends on the pathogen. *Plant Soil* 218, 239-247.
- Huber D.M., Thompson I.A., 2007. Nitrogen and plant disease in Mineral nutrition and plant disease. Edited by the American Phytopathological Society with Datnoff L.E., Elmer W.H., Huber D.M.
- Huber D.M., 1980. The role of mineral nutrition in defense. In *Plant Disease, and Advanced Treatise*. Vol. 5, How Plants Defend Themselves, in: Horsfall J.G., Cowling E.B. (Eds), Academic Press, New-York, p. 381-406.
- Jansson J., 2003. The influence of plant fertilisation regime on plant aphid parasitoid interactions. Doctoral thesis. Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala.
- Lecompte F., Abro M.A., Nicot P., 2013. Can plant sugars mediate the effect of nitrogen fertilization on lettuce susceptibility to two necrotrophic pathogens: *Botrytis cinerea* and *Sclerotinia sclerotiorum*? *Plant Soil* 369, 387-401.
- Legge R.L., Thompson J.E., Baker J.E., Lieberman M., 1982. The effect of calcium on the fluidity of phase properties of microsomal membranes isolated from post-climacteric Golden Delicious apples. *Plant Cell Physiol.* 23, 161-169.
- Marschner H., 1995. *Mineral Nutrition of Higher Plants*, 2nd ed., Academic Press, London, p. 889.
- Mattson W.J., 1980. Herbivory in relation to plant nitrogen-content. *Annual Review of Ecology and Systematics* 11, 119-166.
- Nicot P., Baille A., 1996. Integrated control of *Botrytis cinerea* on greenhouse tomatoes. In C. E. Morris et al., eds. *Aerial Plant Surface Microbiology*. Plenum Press, New York, pp. 169-189
- Nicot P., Bardin M., Alabouvette G., Köhl C., Ruocco M., 2011. Potential of biological control based on published research. 1. Protection against plant pathogens of selected crops. In P. C. Nicot, ed. *Classical and augmentative biological control against diseases and pests: critical status analysis and review of factors influencing their success*. IOBC/WPRS Switzerland, pp 1-11
- Nicot P., Fabre R., Lebbara T., Ozayou S., Ali Abro M., Duffaud M., Lecompte F., Jeannequin B., 2012. Manipulating nitrogen for the management of diseases in the tomato greenhouse: what perspectives for IPM? *IOBC-WPRS Bulletin* 80, 333-338.
- Olesen J.E., Jorgensen L.N., Petersen J., Mortensen J.V., 2003a. Effects of rate and timing of nitrogen fertilizer on disease control by fungicides in winter wheat. 1. Grain yield and foliar disease control. *Journal of Agricultural Science, Cambridge* 140, 1-13.
- Olesen J.E., Jorgensen L.N., Petersen J., Mortensen J.V., 2003b. Effects of rate and timing of nitrogen fertilizer on disease control by fungicides in winter wheat. 2. Crop grown and disease development. *Journal of Agricultural Science, Cambridge* 140, 15-29.
- Raynal C., Lecompte F., Nicot P., 2013. Effet de la fertilisation des plantes maraîchères sur leur sensibilité aux bioagresseurs. *Rencontres PICIég, INRA Science & Impact SIA*.
- Raynal C., 2013. Utiliser la fertilisation pour agir sur la santé des plantes et favoriser leur protection vis-à-vis des bioagresseurs. *Compte rendu final du projet CASDAR n° 9117*. 30p.
- Throop H.L., Lerau M.T., 2004. Effects of nitrogen deposition on insect herbivory: Implications for community and ecosystem processes. *Ecosystems* 7, 109-133.
- Walters D.R., Bingham I.J., 2007. Influence of nutrition on disease development caused by fungal pathogens: implications for plant disease control. *Review article. Ann App Biol.* 151, 307-324.

White T.C.R., 1984. The abundance of invertebrate herbivores in relation to the availability of nitrogen in stressed food plants. *Oecologia* 63, 90-105.