



**HAL**  
open science

## **SYNERGIES -Maîtriser les fusarioses dans les systèmes légumiers (melon et ail) dans différents bassins de production**

Laure Soucemarianadin, Tanguy Balanant, André Chabert, Claire  
Ducourouble, Laurène Fito, Céline Forzani, Christel Leyronas, Jean-Michel  
Lhote, Juliette Pellat, Claire Prigent-Combaret, et al.

### ► To cite this version:

Laure Soucemarianadin, Tanguy Balanant, André Chabert, Claire Ducourouble, Laurène Fito, et al.. SYNERGIES -Maîtriser les fusarioses dans les systèmes légumiers (melon et ail) dans différents bassins de production. Innovations Agronomiques, 2024, 94, pp.155-172. 10.17180/ciag-2024-vol94-art11 . hal-04591025

**HAL Id: hal-04591025**

**<https://hal.inrae.fr/hal-04591025v1>**

Submitted on 28 May 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0  
International License



## SYNERGIES - Maîtriser les fusarioses dans les systèmes légumiers (melon et ail) dans différents bassins de production

Laure SOUCEMARIANADIN<sup>1</sup>, Tanguy BALANANT<sup>2</sup>, André CHABERT<sup>3</sup>, Claire DUCOUROUBLE<sup>4</sup>, Laurène FITO<sup>2</sup>, Céline FORZANI<sup>5</sup>, Christel LEYRONAS<sup>6</sup>, Jean-Michel LHOTE<sup>7</sup>, Juliette PELLAT<sup>8</sup>, Claire PRIGENT-COMBARET<sup>9</sup>, Marjolaine REY<sup>9</sup>, Christian STEINBERG<sup>10</sup>, Louis TANCHON<sup>11</sup>, Marie TORRES<sup>8</sup>.

<sup>1</sup> Acta, les instituts techniques agricoles – 149 rue de Bercy, F-75595 Paris Cedex 12, France

<sup>2</sup> FiBL France, Research Institute of Organic Agriculture – 26400 Eurre, France

<sup>3</sup> Acta, les instituts techniques agricoles – 23 rue Jean Baldassini, F-69364 Lyon Cedex 07, France

<sup>4</sup> SERAIL – 123 Chemin du Finday, 69126 Brindas, France

<sup>5</sup> SUDEXPE – Mas Carrière, 34590 Marsillargues, France

<sup>6</sup> INRAE, Pathologie Végétale, F-84140 Montfavet, France

<sup>7</sup> ACPEL – Le petit chadignac, 17100 Saintes, France

<sup>8</sup> CTIFL – Centre Opérationnel de Balandran, 751 le Balandran, 30127 Bellegarde, France

<sup>9</sup> Université Claude Bernard Lyon 1, Laboratoire d'Écologie Microbienne, UMR CNRS 5557, UMR INRAE 1418 – VetAgro Sup, 69622 Villeurbanne, France

<sup>10</sup> Agroécologie, INRAE, Institut Agro, Univ. Bourgogne, Univ. Bourgogne Franche-Comté, 21000 Dijon, France

<sup>11</sup> Chambre d'agriculture du Nord-Pas-de-Calais – 56 Av. Roger Salengro, 62223 Saint-Laurent-Blangy, France

**Correspondance :** [laure.soucemarianadin@acta.asso.fr](mailto:laure.soucemarianadin@acta.asso.fr)

### Résumé

Le projet SYNERGIES visait à tester différents leviers agroécologiques, en fonction du contexte pédoclimatique et des systèmes de culture, et à fournir des outils de décision aux conseillers pour maîtriser les maladies telluriques provoquées par *Fusarium spp.* en culture d'ail et de melon. Une caractérisation de l'état sanitaire des sols et cultures (analyses de sol et enquête des pratiques) a été réalisée dans un réseau de parcelles présentant des niveaux d'attaque variés. Un inventaire initial des leviers mobilisés a permis de sélectionner ceux qui pourraient être testés dans le projet. L'efficacité de différents leviers agroécologiques pour la protection des cultures d'ail et de melon a ainsi été évaluée en conditions semi-contrôlées et au champ. En parallèle, des prélèvements de plants dans ces essais ont servi à comprendre les processus impliqués dans la protection de ces cultures. La synthèse des connaissances acquises dans les enquêtes, analyses et essais, combinée à l'analyse de la littérature et à l'avis d'experts a permis de développer des prototypes d'outils opérationnels de gestion des fusarioses. Ces derniers visent à préconiser des leviers agroécologiques adaptés, selon les contextes pédoclimatiques et les systèmes de culture.

**Mots-clés :** *Fusarium proliferatum*, *Fusarium oxysporum* (f. sp. *melonis*), ail, melon, leviers agroécologiques, outil d'évaluation multicritères



## **Abstract: Synergies project: controlling *Fusarium* in vegetable (melon and garlic) production systems in various production areas**

The SYNERGIES project aimed at testing different agroecological levers, depending on the pedoclimatic context and cropping systems, and at providing advisors with decision-making tools to control soil-borne diseases caused by *Fusarium spp.* in garlic and melon crops. A characterisation of the health status of soils and crops (soil analyses and survey of practices) was carried out in a network of plots presenting varying levels of *Fusarium* wilt attack. An initial inventory of the levers mobilised made it possible to select those that could be tested in the project. The effectiveness of different agroecological levers for the protection of garlic and melon crops was thus evaluated under semi-controlled conditions and in the field. At the same time, plant samples from these trials were used to understand the processes involved in the protection of these crops. The synthesis of knowledge acquired from surveys, analyses, and trials, combined with literature analysis and the opinion of experts made it possible to develop prototypes of operational tools for *Fusarium* wilts management. These are designed to recommend agroecological levers adapted to pedoclimatic contexts, cropping systems and technical itineraries.

**Keywords:** *Fusarium proliferatum*, *Fusarium oxysporum* (f. sp. *melonis*), garlic, melon, agroecological solutions, multi-criteria analysis and decision tools

### **1. Introduction**

Dans les années 2000, l'augmentation de la pression sanitaire occasionnée par les fusarioses, dont les agents responsables sont des champignons du genre *Fusarium* hébergeant de nombreuses espèces pathogènes, causent des dégâts majeurs dans les cultures avec des conséquences agronomiques et économiques fortes. Les filières du melon et de l'ail portent en effet des enjeux économiques importants, liés à la spécialisation des bassins de production et aux périmètres de production sous signes de qualité. Le projet SYNERGIES a porté plus spécifiquement sur la fusariose vasculaire du melon causée par *F. oxysporum* f. sp. *melonis* (*Fom*) et la fusariose de l'ail causée majoritairement par *F. proliferatum* (Chrétien, 2021). Les symptômes se caractérisent par le jaunissement des feuilles du melon et un flétrissement de la plante pouvant aboutir à sa mort. Ces symptômes s'expliquent par le développement du champignon dans les tissus vasculaires de la plante, réduisant voire stoppant l'alimentation hydrique de celle-ci. Dans le cas de la fusariose de l'ail, les symptômes se manifestent par des pourritures racinaires en cours de culture, mais surtout par la pourriture des caïeux durant la période de stockage-séchage.

L'objectif final du projet était de gérer les maladies telluriques provoquées par *Fusarium spp.* en cultures légumières (ail et melon), en mobilisant des leviers agroécologiques. Les objectifs opérationnels étaient les suivants :

- Caractériser l'état sanitaire des sols par rapport aux fusarioses d'origine tellurique. Une cartographie dresse un premier bilan des pratiques culturales et des leviers de protection mis en œuvre, de leur efficacité, des systèmes de cultures et des zones les plus touchées.
- Comprendre l'impact des fusarioses sur la physiologie des plantes infestées et étudier la réceptivité des sols aux fusarioses.
- Caractériser les leviers agroécologiques (composts) et étudier leur intérêt lorsqu'ils sont utilisés seuls ou en combinaison avec d'autres leviers agroécologiques.
- Développer des outils opérationnels de gestion des maladies, permettant la préconisation et la diffusion de leviers agroécologiques adaptés à un contexte donné.

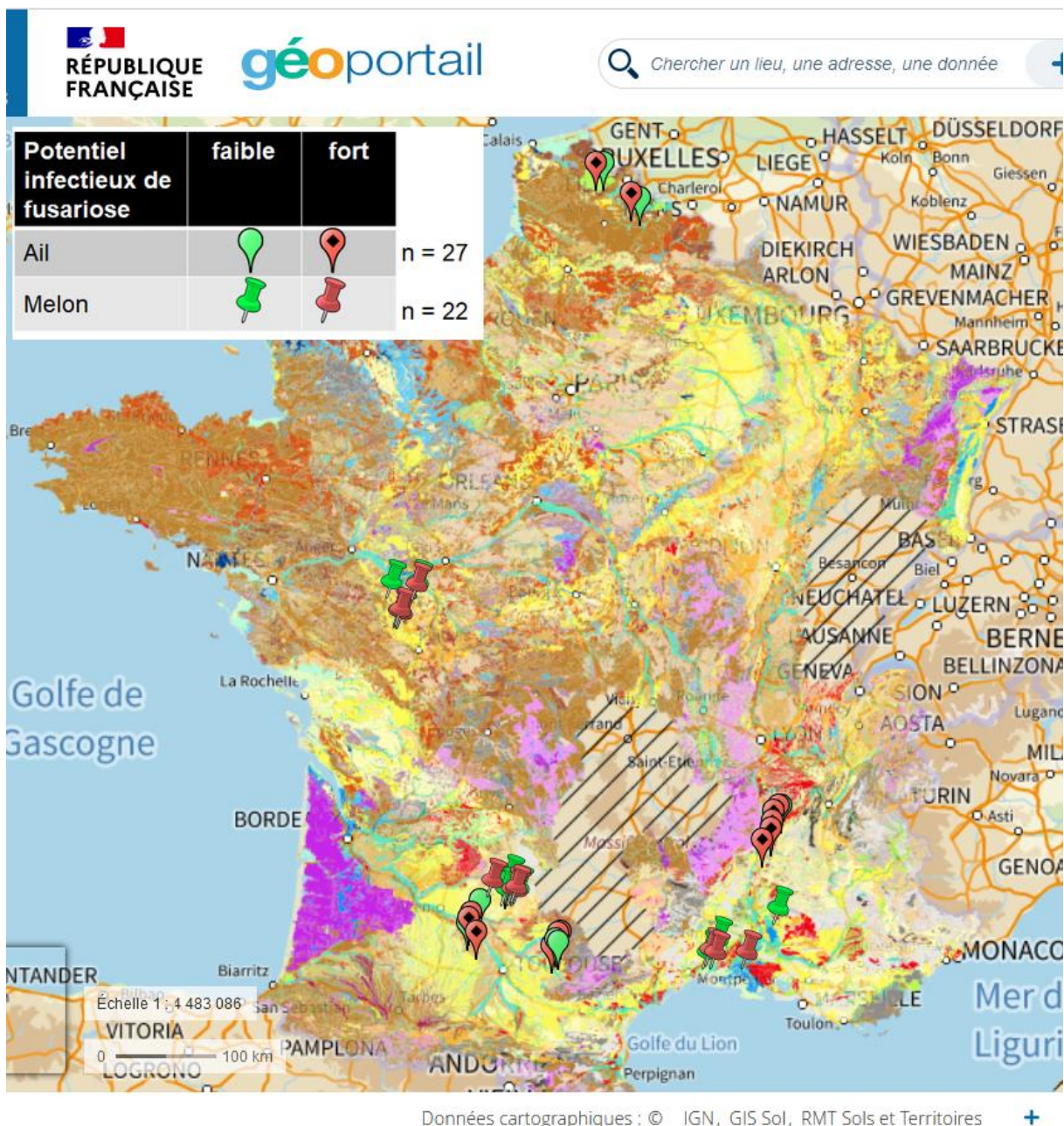


## 2. Quantification et spatialisation des fusarioses de l'ail et du melon et des leviers

Cette action avait deux objectifs principaux : 1/ connaître la répartition spatiale des fusarioses et les déterminants de leur apparition pour l'ail et le melon ; 2/ étudier des leviers agroécologiques disponibles dans la zone d'étude et permettant de contrôler les fusarioses.

### 2.1. Etat sanitaire des sols : suivi d'un réseau de parcelles dans les principaux bassins de production

Le réseau de parcelles a été organisé en sélectionnant des couples de parcelles avec un potentiel infectieux de fusariose variable : 2-5 couples de parcelles ont été retenus selon les partenaires, par bassin de production (Figure 1 ; ail = Nord Pas-de-Calais, Drôme, Occitanie ; melon : Centre-Ouest, Occitanie, Provence-Alpes Côte d'Azur). Au total, 49 parcelles ont été échantillonnées et enquêtées.







**Figure 1** : Carte des 49 parcelles échantillonnées dans SYNERGIES et projection sur la couche sol du Géoportail (<https://www.geoportail.gouv.fr/carte>) présentant les grands types de sol. Le potentiel infectieux de fusariose estimé (basé sur la campagne d'enquêtes) des parcelles est indiqué

### 2.1.1. Enquête des pratiques culturales sur les parcelles d'ail et de melon

Pour chaque parcelle enquêtée, les pratiques ont été caractérisées, à savoir les précédents culturaux, l'environnement de la parcelle, les caractéristiques de sols, la préparation des sols avant plantation, la conduite de la culture et, pour l'ail spécifiquement, les conditions de séchage et de stockage des récoltes.

### 2.1.2. Analyses des sols des parcelles

Des analyses physico-chimiques, mesures de biomasse microbienne et tests de réceptivité ont été réalisés sur les échantillons prélevés dans chaque parcelle enquêtée. Par souci de simplification, le sol de chaque parcelle du projet a été rattaché à un type de sol de l'unité cartographique de sol issue des Référentiels Régionaux Pédologiques (Géoportail, Figure 1), en validant avec les résultats d'analyses physico-chimiques. Pour avoir des groupes de taille suffisante dans les analyses statistiques, certains sols ont ensuite été regroupés pour intégrer la variable « type de sol » comme variable intégrative supplémentaire dans les analyses : c'est le concept de grands ensembles de références (AFES, 2008) qui a été retenu pour réaliser ce regroupement.

### 2.1.3. Identification des paramètres pédologiques et de gestion du sol discriminants

L'objectif était d'intégrer l'ensemble des variables liées aux caractéristiques du sol et à sa gestion pour identifier des déterminants agropédologiques des fusarioses de l'ail et du melon. Une sélection des variables pertinentes issues des enquêtes a donc été réalisée pour ne pas créer de bruit de fond dans les analyses statistiques.

Les résultats des analyses statistiques ([https://rd-agri.fr/detail/DOCUMENT/acta\\_318](https://rd-agri.fr/detail/DOCUMENT/acta_318)) montrent que les paramètres du sol (bio-physico-chimiques ou liés aux pratiques) ne permettent pas d'expliquer l'intensité de la fusariose sur les parcelles d'ail. Le seul paramètre qui apparaît comme significatif est la teneur en bore, avec une valeur moyenne plus faible dans les parcelles dont l'historique de fusariose est faible. Cependant la différence entre les valeurs moyennes pour les deux historiques, faible et fort, de fusariose reste faible (0,22 mg/kg contre 0,30 mg/kg). Comme d'autres cultures sont présentes dans la rotation et que ces valeurs sont proches des seuils de carence (notamment des céréales), il paraît peu pertinent de faire des recommandations basées sur ce résultat. Pour les parcelles de melon, les teneurs en limons, manganèse, sulfates (et, dans une moindre mesure, en calcaire total) et le pH (eau) permettent de différencier les parcelles dont l'historique de fusariose est faible de celles dont il est fort. Du côté des variables « gestion du sol », l'apport d'amendement organique est la variable qualitative la plus associée à l'historique de fusariose des parcelles (les parcelles ayant bénéficié d'un apport d'amendement organique ont un historique de fusariose faible). Comme pour l'ail, ces résultats ne sont pas valorisables de manière opérationnelle. On peut cependant recommander de privilégier les parcelles à texture plus grossière, qui, dans notre échantillon, sont associées à un historique de fusariose faible.

Le nombre réduit de variables identifiées comme discriminantes du risque infectieux associé à l'historique de fusariose dans ces analyses exploratoires a deux origines principales : 1/ la taille réduite du jeu d'échantillons de parcelles, qui a un fort impact sur la puissance des tests statistiques ; 2/ dans le cas de l'ail, l'historique de fusariose ne semble pas lié aux paramètres édaphiques, laissant supposer que l'hypothèse d'un inoculum de *Fusarium* majoritairement tellurique pour la fusariose de l'ail, sur laquelle était basée la démarche scientifique du projet, n'était pas exacte.



#### 2.1.4. Difficultés dans l'estimation du potentiel infectieux

Fusariose de l'ail et fusariose du melon : pour les deux pathosystèmes, on parle de fusariose mais il s'agit de deux maladies différentes avec pour point commun une apparition des symptômes qui n'est pas concomitante à l'infestation de la plante par l'agent pathogène. Celui-ci est latent. Dans le cas de la fusariose de l'ail, *F. proliferatum* va se manifester essentiellement pendant la phase de séchage-stockage des caïeux et selon les conditions de conservation. Dans le cas de la fusariose du melon, il peut se manifester tout au long de la culture. Ainsi, pour chacun des deux pathosystèmes, il est très difficile d'estimer un potentiel infectieux. Les outils moléculaires permettant de détecter, voire de quantifier les inoculum pathogènes doivent être spécifiques (il n'y a pas à ce jour d'amorces spécifiques permettant de discriminer *F. oxysporum* f. sp. *melonis* des autres *F. oxysporum* présents dans le sol ou dans la plante). Ils doivent également pouvoir cibler la source d'infection (les semences, le sol, l'eau, l'air, des plantes adventices) et l'activité potentielle (seuil quantitatif, conditions d'expression) de cet inoculum. Au mieux, pour la fusariose du melon, il est possible d'apprécier la réceptivité du sol à la maladie (ce qui a été tenté dans ce projet) en intégrant également l'historique de la parcelle, mais pour la fusariose de l'ail, aucun test n'est encore disponible pour une telle évaluation et un des challenges du projet a été de chercher les moyens d'établir un tel diagnostic préventif.

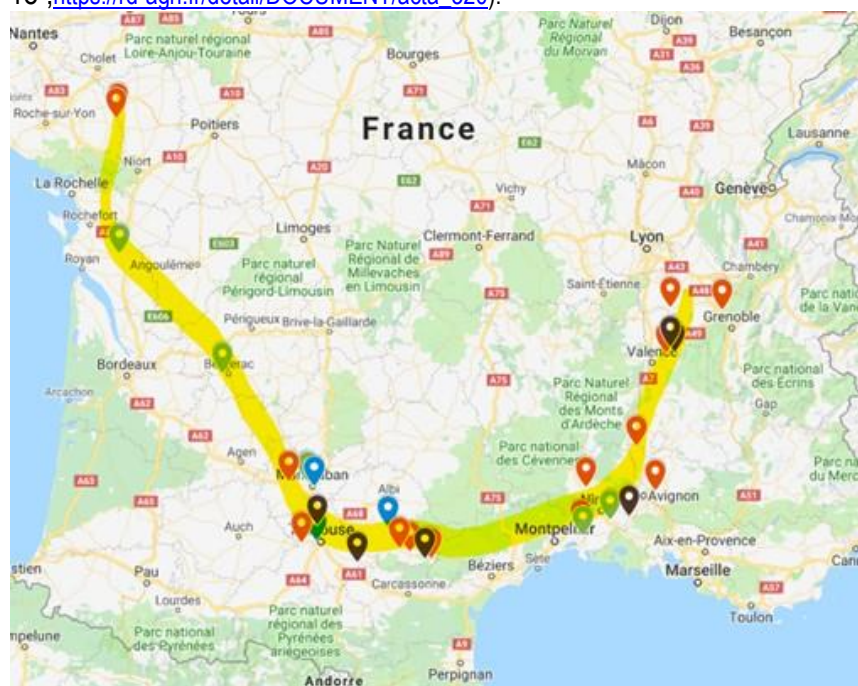
## 2.2. Etat des lieux des leviers agroécologiques

### 2.2.1. Les leviers mis en œuvre

Dans l'objectif de produire une synthèse sur les leviers agroécologiques mobilisables contre la fusariose, les partenaires « experts » ont été consultés pour identifier l'ensemble des leviers déjà mis en œuvre sur le terrain ([https://rd-agri.fr/detail/DOCUMENT/acta\\_321](https://rd-agri.fr/detail/DOCUMENT/acta_321)).

### 2.2.2. Cas du levier apport de compost

Un état des lieux des productions de composts disponibles dans la plupart des bassins de production de l'ail et du melon a été réalisé en organisant des visites de compostières dans le quart Sud-Est, le Sud-Ouest et l'Ouest de la France (Figure 2). Les 14 plateformes de compostage visitées ont été sélectionnées selon plusieurs critères tels que : quantité de compost produit, matières premières, recommandations de partenaires, etc., et des échantillons de compost ont été prélevés pour analyses lors des visites (n = 18 ; [https://rd-agri.fr/detail/DOCUMENT/acta\\_320](https://rd-agri.fr/detail/DOCUMENT/acta_320)).



**Figure 2 :** Cartographie des sites de compostage identifiés et non visités (vert), visités (rouge) et des partenaires (bleu = stations expérimentales ; noir = chambres d'agriculture)



### 3. Amélioration des connaissances sur les leviers de la fusariose

Cette action avait deux objectifs principaux : 1/ évaluer l'efficacité de plusieurs leviers agroécologiques précédemment identifiés vis-à-vis de la protection de l'ail et du melon contre les fusarioses et 2/ comprendre les processus impliqués dans la protection de l'ail et du melon selon les variables pédoclimatiques et selon les systèmes de cultures.

#### 3.1. Caractérisation des composts, des sols et des plantes

##### 3.1.1. Analyses et sélection des composts pour les essais

L'effet suppressif des composts a été mesuré en conditions contrôlées pour différents pathogènes telluriques : *Pythium ultimum*, *Rhizoctonia solani* et *F. oxysporum*. Le caractère suppressif des composts vis-à-vis des fusarioses vasculaires a été mesuré en utilisant le modèle établi (protocole INRA, Alabouvette et al., 1982) sur le pathosystème lin+*F. oxysporum* f. sp. *lini*. Ce protocole a une valeur générale pour l'ensemble des fusarioses vasculaires et en outre, sa mise en œuvre est plus facile avec du lin qu'avec du melon du fait de la faible taille de la plante et de la courte durée du test (50 jours). Les composts ont été inoculés avec des concentrations croissantes en *F. oxysporum* (0, 3000 et 5000 conidies/ml ; 16 répétitions) puis l'état physiologique des plants de lin a été suivi. Les plants infestés ont été dénombrés deux fois par semaine pendant 7 semaines. Une courbe de progression de la maladie pour chacun des composts permet de calculer l'aire sous cette courbe (ou AUDPC pour Area Under the Disease Progress Curve) et ainsi de sélectionner les composts permettant de limiter au plus l'évolution de la maladie. La sélection des composts s'est opérée selon les critères suivants : effets suppressifs sur les pathogènes sus-cités, analyses chimiques, type de matière première, provenance géographique, qualité du site et du processus de compostage et intérêt porté par les compostières au projet. Pour chacun des essais du projet, des analyses chimiques actualisées des composts sélectionnés ont été réalisées avant l'établissement d'un protocole d'apport des composts. Quatre composts ont été sélectionnés en 2020, puis deux autres composts en 2021, pour réaliser les essais au champ, sur ail et melon. L'ensemble des données de caractérisation des composts : composition chimique, la phytotoxicité ([https://rd-agri.fr/detail/DOCUMENT/acta\\_322](https://rd-agri.fr/detail/DOCUMENT/acta_322)) et l'effet suppressif des composts ([https://rd-agri.fr/detail/DOCUMENT/acta\\_323](https://rd-agri.fr/detail/DOCUMENT/acta_323)) est disponible.

##### 3.1.2. Tests de réceptivité des sols

De nombreux essais ont été mis en place pour développer un test de réceptivité des sols à la fusariose de l'ail en identifiant une plante hôte sensible à l'activité pathogène de *F. proliferatum* dans le sol. Sur l'ensemble des plantes-hôtes testées, seul le fraisier s'est révélé sensible mais avec une forte variabilité entre répétitions, de la mortalité dans les témoins non-inoculés et une apparition tardive des symptômes. A l'heure actuelle, cela ne permet pas de proposer un test de réceptivité des sols à la fusariose de l'ail (Villeneuve et al., 2021).

Pour le melon, les tests de réceptivité des sols à la fusariose (avec *F. oxysporum* f. sp. *lini* + lin) ont été réalisés sur 22 sols tamisés avec différentes doses d'inoculum. Une notation régulière des symptômes a permis de suivre l'évolution de la maladie. La compilation des AUDPC de chaque sol pour les trois répétitions révèle une variabilité intra- et inter-répétitions importante, bien que des conditions standardisées aient été mises en place. Cette forte variabilité n'a pas permis d'établir un classement des parcelles vis-à-vis de leur réceptivité à la fusariose du melon. Le test de réceptivité doit encore être affiné afin de garantir la fiabilité des résultats.



### 3.2. Tests des leviers : essais en conditions contrôlées et essais au champ

Des essais impliquant l'ail ou le melon ont été mis en place pour répondre à l'objectif de comprendre les processus impliqués dans l'efficacité des leviers agroécologiques selon les variables pédoclimatiques et selon les systèmes de culture.

#### 3.2.1. Essais pour l'ail

Les expérimentations en conditions semi-contrôlées ont pour but d'évaluer la pertinence des composts identifiés pour lutter contre la fusariose de l'ail (cf. § 3.1.1). Ils sont confrontés à l'inoculation de *F. proliferatum* dans un substrat de culture. Pour consolider ces résultats, des essais ont ensuite été conduits en conditions de production, dans des parcelles d'agriculteurs.

En 2019, le premier essai en conditions semi-contrôlées a évalué l'intérêt de deux composts (compost Tradivert = végétaux ligneux et compost de marc de raisin) ainsi que d'un produit de biocontrôle (Asperello® T34 Biocontrol = *Trichoderma asperellum*). Aucun de ces leviers n'a montré d'efficacité particulière pour réduire les attaques de fusariose sur l'ail. En revanche, des symptômes se sont développés dans des modalités cultivées dans un substrat composé de terreau et n'ayant reçu aucune inoculation de *F. proliferatum*. L'agent pathogène proviendrait donc d'une autre source que l'apport effectué.

En 2020, les essais en conditions de production ont permis de tester trois composts différents (compost B = mélange de déchets verts et de fumier de dinde à 14 t/ha ; compost D = compost de déchets verts à 22 t/ha ; compost I1 = compost de déchets traités issus de l'industrie agroalimentaire et de l'agriculture : fumier de mouton, tourteaux végétaux à 12,6 t/ha). Bien que le compost D semble avoir réduit le nombre de bulbes présentant des symptômes de fusariose après séchage, aucun de ces composts n'a permis de maîtriser la fusariose de l'ail.

En 2021, deux composts (compost A2 = compost de déchets verts à 15 t/ha ; compost H = compost de marc de café, de pulpe d'olive, de feuille de vigne, de marc d'œillette et de pulpe de raisin à 15,8 t/ha) et un produit de biocontrôle (BLINDAR = *Trichoderma gamsii* ICC080 et *T. asperellum* ICC012 T25 et TV1) ont été testés seuls (au champ) ou en combinaison avec le BLINDAR en conditions semi-contrôlées mais aucun effet n'a été constaté sur la fusariose de l'ail. Par contre, des symptômes de fusariose se sont à nouveau manifestés dans des modalités n'ayant pas reçu d'inoculum de *F. proliferatum*.

Les travaux d'expérimentation conduits n'ont pas permis d'identifier de solutions agroécologiques efficaces contre *F. proliferatum*. Cependant, les essais ont montré que **l'hypothèse de départ indiquant que ce pathogène serait tellurique est au moins en partie erronée** puisque des symptômes ont été retrouvés sur des caïeux cultivés sur un substrat désinfecté et non-inoculé. Cela explique en partie l'inefficacité des leviers étudiés, qui avaient été identifiés pour lutter contre un pathogène tellurique. Les comptes-rendus détaillés des essais réalisés pour le volet ail sont disponibles ([https://rd-agri.fr/detail/DOCUMENT/acta\\_328](https://rd-agri.fr/detail/DOCUMENT/acta_328)).

#### 3.2.2. Essais pour le melon

Des essais préliminaires en conditions contrôlées ont été menés en 2019 et 2020 pour comparer des leviers simples puis tester des combinaisons de leviers. En 2019, 3 composts d'origines et de compositions diverses ont été testés en cellule climatique sur deux sols sensibles aux fusarioses vasculaires. Les différents composts ont été apportés à la dose de 10% (volume/volume), correspondant à une dose au champ comprise entre 100 t/ha et 140 t/ha. Tous les apports de composts dont celui de déchets verts complété de fumier de dinde composté ont réduit la sensibilité des deux sols étudiés à la fusariose mais les réductions observées ne sont pas significatives car la variabilité des résultats est très importante. En 2020, différentes combinaisons associant des composts différents ou des composts avec d'autres types d'amendement (pellet de moutarde, microorganismes) ont été apportées au sol en





conditions contrôlées et au champ. L'expérimentation a été reconduite en 2021 avec des composts différents apportés au champ uniquement (Tableau 1).

En conditions contrôlées, les effets suppressifs des composts observés lors de précédents essais n'ont pas pu être mis en évidence. Il est probable que les doses de compost apportées n'aient pas été suffisantes pour améliorer la résistance des sols. Il est également possible que le nombre d'applications ne soit pas suffisant pour procurer au sol des propriétés de suppression des maladies. Sur le sol de Balandran, l'apport de BioFence (biofumigation) accroît fortement la mortalité, de même que l'apport de compost complété d'antagonistes. L'effet négatif de la biofumigation est certainement lié à l'apport d'azote excessif des pellets de moutarde. La mycorhization réduit la mortalité précoce des plants, mais cette différence n'est pas significative.

**Tableau 1** : Combinaisons de leviers testées en conditions contrôlées (essais réalisés au CTIFL de Balandran) et au champ (essais réalisés par les stations expérimentales de l'ACPEL et SudExpé) contre la fusariose du melon

Modalités	testées par
Essai conditions contrôlées 2020 = variété Arapaho ; sols = Balandran (30) et Lansargues (34)	
Témoin	CTIFL : 2 sols
Apport de compost B (fumier de dinde (¼ v/v) et déchets verts (¾ v/v) ; 12,5 t MF/ha)	CTIFL : 2 sols
Apport de compost C (déchets verts ; 18,75 t MF/ha)	CTIFL : 2 sols
Apport de compost C (déchets verts ; 18,75 t MF/ha) + apport de microorganismes antagonistes	CTIFL : 2 sols
Apport de compost C (déchets verts : 18,75 t MF/ha) + mycorhization ( <i>Glomus intraradices</i> ) avant mise en place de la culture	CTIFL : 2 sols
Biofumigation du sol (pellets de moutarde BioFence) + apport de microorganismes antagonistes	CTIFL : 2 sols
Essai au champ 2020 : essai ACPEL = variété Hugo ; essai SudExpé = variété Silvio	
Témoin	ACPEL, SudExpé
Apport de compost B (fumier de dinde et déchets verts ; 12,5 t MF/ha)	ACPEL, SudExpé
Apport de compost C (déchets verts ; 18,75 t MF/ha)	ACPEL, SudExpé
Apport de compost C (déchets verts ; 18,75 t MF/ha) + apport de microorganismes antagonistes	ACPEL
Biofumigation du sol (pellets de moutarde BioFence 1,5 t/ha) + apport de microorganismes antagonistes	ACPEL
Essai au champ 2021 : essai ACPEL = variété Hugo ; essai SudExpé = variété Arapaho	
Témoin	ACPEL, SudExpé
Apport de compost A2 (déchets verts ; 8,1 t/ha* et 17,96 t/ha§)	ACPEL*, SudExpé§
Apport de compost H (marc de raisin, café et pulpe d'olive ; 8,5 t/ha)	ACPEL, SudExpé
Apport de compost commercial Fertil (fumiers divers,ensemencés de bactéries ; 7 t/ha)	ACPEL



Apport de compost H (marc de raisin, café et pulpe d'olive ; 8,5 t/ha) + mycorhization	ACPEL
Apport de compost H (marc de raisin, café et pulpe d'olive ; 8,5 t/ha) + Rhapsody ( <i>Bacillus subtilis</i> )	ACPEL

Concernant les essais au champ, le compost de déchets inoculé avec des microorganismes antagonistes a ralenti l'expression des dégâts, mais les résultats ne sont pas significativement différents. Par ailleurs, nos résultats semblent montrer que les microorganismes apportés conjointement avec l'apport de BioFence aient été détruits suite à la biodésinfection, rendant cette combinaison de leviers inefficace. En conclusion, dans les conditions de l'essai (attaque de fusariose tardive et modérée, présence de campagnols qui ont perturbé l'expérimentation), aucune autre modalité n'a présenté de réduction de symptômes de fusariose. En 2021, l'intensité des dégâts dans la parcelle d'essai ACPEL a été très forte mais aucune modalité testée n'a eu d'effet sur l'apparition et sur la vitesse de dépérissement des plantes (dont la fusariose). A SudExpé, la pression de fusariose a été relativement faible avec le nombre de plants sains diminuant tout au long du cycle et le témoin présentant plus de 30% de plants atteints et morts à la fin de l'essai. A ce stade, toutes les modalités d'essai présentent un pourcentage de plants sains supérieur au témoin. Bien que la différence ne soit pas significative, ce résultat souligne les limites des leviers qui ne seraient efficaces qu'en situation de faible pression pathogène.

Les travaux d'expérimentations n'ont pas permis, dans la durée de l'expérimentation, d'identifier de solutions agroécologiques efficaces parmi celles qui ont été testées pour lutter contre *Fusarium oxysporum f. sp. melonis* en culture de melon. Certaines techniques, comme la biofumigation, ont par ailleurs montré un effet potentiellement négatif : en augmentant l'azote disponible, la biofumigation peut augmenter la sensibilité des plantes mais également affecter la microflore du sol et faciliter le développement de *F. oxysporum f. sp. melonis*.

Les comptes-rendus détaillés des essais réalisés pour le volet melon sont disponibles ([https://rd-agri.fr/detail/DOCUMENT/acta\\_332](https://rd-agri.fr/detail/DOCUMENT/acta_332)).

### 3.2.3. Comment expliquer l'absence d'efficacité des leviers testés ?

Les expérimentations effectuées au champ sont très dépendantes des conditions environnementales variables d'une année sur l'autre, ce qui explique qu'il soit difficile d'avoir des résultats statistiquement significatifs, particulièrement lorsque les modalités sont testées pendant seulement deux années consécutives, durant lesquelles l'expression de la maladie peut varier de manière importante. Néanmoins, les observations rapportées par les expérimentateurs fournissent des indications pertinentes qu'il convient de prendre en compte dans les conclusions à tirer de l'ensemble de ces expérimentations.

Une des raisons pouvant expliquer le manque de résultat concerne le fait que l'agent pathogène pénètre dans le système racinaire du melon ou de l'ail à n'importe quel endroit. Il faudrait donc prévoir d'importants apports de composts ou de microorganismes, dont les champignons mycorhiziens, sur l'ensemble du sol rhizosphérique. Mais un apport important peut provoquer d'autres problèmes (ex : apport d'azote excessif). Un important travail de recherche sur les modes d'action que pourraient avoir les composts reste aussi nécessaire pour déterminer s'ils agissent directement sur l'agent pathogène *F. oxysporum f. sp. melonis* (ou *F. proliferatum*), indirectement sur la microflore du sol susceptible de contrôler les agents pathogènes, ou sur l'élicitation des réactions de défense de la plante.

Pour l'ail, il est important de mettre en avant l'apparition de symptômes de fusariose en conditions contrôlées et dans des modalités n'ayant pas été inoculées ce qui a poussé les partenaires à faire des analyses sur les lots de caïeux reçus avant la plantation. Il s'avère que des *Fusarium spp.* sont déjà présents dans les tissus, avant même la mise en terre. Cela confirme leur capacité à se trouver sous forme endophyte dans les tissus des caïeux, c'est à dire asymptomatique. Ces observations sont



cohérentes avec la découverte par Mondani *et al.* (2018) de *F. proliferatum* dans des caïeux asymptomatiques après six mois de stockage. Cette découverte a un impact important sur l'efficacité des leviers étudiés. En effet, les propriétés suppressives des composts ne peuvent rien contre un agent pathogène qui n'est pas tellurique, puisqu'elles n'impactent que le sol cultivé. A posteriori, l'absence d'efficacité des composts évalués s'explique mieux si l'on considère *F. proliferatum* comme un pathogène au moins en partie endophyte. Le BLINDAR ayant un mode d'action préventif empêchant l'entrée des agents pathogènes dans les blessures, il semble cohérent qu'il ne soit pas efficace contre un agent pathogène déjà présent dans la plante à protéger. De même, l'un des modes d'action de l'Asperello® T34 Biocontrol est la formation d'une barrière sur le système racinaire pour empêcher l'entrée des agents pathogènes.

Pour le melon, il aurait été pertinent d'augmenter la durée de l'expérimentation et/ou répéter les apports. En effet, des essais sur plus d'une saison culturale, notamment pour les apports de compost auraient permis au sol d'acquérir des propriétés suppressives et faire évoluer les communautés microbiologiques. Au champ, les résultats d'essais sont plus aléatoires et cela est dû aux souches de *Fom* d'agressivité variable, aux conditions pédoclimatiques qui impactent à la fois le développement du champignon et l'efficacité des facteurs, à la présence d'autres maladies et ravageurs, et aussi au caractère suppressif naturel des sols, tel que cela a été mis en évidence dans le projet. Cependant, la validation d'un levier ou combinaison de leviers dans le cadre d'essais au champ semble incontournable. Pour arriver à identifier des leviers agroécologiques efficaces, il faut progresser dans l'épidémiologie de la fusariose du melon et mieux connaître l'influence des facteurs abiotiques et biotiques sur le développement de l'agent pathogène. Les techniques de biologie moléculaire (*e.g.* qPCR) permettraient de quantifier plus finement l'effet de certains leviers sur les populations de *Fom* mais on ne dispose toujours pas de marqueurs génétiques spécifiques des formes spéciales de *F. oxysporum* (et ici particulièrement *Fom*), ce développement est donc nécessaire.

### 3.3. Caractérisation des métabolismes primaires et secondaires des plantes

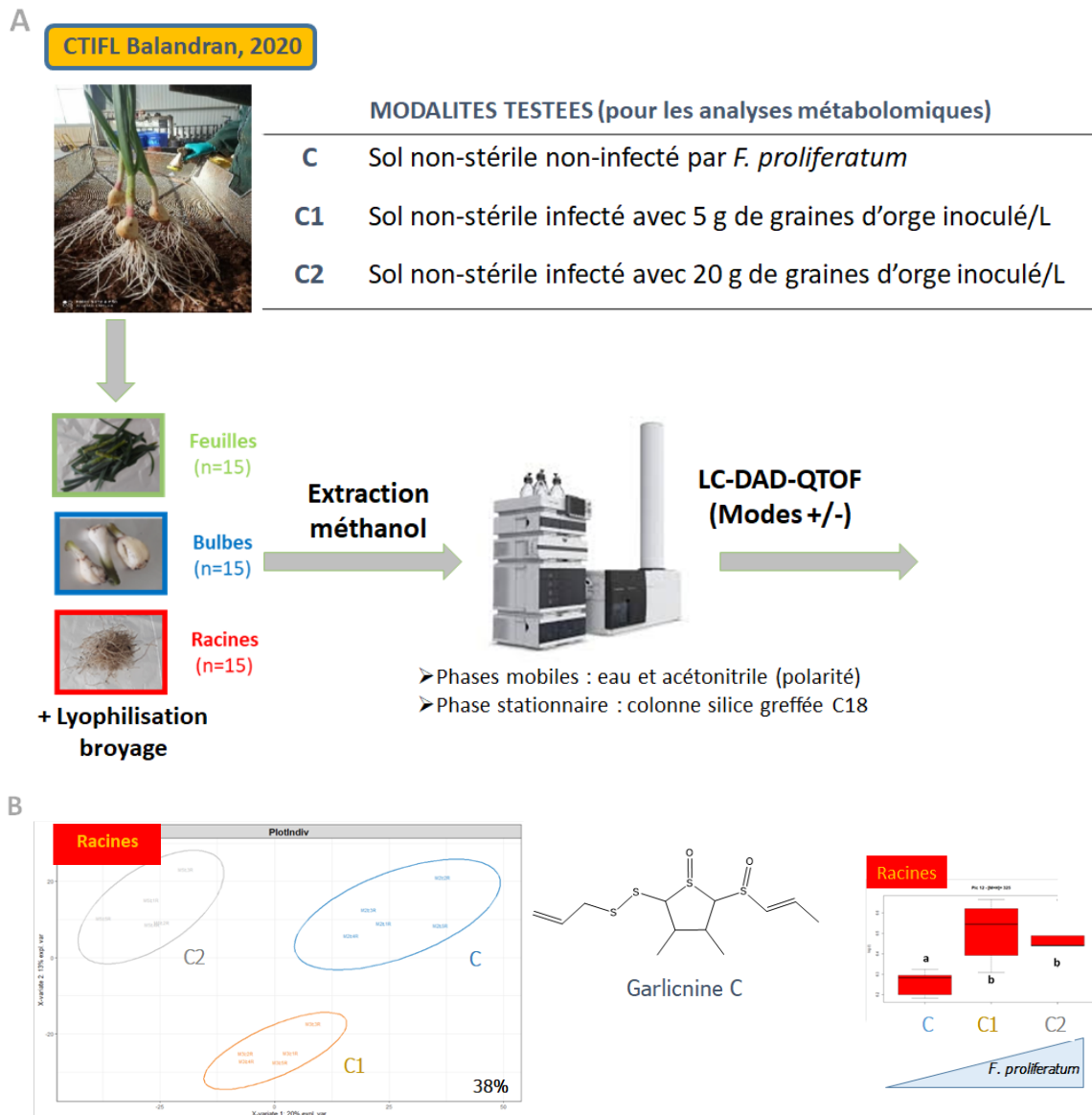
Les approches métaboliques développées avaient pour objectif d'identifier si des métabolites végétaux primaires ou secondaires pouvaient être identifiés comme des marqueurs moléculaires des fusarioses de l'ail et du melon, à des stades précoces de la culture de l'ail et du melon, c'est-à-dire lors de la phase asymptomatique. Il était nécessaire d'avoir des plantes présentant des niveaux d'attaque de fusariose contrastés, sur ail et melon, afin d'identifier de potentiels marqueurs puis d'évaluer la validité de ces marqueurs moléculaires en serre et au champ lors de l'évaluation des effets suppressif des composts. Il était initialement prévu de réaliser en parallèle une caractérisation par metabarcoding de la microflore fongique et bactérienne associée à l'acquisition de résistance aux fusarioses après application de leviers (Steinberg *et al.*, 2019). Ces analyses de la diversité microbienne des sols ont été abandonnées du fait de l'absence de réduction significative de la sévérité de la fusariose quels que soient les leviers testés (composts avec ou sans apports microbiens supplémentaires) dans les essais en conditions semi-contrôlées. L'absence de ces analyses a compliqué l'interprétation des analyses métaboliques.

Les analyses métaboliques ont été menées sur des plants d'ail et melon prélevés dans les expériences en conditions contrôlées ou en serre. Une extraction solide-liquide des échantillons a été réalisée, pour les plants d'ail, sur 3 compartiments isolés et traités séparément (*i.e.* racines, feuilles et bulbes) et pour les plants de melon et lin, sur 2 compartiments (*i.e.* les tissus racinaires et les parties aériennes). Après extraction au méthanol, les échantillons ont été analysés par LC-DAD-QTOF pour les métabolites secondaires et GC-MS pour les métabolites primaires, et les données ont été traitées à l'aide de l'infrastructure Workflow4metabolomics (INRAE) et par des analyses multivariées sous R. Seuls les résultats pour l'ail (les plus aboutis) sont présentés ici.

Pour les plants d'ail provenant des tests mis en place par le CTIFL de Balandran en 2020 qui visaient à comparer l'impact de doses croissantes de *F. proliferatum* sur l'ail, l'analyse supervisée du métabolisme secondaire par compartiment permet de discriminer les différentes modalités testées (Figure 3), quel que



soit le compartiment (avec une meilleure séparation sur les racines). Ceci est à mettre en regard avec les résultats obtenus au CTIFL de Balandran sur l'intensité des nécroses racinaires et des attaques sur bulbes à la conservation, qui sont significativement différents entre les modalités. Lorsque les conditions sont contrastées en termes de niveau de fusariose de l'ail, on observe bien des différences sur le métabolisme secondaire des plantes. En particulier des métabolites de la famille des Garlicnines sont davantage présents dans les racines des aulx infectés par *F. proliferatum* que dans le témoin. Ces composés soufrés ont été fréquemment retrouvés dans les espèces du genre *Allium* (Nohara *et al.*, 2021) et sont biosynthétisés à partir de l'Allicine (Diretto *et al.*, 2017). L'Allicine est un composé ayant une activité antifongique.



**Figure 3 :** (A) Analyse du métabolome spécialisé des échantillons de l'expérimentation CTIFL 2020 (aulx infectés avec des inoculum de *F. proliferatum* de tailles différentes ; C = témoin non-infecté, C1 = 5 g et C2 = 20 g de grains d'avoine infectés). (B) Analyse en composantes principales des données de métabolisme secondaire des aulx, montrant la séparation marquée des profils métaboliques des racines d'ail selon la taille de l'inoculum de *F. proliferatum*. Parmi les composés discriminants impliqués dans cette séparation, la garlicnine C, un métabolite de défense de l'ail, est en concentration significativement plus importante dans les aulx inoculés par *F. proliferatum* (Kruskall-Wallis,  $p < 0.05$ )





Ainsi, nous avons pu identifier plusieurs métabolites secondaires de type phytoalexines dont les abondances, à un stade précoce, sont plus importantes dans les plantes ayant été inoculées avec une taille d'inoculum élevée de *F. proliferatum*. Les compartiments racinaires et les bulbes correspondent aux tissus où le nombre le plus élevé de ses composés discriminants s'observent. Même s'il est encore difficile de l'affirmer, les composés impliqués dans la séparation des métabolomes de l'ail inoculé avec des niveaux de populations de *F. proliferatum* différents pourraient être de bons marqueurs de la maladie. Toutefois, ces marqueurs ont été identifiés, dans cet essai, sur la variété Edenrose. Dans les essais aux champs réalisés en 2020 et 2021 (cf. § 3.2.1), ces marqueurs ont été recherchés. La présence de ces métabolites a été observée dans les métabolomes des variétés, Flavor et Clédor, utilisées au champ. Ils n'ont cependant pas été produits différemment car les conditions de maladies au champ n'étaient pas assez contrastées.

Le métabolisme spécialisé de l'ail, ainsi que les réponses métabolomiques de cette culture aux fusarioses restent peu connus. Dans cette étude, seul un nombre limité de composés ont pu être annotés. Avec l'avancement des connaissances, nous pensons que de nouvelles identifications de marqueurs métaboliques discriminants pourront être réalisées notamment pour l'ail. D'autres travaux nécessiteront de valider l'utilisation de ces métabolites de défense ou de leurs voies de biosynthèse comme des marqueurs précoces de fusariose de l'ail.

Les résultats détaillés des analyses métaboliques du volet ail sont disponibles ([https://rd-agri.fr/detail/DOCUMENT/acta\\_325](https://rd-agri.fr/detail/DOCUMENT/acta_325)).

## 4. Co-construction des outils opérationnels de transfert

Un des objectifs du projet était de produire des outils opérationnels pour assister dans la lutte contre les fusarioses. Dans ce cadre, en s'appuyant sur une synthèse des résultats du projet et sur l'état des connaissances actuelles sur les deux pathosystèmes, les partenaires ont utilisé l'outil DEXi pour construire des outils d'évaluation multicritères de la maîtrise du risque de développement de la fusariose de l'ail et du melon. Ces outils sont destinés aux producteurs, conseillers techniques ainsi qu'aux expérimentateurs et acteurs de la recherche des deux filières.

### 4.1. Volet ail

En s'appuyant sur les résultats des enquêtes des 27 parcelles Ail, de l'expertise technique et scientifique des partenaires ainsi que d'éléments bibliographiques, il a été possible de développer un prototype de l'outil DEXi Fusariose de l'ail, destiné à cerner le risque d'une parcelle (Figure 4). La situation épidémiologique de cette maladie est très difficile à apprécier du fait de l'expression tardive des symptômes. Les connaissances rassemblées sont encore très partielles et peuvent évoluer dans les années à venir. Certaines connaissances manquantes sur l'ail ont été complétées par celles sur les fusarioses touchant d'autres cultures légumières ainsi que les céréales ou le maïs. Ces analogies ont essentiellement servi à enrichir l'arbre de décision par des pratiques défavorables à la maladie. Faute de connaissances spécifiques à *F. proliferatum*, ces critères doivent être interprétés avec prudence.

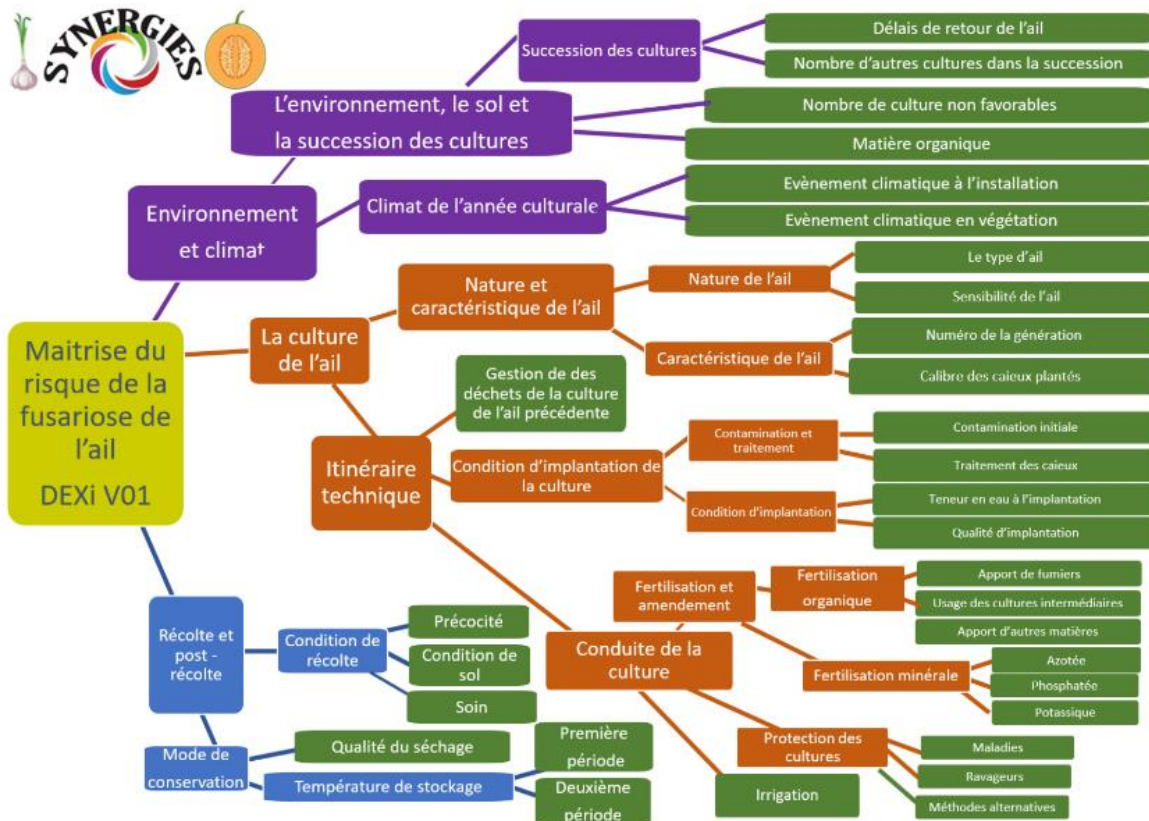


Figure 4 : Structure de l'arbre DEXi maîtrise de la fusariose de l'ail : en vert les critères de base de l'arbre ou « feuilles de l'arbre », les critères agrégés sont indiqués par les autres couleurs

A l'aide de cet outil, les parcelles du réseau ont été évaluées à partir des renseignements des enquêtes. Non prévus lors des enquêtes en 2019, quelques éléments manquaient pour renseigner complètement l'outil DEXi, ils ont été renseignés à titre de démonstration. Il a été possible d'identifier qualitativement les principales pratiques qui sont susceptibles d'exercer une influence sur la maladie. Différentes analyses statistiques ont été réalisées à partir des données des enquêtes, mais le faible effectif de l'échantillon n'a pas permis d'obtenir des résultats permettant de valider l'outil sur le plan statistique. **Un futur test pratique de l'outil par des groupes d'agriculteurs ou l'analyse d'un réseau de parcelles permettra d'améliorer les pondérations et la structure de l'outil.**

Malgré ces questions liées à l'interprétation des données, cette approche garde tout son intérêt et conserve l'avantage de donner une vision d'ensemble des facteurs pouvant avoir un effet sur la fusariose de l'ail.

#### 4.2. Volet melon

Dans la mesure où le nombre d'enquêtes réalisées (n = 22) était insuffisant pour la validation d'un arbre de décision et ne permettait pas de renseigner l'intégralité des critères identifiés, il a été décidé de construire deux arbres distincts, à savoir un arbre intitulé « arbre d'évaluation multicritère DEXi fusariose vasculaire du melon, version stabilisée », et un second intitulé « arbre d'évaluation multicritère DEXi fusariose vasculaire du melon, version exploratoire ».

La version stabilisée compile les connaissances actuelles sur l'agent pathogène et les leviers connus et validés permettant le contrôle de la fusariose en culture de melon. Cette version réunit les critères faisant consensus et pour lesquels des seuils ont pu être établis à partir de données expérimentales, de sources bibliographiques et/ou à dire d'experts.

La version exploratoire vise à mettre en lumière des éléments influant probablement le développement et l'expression de la fusariose vasculaire du melon, mais pour lesquels un manque de données de terrain



limite pour l'instant la validation du critère et l'établissement de seuils. Ce sont des pistes de recherches, d'expérimentations qu'il pourrait être intéressant de travailler à l'avenir pour permettre une compréhension des mécanismes associés.

### **4.3. Principe et limites des outils DEXi développés dans le projet SYNERGIES**

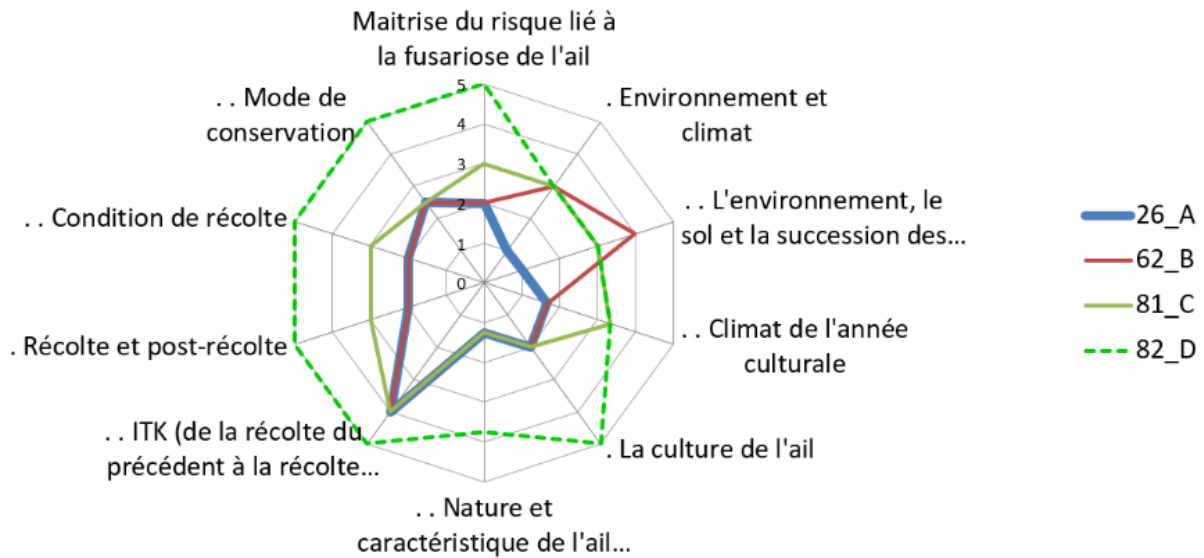
Les outils DEXi développés sont utiles pour la conception de systèmes innovants, permettant le contrôle de la fusariose en culture d'ail ou de melon, mais aussi un recueil des leviers pertinents à prendre en considération et sur lesquels il serait intéressant de se focaliser à l'avenir pour limiter le développement et l'expression de la fusariose. À travers une approche systémique, l'outil a pour objectif de caractériser les performances d'un système de culture vis-à-vis du risque de fusariose, en évaluant *a priori*, les risques d'expression de la maladie sur une parcelle.

L'outil DEXi fonctionne de la manière suivante :

- L'utilisateur renseigne les critères de base observés au niveau de sa parcelle. Ces critères sont regroupés par thèmes (agrégation et pondération). Par exemple la nature et les caractéristiques de l'ail/melon, l'itinéraire technique choisi sur la parcelle, l'environnement, le sol et la succession des cultures sur celle-ci, les conditions de récoltes ou modes de conservation de l'ail, etc.
- Le DEXi réalise un traitement mathématique permettant d'évaluer les risques de propagation de la fusariose à l'échelle de la parcelle en fonction des critères renseignés.
- L'outil délivre à l'utilisateur des graphes de synthèse de type radar lui permettant une meilleure interprétation des résultats en fonction des données renseignées pour chaque parcelle (Figure 5). L'évaluation peut se faire sur les critères agrégés.

Ces outils DEXi n'ont pas pu être validés expérimentalement en mobilisant les enquêtes menées auprès des producteurs. **Pour obtenir des outils plus opérationnels, il faudra collecter de nouvelles données sur le terrain et également progresser sur les connaissances concernant l'épidémiologie et la pathogénicité des *Fusarium*.** Néanmoins, l'élaboration des DEXi a été une expérience très enrichissante permettant les échanges entre chercheurs et conseillers pour avancer vers des solutions opérationnelles. Nous ne pouvons que conseiller l'utilisation de cet outil qui peut être mobilisé dans des contextes variés tels que d'autres maladies telluriques.

Pour chacun des volets Ail et Melon, un mode d'emploi du DEXi est disponible : Mode d'emploi de DEXi Fusariose de l'ail : Prototype d'outil d'évaluation multicritère en vue de la maîtrise du risque de développement de la fusariose de l'ail ([https://rd-agri.fr/detail/DOCUMENT/acta\\_338](https://rd-agri.fr/detail/DOCUMENT/acta_338)) et Mode d'emploi de l'arbre d'évaluation multicritères DEXi SYNERGIES volet melon : « Maîtrise du risque de fusariose vasculaire en culture de melon » ([https://rd-agri.fr/detail/DOCUMENT/acta\\_337](https://rd-agri.fr/detail/DOCUMENT/acta_337)).



**Figure 5 :** Sortie de l'outil DEXi maîtrise de la fusariose de l'ail, comparant 4 parcelles et leur risque par rapport à la fusariose de l'ail : La note 5 est la situation la plus favorable pour l'agriculteur et la moins favorable pour la maladie

## 5. Perspectives pour les filières ail et melon

Avant d'identifier une solution de lutte contre la fusariose de l'ail, il faudrait dans un premier temps se concentrer sur le cycle de vie de ce pathogène. En effet, une meilleure connaissance de son développement permettra d'identifier plus facilement les types de leviers mobilisables afin de protéger efficacement les cultures. Les résultats complémentaires des analyses des facteurs abiotiques affectant le champignon pathogène *F. proliferatum* pourraient pointer une piste à approfondir pour limiter le développement de la fusariose de l'ail : modifier les conditions de séchage et de stockage de l'ail pourrait limiter le développement de la maladie tout en maintenant la qualité et la longévité de l'ail. Le projet GARLIC (CASDAR <sup>1</sup>Semences et sélection végétale) porté par INRAE PV <sup>2</sup> a notamment pour objectif de mettre au point des méthodes de détection précoce de *F. proliferatum* dans les tissus de l'ail et d'assainissement des caïeux d'ail tout au long des générations de multiplication. De plus, il faudrait également essayer de comprendre les facteurs qui entraînent le passage de l'agent fongique de sa forme endophyte non-symptomatique à sa forme pathogène. Par ailleurs, le trempage des échalotes dans de l'eau chaude combinée à du vinaigre alimentaire a montré des résultats prometteurs contre la fusariose (essais Caté, 2020<sup>3</sup>). Cette technique serait peut-être à tester sur l'ail comme une prochaine piste de travail.

Concernant la fusariose du melon, la problématique *Fom* a évolué depuis le démarrage du projet : l'offre de variétés présentant de bonnes résistances (ou de faible sensibilité) à la fusariose a permis de limiter les dégâts en parcelle de producteur, même si des situations critiques sont parfois encore observées. Même s'il serait dangereux de penser que cette question de *Fom* est résolue, il est plus facile pour un producteur d'utiliser des variétés « à bon comportement » que de mettre en œuvre la pratique des composts suppressifs (complexe). Les autres pistes de recherche ne doivent cependant pas être

<sup>1</sup> Compte d'Affectation Spéciale Développement Agricole et Rural (Appel à projet du ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire).

<sup>2</sup> INRAE PACA Avignon, unité de Pathologie Végétale, UR 0407, F84143 Montfavet, France

<sup>3</sup> [http://itab.asso.fr/downloads/jt-intrants-2022/08\\_legoff-prat\\_cate\\_echalote\\_vinaigre.pdf](http://itab.asso.fr/downloads/jt-intrants-2022/08_legoff-prat_cate_echalote_vinaigre.pdf)





abandonnées car la résistance génétique doit s'accompagner de techniques alternatives afin de limiter les contournements de gènes de résistance. L'année 2023 montre et confirme bien que le progrès génétique est très important, mais qu'il ne sera pas suffisant seul. En effet, malgré l'utilisation de variétés résistantes *Fom* (ou à bon comportement vis à vis de *Fom*), on note d'importants dégâts de fusariose en 2023 dans le bassin Centre-Ouest (largement supérieurs aux précédentes années).

L'outil DEXi Melon développé dans le projet pourrait aider à lever une partie de la complexité mais il devra être validé avec des données de terrain plus nombreuses. Pour l'ail comme pour le melon, il pourrait être envisagé de s'appuyer sur le réseau DEPHY pour collecter les données nécessaires à la validation des deux outils DEXi.

Enfin, le travail fondamental sur les analyses métabolomiques reste à creuser et pourrait faire l'objet d'un autre projet de recherche. Il serait nécessaire de tester les variations d'abondance des métabolites, précédemment identifiés comme de potentiels marqueurs métaboliques précoces de la fusariose de l'ail. Il faudrait également avancer dans l'identification des métabolites potentiels car cette dernière permet de définir les voies de biosynthèse impliquées et de comprendre pourquoi ces dernières sont induites. Ceci pourrait permettre d'identifier les gènes responsables de la production des composés.

## 6. Conclusions

Les cibles du projet ont été diversifiées : producteurs, acteurs du compostage et conseillers techniques.

Le projet SYNERGIES a permis de progresser sur la connaissance des pathogènes et de leur écologie et a mis en évidence les lacunes concernant ces deux pathosystèmes particulièrement complexes : melon + *Fom* et ail + *F. proliferatum*. Pour maîtriser l'inoculum pathogène présent dans le sol et réduire son incidence sur les cultures, il est nécessaire de développer une stratégie globale combinant plusieurs pratiques de manière cohérente. L'ambition du projet était de tester des combinaisons de leviers. Aucune de celles qui ont été testées dans la durée du projet n'a produit de résultat significatif sur la maîtrise du risque de fusariose, ce qui ne veut pas dire qu'il n'en existe pas d'autres. Divers leviers de protection agroécologiques semblaient prometteurs en amont du projet : amendements organiques, organismes antagonistes, cultures associées, maîtrise de l'équilibre nutritif, etc. Cependant, maîtriser leur gestion nécessite de saisir l'influence des facteurs biotiques et abiotiques sur les agents pathogènes, à plusieurs échelles spatiales et temporelles. Les essais du projet ont mis en évidence les difficultés de gérer des systèmes aussi complexes et multifactoriels. Ce projet a permis le développement de prototypes d'outils opérationnels d'aide au choix pour des stratégies appropriées (combinant différents leviers) selon les milieux pédoclimatiques et les systèmes de culture, permettant aux producteurs et à leurs conseillers d'évaluer le risque de développement des fusarioses en culture d'ail et de melon.

Le travail de synthèse effectué lors de la réalisation de l'outil d'évaluation multicritères DEXi sur la maîtrise du risque de *F. proliferatum* en culture d'ail a mis en évidence le manque de connaissances concernant ce champignon. Il est donc nécessaire dans un premier temps de caractériser son cycle de vie pour comprendre ses exigences écologiques et pouvoir proposer des leviers mobilisables protégeant efficacement les cultures. D'autres pistes de solutions pour lutter contre la fusariose de l'ail sont explorées (qualité sanitaire des plants, stockage, conservation) avec la réalisation de l'outil DEXi. Ces prototypes pourront être incrémentés au cours de leur utilisation par les professionnels au sein des filières respectives pour devenir plus opérationnels.



### **Ethique**

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

### **Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles**

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.

### **Déclaration relative à l'Intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'Intelligence artificielle dans le processus de rédaction.**

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

### **ORCIDs des auteurs**

LS : <https://orcid.org/0000-0002-9340-3268>

ChS : <https://orcid.org/0000-0002-5447-5349>

CP-C : <https://orcid.org/0000-0001-8968-0660>

### **Contributions des auteurs**

Tous les auteurs ont contribué à la rédaction et relecture du manuscrit. LS a également assuré la coordination.

### **Déclaration d'intérêt**

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir pas de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

### **Remerciements**

Les auteurs remercient l'ensemble des partenaires ayant pris part au projet et contribué à l'acquisition de résultats présentés en partie dans ce manuscrit : Chambres d'Agriculture de la Drôme (Mikaël Boilloz), Haute-Garonne (Laurence Espagnacq et Agathe Mansion-Vauquié), Nord-Pas-de-Calais (Florine Delassus et Audrey Courier), Tarn (Anne-Laure Fuscien) et Tarn-et-Garonne (Sylvie Bochu), CEFEL (Françoise Leix-Henry), CTIFL Balandran (Christine Fournier et Maxime Vanalderweireldt), CTIFL Lanxade (Enrick Georges et François Villeneuve), EPLEFPA de Montauban (Michel Lartigue et ses élèves), ITAB (Blaise Leclerc et Mathieu Conseil), SERAIL (Alexandre Bulet).

### **Déclaration de soutien financier**

Le projet SYNERGIES a reçu le soutien financier du compte d'affectation spéciale développement agricole et rural.

**Références bibliographiques :**

Alabouvette C., Couteaudier Y., Louvet J., Bremeersch P., 1982. Comparaison de la réceptivité de différents sols et substrats de culture aux fusarioses vasculaires. *Agronomie*, 1982, 2 (1), 1-6.

AFES (Association française pour l'étude du sol), D. Baize, M-C Girard coord, Référentiel pédologique 2008, Versailles, Editions Quæ, 2009, 404 p.

Chrétien P.L., 2021. Caractérisation des agents phytopathogènes responsables des pertes de la filière ail : mise au point d'une méthode de détection. *Sciences agricoles*. Université d'Avignon, Français. <https://www.theses.fr/2021AVIG0363>

Diretto G., Rubio-Moraga A., Argandoña J., Castillo P., Gómez-Gómez L., Ahrazem O., 2017. Tissue-specific accumulation of sulfur compounds and saponins in different parts of garlic cloves from purple and white ecotypes. *Molecules* 22, 1359. <https://doi.org/10.3390/molecules22081359>

Mondani L., Chiusa G., Pietri A., Battilani P., 2021. Monitoring the incidence of dry rot caused by *Fusarium proliferatum* in garlic at harvest and during storage. *Postharvest Biology and Technology*. Vol. 173. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2020.111407>

Nohara T., Fujiwara Y., El-Aasr M., Ikeda T., Ono M., Nakano D., Kinjo J., 2021. Thiolane-type sulfides from garlic, onion, and Welsh onion. *Journal of Natural Medicines* 75, 741. <https://doi.org/10.1007/s11418-021-01533-x>

Steinberg C., Edel-Hermann V., Alabouvette C., Lemanceau P., 2019. Soil suppressiveness to plant diseases. In: Van Elsas J.D., Trevors J.T., Rosaldo A.S., Nannipieri P., eds. *Modern Soil Microbiology - Third Edition*. New York: CRC Press Taylor & Francis Group., 345-361

Villeneuve F., Pellat J., Pierre P., Enrick Georges E., Fournier C., Prince P., 2021. *Fusarium proliferatum* - Un pathogène de l'ail à double face mal connu. *Infos-CTIFL* 375, 58-69. <https://www.ctifl.fr/un-pathogene-de-l-ail-a-double-face-mal-connu-infos-ctifl-375>



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations Agronomiques* et son DOI, la date de publication.