# GONEM – Groupe Opérationnel sur la gestion des NEMatodes à Galles en maraîchage en PACA

Projet PEI financé avec le concours de l'Union européenne avec le Fonds Européen Agricole pour le Développement Rural

Projet labélisé par le GIS PIClég

Chef de file :

Partenaires :

# Rapport final du projet – Rapport principal (2018-2022)

L'objectif du projet PEI GONEM était de développer et d'évaluer, à travers plusieurs dispositifs expérimentaux, différentes stratégies de lutte contre les nématodes à galles en maraîchage sous abri et de favoriser leur adoption sur les fermes, qu'elles soient en agriculture biologique ou conventionnelle, par une démarche de recherche participative. GONEM est un projet multi-partenarial associant des chercheurs (INRAE), expérimentateurs (GRAB, Aprel, Ctifl), conseillers (Agribio 13 -84, CETA Durance-Alpilles et CETA du Soleil) et 10 maraîchers. Il visait notamment à renforcer le partenariat avec les acteurs du développement pour mieux disséminer les résultats déjà obtenus dans les programmes de recherche-expérimentation et de travailler avec un réseau élargi de producteurs pour adapter les stratégies de contrôle aux réalités régionales et aux contraintes technico-économiques des exploitations.

Le bilan des travaux menés est présenté en cinq parties. La première partie fait état de la démarche d'innovation participative qui a conduit à la constitution du réseau de producteurs associé au projet et à la co-conception de systèmes de culture combinant plusieurs moyens de lutte adaptés à chaque exploitation agricole ; l'appréciation des systèmes expérimentés par les producteurs en fin de projet y est détaillée. La seconde partie porte sur l'évaluation multi-sites des systèmes expérimentés et leur impact sur les indicateurs nématologiques mesurés. Une analyse de l'effet des principaux leviers mobilisés sur le terrain dans les systèmes « Gonem » est proposée en troisième partie, complétée par les résultats d'essais réalisés en conditions contrôlées en quatrième partie. Enfin, la valorisation des résultats, les livrables produits et les actions de communications font l'objet de la dernière partie.

# Sommaire

Résumé ..... 4
1. Innovation participative : Co-construction de stratégies de gestion innovantes des nématodes à galles avec les producteurs maraîchers ..... 6
1.1. Constitution du réseau de producteurs impliqués dans le Groupe Opérationnel ..... 6
- Objectifs ..... 6
- Méthodologie ..... 6
- Résultats ..... 7
1.2. Co-construction des systèmes de gestion ..... 7
- Méthodologie ..... 7
- Résultats ..... 8
- Discussion ..... 9
1.3 Retour des producteurs sur les systèmes évalués dans leurs exploitations ..... 9
- Méthodologie ..... 9
- Résultats ..... 9
2. Mise en œuvre et évaluation des systèmes GONEM ..... 12
2.1 Résultats sur les Indices de Galles Racinaires (IGR) ..... 13
2.2 Résultats sur les populations de nématodes à galles ..... 15
2.3 Espèces de nématodes à galles *Meloidogyne* présentes ..... 17
2.4 Communautés de nématodes phytophages et non phytophages ..... 18
2.4.1 Nématodes libres ..... 19
2.4.2 Nématodes phytophages ..... 20
2.5. Discussion sur l'évolution globale des paramètres mesurés à l'échelle du réseau ..... 22
3. Analyse de l'efficacité des différents leviers mobilisés dans le réseau expérimental GONEM ..... 24
3.1 Couverts « assainissants » ..... 24
3.1.1 Performances agronomiques des couverts testés ..... 25
3.1.2 Effet des couverts assainissants sur le système ..... 26
3.1.3 Estimation du risque de reproduction des nématodes sur les couverts d'interculture ..... 27
3.2 Cultures mauvais hôtes ..... 28
3.2.1 Performances des cultures de cycle court ..... 29
3.2.2 Performances des cultures de cycle long : roquette et fraise ..... 31
3.3 Porte-greffes résistants ..... 32
3.4 Solarisation ..... 33
3.5 Produits de protection des cultures ..... 34

3.6 Apports massifs de matière organique ..... 35
4. Essais en conditions contrôlées ..... 37
4.1 Méthodologie ..... 37
4.2 Résultats sur les plantes de diversification et plantes d'interculture ..... 41
4.3 Résultats sur les porte-greffes ..... 44
Conclusions sur les essais en conditions contrôlées ..... 45
5. Valorisation et diffusion ..... 47
Conclusion – Perspectives ..... 48

# Résumé

Le projet PEI GONEM est un projet multi-partenarial associant des chercheurs (INRAE), expérimentateurs (GRAB, Aprel, Ctifl), conseillers (Agribio 13 -84, CETA Durance-Alpilles et CETA du Soleil) et 10 maraîchers, qui s'est déroulé de 2018 à 2022 dans la région Sud. Son objectif était de développer et évaluer des stratégies de lutte contre les nématodes à galles en maraîchage sous abri et de favoriser leur adoption sur les fermes. Il s'est appuyé, dans le cadre d'une démarche de recherche participative, sur un réseau de 10 dispositifs expérimentaux dans des fermes et sur des essais réalisés en conditions contrôlées pour mieux connaître la sensibilité de différentes plantes aux *Meloidogyne* sp. Les essais en exploitation étaient des essais « système », avec comparaison d'un système « GONEM », combinant plusieurs moyens de lutte avec le système « REFERENCE » correspondant à la pratique habituelle du maraîcher.

Sur les 4 années de suivi des essais chez les producteurs, les indicateurs d'infestation mesurés, indices de galles racinaires (IGR) et populations de nématodes à galles du sol, ont globalement baissé sur la plupart des sites et de façon plus importante sur les systèmes « GONEM » que sur les systèmes de référence. Cette évolution semble principalement corrélée au niveau de diversification des plantes cultivées, au nombre de leviers utilisés et dans une moindre mesure au système de culture et au taux de MO dans les sols. Les sites où l'évolution des indicateurs nématologiques est la plus encourageante correspondent en général aux sites les plus diversifiés et où un plus grand nombre de moyens de lutte (au moins 3 différents) ont été utilisés. En conséquence, les 5 sites en AB ont eu une évolution plus marquée que les sites en conventionnel. Si en tendance le système GONEM a permis de mieux contrôler les nématodes à galles que le système de référence, l'effet « site » est plus fort, soit en raison d'une distinction insuffisante entre le système GONEM et le système de référence sur une partie des sites, soit de l'impact plus marqué d'un levier que d'autres, même de façon ponctuelle.

Les résultats obtenus sur les essais terrain et en conditions contrôlées ont permis de mieux connaître le potentiel et les limites de certains leviers de lutte, comme la résistance de différents porte-greffes, les cultures moins sensibles dans les rotations ou les couverts assainissants d'interculture. Ils confirment l'intérêt potentiel de certaines plantes d'interculture (le sorgho fourrager, assez peu sensible, en plante piège ou les crotalaires, résistantes, et potentiellement les tagètes et phacélie intéressantes en conditions contrôlées) ou de cultures commerciales de coupure (fraise de 9 mois, roquette). Les résultats en conditions contrôlées montrent toutefois des différences variétales qui peuvent être importantes pour chaque espèce testée, et la sensibilité parfois très différente des plantes aux 2 espèces de *Meloidogyne*, *M. incognita* et *M. arenaria* souvent présentes en mélange dans les parcelles de la région. Des préconisations d'usage de certaines plantes à favoriser dans les rotations ont pu être formulées à l'issue de ce projet.

Les résultats obtenus dans le Projet Gonem ont été diffusés largement, notamment au travers de fiches techniques « projet » et fiches « sites » réalisées pour chacune des 10 exploitations, et d'un colloque de restitution des résultats réalisé en mars 2022 à Avignon. Ces documents sont en libre accès sur : https://www.grab.fr/gonem/

Plusieurs réunions ont eu lieu en 2018 et 2019, visant à mettre en place les actions du projet, construire les systèmes et définir les indicateurs de mesure de l'efficacité des systèmes. Les réunions ont ensuite été moins nombreuses, en lien avec la pandémie de Covid, mais ont pu reprendre en partie à partir de 2021. Le détail des réunions, des points abordés et des partenaires associés figure dans le tableau 1.

Elles se réfèrent aux différentes actions du projet :

- Action 1 : coordination et animation du groupe opérationnel
- Action 2 : Innovation participative : Co-construction de stratégies de gestion innovantes des nématodes à galles avec les producteurs maraîchers
- Action 3 : Mise en œuvre et Evaluation des systèmes
- Action 4 : Valorisation et diffusion

**Tableau 1** : Réunions réalisées pour le projet GONEM

| Date | Actions du projet | Thème de la réunion | Partenaires présents |
|---|---|---|---|
| 8/03/2018 | Action 2 | Méthodologie de la mise en œuvre de la démarche de co-conception | GRAB, INRAE (+ITAB) |
| 14/05/2018 | Actions 1/2 | Lancement du projet | Partenaires du projet |
| 11/06/2018 | Actions 1/2/3 | Préparation de la journée de constitution du réseau de producteurs + co-conception | APREL, GRAB, INRAE |
| 19/6/2018 | Actions 1/2/3 | Présentation du projet, sélection des producteurs associés.<br>Présentation des leviers techniques et 1ère phase de co-construction de systèmes | Partenaires + producteurs |
| 12/7/2018 | Actions 1/2/3 | Méthodologie de co-conception<br>Indicateurs de suivi des sites d'essais | GRAB, INRAE, APREL |
| 30/8/2018 | Actions 1/2/3 | Choix et mise au point des indicateurs de suivi ; 2ème phase de co-construction des systèmes | Partenaires + producteurs |
| 18/01/2019 | Action 3 | Réunion de travail sur la méthodologie ; rédaction des protocoles de suivi | APREL, GRAB, Ctifl, Agribio 13-84, Ceta du soleil, INRAE |
| 7/05/2019 | Actions 1/2/3 | Point sur les résultats ; Adaptation des systèmes ; Suivis agronomiques et nématologiques | Partenaires + producteurs |
| 1/10/2019 | Action 3 | Définition des essais en conditions contrôlées | INRAE, GRAB, APREL |
| 14/11/2019 | Action 3 | Evolution des systèmes testés sur chaque site ; Suivi des essais ; Essais en conditions contrôlées | Partenaires du projet |
| 28/01/2020 | Actions 1/2/3 | Partage des résultats<br>Synthèse intermédiaire et perspectives<br>Réflexion sur les systèmes et organisation pour 2020-2021 | Partenaires + producteurs |
| 25/01/2021 | Actions 1/2 | Préparation de la réunion du 4 février, synthèse des résultats | GRAB, APREL |

| Date | Actions du projet | Thème de la réunion | Partenaires présents |
|---|---|---|---|
| 4/02/2021 | Actions 1/2/3 | Bilan sur l'année écoulée, les résultats obtenus sur les sites et en conditions contrôlées à l'INRAE, et les prévisions pour les derniers cycles de culture du projet au printemps-été 21 | Partenaires |
| 16/04/21 | Actions 1/2/3/4 | Synthèse des résultats et livrables | GRAB, APREL |
| 28/05/21 | Actions 3/4 | Synthèse résultats, préparation visites d'essais | GRAB, APREL |
| 6/09/2021 | Action 3 | Programmation de la deuxième série d'essais en conditions contrôlées | GRAB, APREL, INRAE |
| 15/10/2021 | Action 1/3 | Préparation de la réunion du 19 novembre | GRAB, APREL |
| 8- 9/11/21 | Action 2/3 | Synthèse des résultats et préparation de l'évaluation des systèmes avec les producteurs | GRAB, APREL, INRAE |
| 19/11/2022 | Actions 1/2/3/4 | Résultats par site et multi-sites sur l'évolution des indicateurs suivis et l'analyse des effets des leviers mobilisés<br>Discussion sur les livrables (Fiches projet, sites et organisation du colloque de restitution)<br>Evaluation du déroulement et des résultats du projet | Partenaires + producteurs |
| 14/12/2021 | Actions 3 et 4 | Synthèse des résultats pour diffusion lors du colloque de restitution | GRAB, APREL |
| 3/01/2022 | Action 2 | Conception et réalisation d'une enquête en ligne sur l'évaluation des systèmes GONEM | INRAE, GRAB |
| 21/02/2022 | Action 4 | Organisation du colloque du restitution | GRAB, APREL, INRAE |

# 1. Innovation participative : Co-construction de stratégies de gestion innovantes des nématodes à galles avec les producteurs maraîchers

## 1.1. Constitution du réseau de producteurs impliqués dans le Groupe Opérationnel

### - Objectifs

L'objectif de l'action 2 du projet était d'organiser la co-construction des systèmes entre chercheurs, expérimentateurs, conseillers et maraîchers. Au début du projet, les partenaires de l'expérimentation et du développement ont identifié dans leurs réseaux des producteurs maraîchers ayant des problèmes de nématodes à galles sur leur exploitation qui soient motivés pour concevoir et mettre en place des systèmes innovants de régulation sur plusieurs années dans le cadre du projet. L'enjeu était d'intégrer dans le projet des exploitations avec des fonctionnements et systèmes de culture différents, pour couvrir une gamme de situations courantes en région PACA, ce qui est un élément clé pour un déploiement des innovations à large échelle.

### - Méthodologie

Une première réunion réalisée en juin 2018 a permis de présenter aux producteurs présents le projet GONEM et l'approche retenue pour la gestion des nématodes à galles : essais systèmes qui combinent différents leviers de gestion déjà connus, et qui soient adaptés aux contraintes technico-économiques de chaque exploitation. Les leviers techniques retenus reposent notamment sur le choix du matériel végétal

(plantes résistantes aux nématodes à galles, cultures mauvais hôtes, diversification) et les techniques culturales à visée assainissante (apports de matière organique, engrais verts, solarisation…) pour lesquels on dispose de connaissances relativement stabilisées, contrairement à d'autres leviers peu informés en condition de production (ex : biocontrôle, inondation des parcelles, etc.) [figure 1].
La démarche adoptée dans le projet est également présentée : ateliers de co-conception pour choisir collectivement et combiner des leviers techniques qui soient adaptés aux contraintes de chaque exploitation, puis expérimentations en ferme avec évaluations des performances agronomiques mais aussi des niveaux de contamination des sols en nématodes [figure 2].

#### - Résultats

En juin 2018, le réseau des parcelles expérimentales GONEM est défini. Il associe 10 producteurs de la région Sud avec des systèmes de culture assez contrastés, notamment en termes de niveau de diversification des espèces cultivées. 5 exploitations sont en agriculture biologique et 5 en agriculture conventionnelle, avec des fonctionnements et systèmes de culture différents permettant aux essais de couvrir une gamme intéressante de situations.

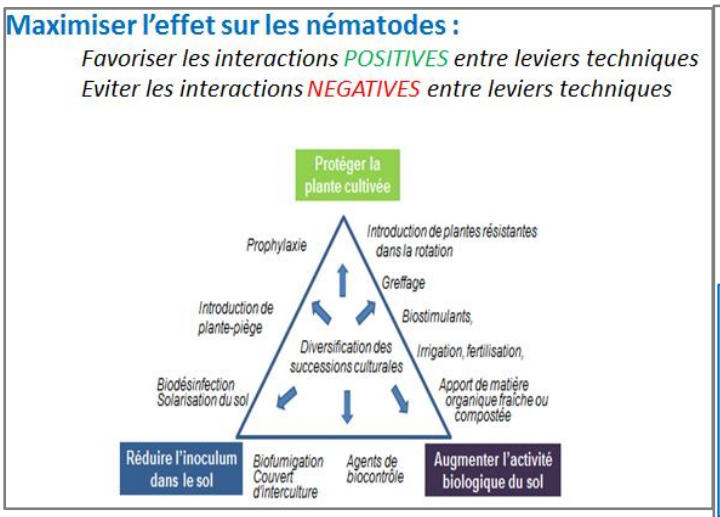



Figure 1 : Leviers techniques mobilisés sur les systèmes GONEM (d'après le triangle créé dans le projet GEDUBAT)

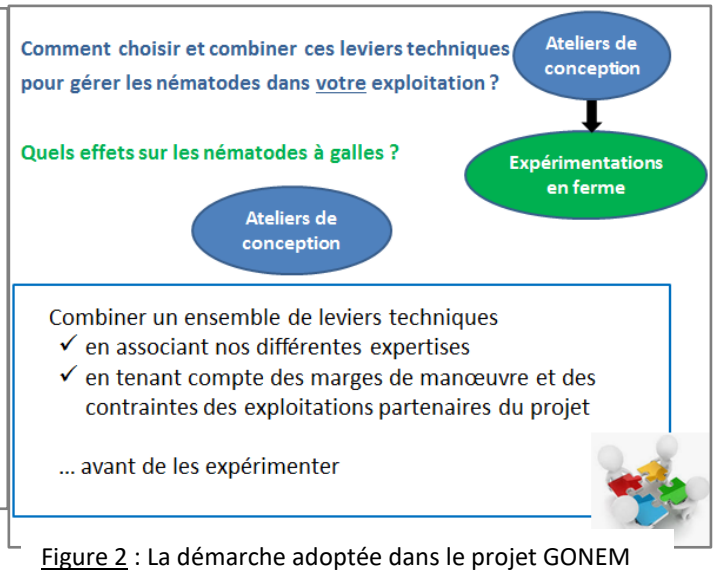



Figure 2 : La démarche adoptée dans le projet GONEM (d'après M. Navarrete, 2018)

## 1.2. Co-construction des systèmes de gestion

#### - Méthodologie

Deux réunions, en juin et août 2018 (comptes-rendus en annexes), ont permis de mettre en place la démarche de co-construction des systèmes de culture à expérimenter sur les 10 exploitations du réseau.
Lors de la première réunion, après présentation des leviers techniques mobilisables sous la forme avantages/limites/contraintes, 2 ateliers en sous-groupes ont été conduits pour alimenter la réflexion et s'approprier la méthodologie. La 2ème réunion a permis, après un travail commun sur un cas type, de représenter sur un calendrier pluriannuel les systèmes envisagés chez

*Réunion de travail du groupe GONEM au GRAB, juin 2018*

les producteurs présents (successions des cultures commerciales et des interventions techniques de contrôle des nématodes). Ce travail s'est poursuivi par un dialogue des expérimentateurs (GRAB, APREL) et des conseillers techniques (Agribio13-84 et CETA) avec chacun des 10 producteurs pour finaliser les systèmes envisagés sur chaque exploitation.

### - Résultats

Sur les 10 fermes du réseau GONEM, les systèmes ont été définis, avec la planification des cultures et des opérations culturales sur les 3,5 ans du projet (figure 3).

Sur chaque site, 2 systèmes sont suivis : un système « Gonem » (GONEM) dans lequel on introduit plusieurs leviers agronomiques permettant de réduire les nématodes à galles et un système « référence » (REF) qui correspond à la pratique habituelle du producteur. Ces 2 systèmes sont mis en place, selon les exploitations, soit dans 2 tunnels adjacents (1 tunnel « GONEM » et 1 tunnel « REF »), soit dans 2 moitiés du même tunnel, pour avoir des conditions initiales aussi proches que possible (types de sol, de précédent, de niveau d'infestation en nématodes).

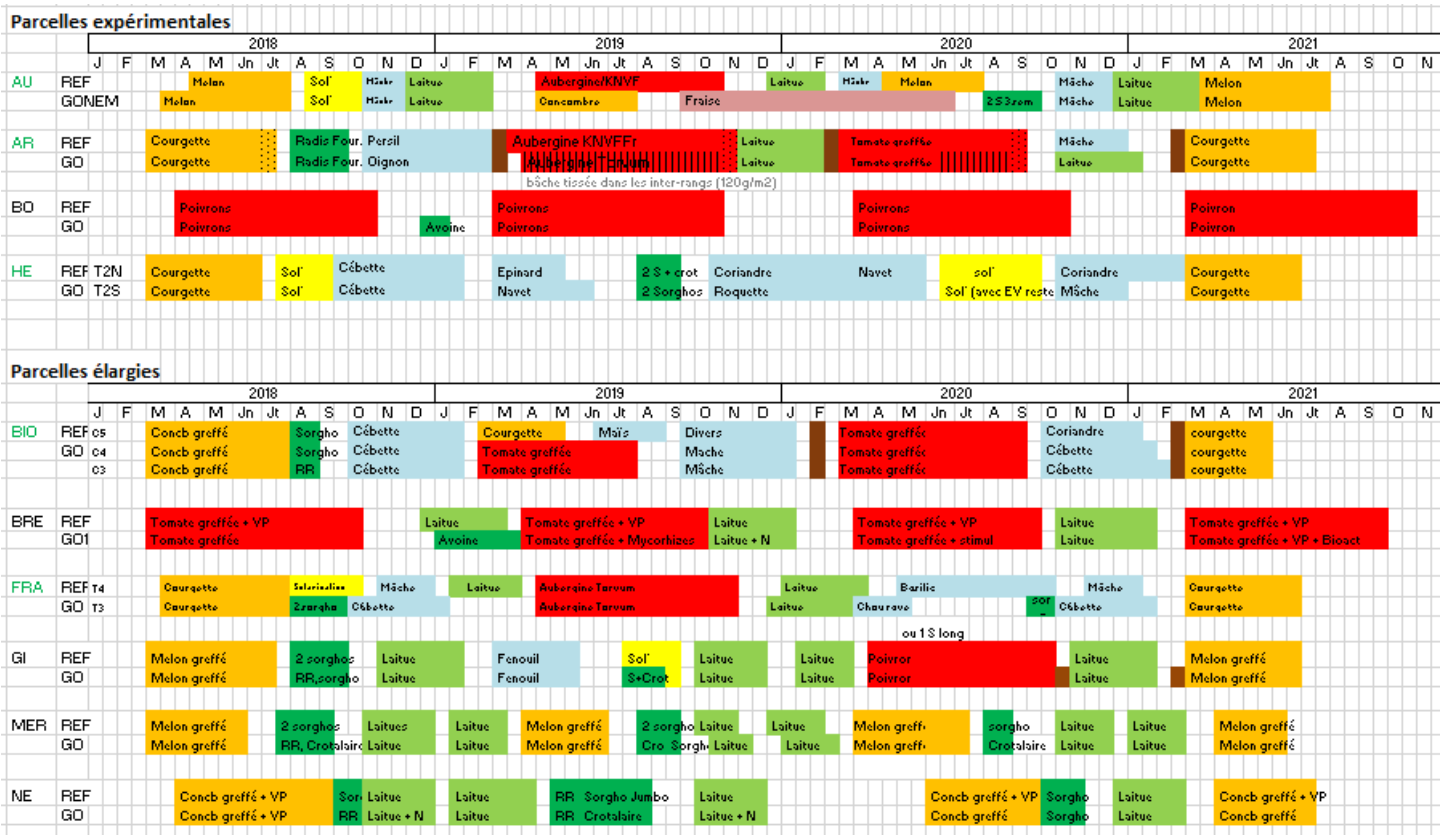



Figure 3 : Systèmes REF et GONEM réalisés entre 2018 à 2021 sur 10 fermes, en agriculture conventionnelle ou biologique

Les leviers mobilisés sur les différents sites varient en fonction des contraintes technico-économiques des exploitations. Les exploitations en conventionnel, ayant peu de marges de manœuvre pour diversifier leurs rotations culturales, se sont orientées principalement sur des leviers mobilisables pendant l'interculture, soit mis en place l'été en fin de cultures de la famille des cucurbitacées (melon, courgette, concombre) en juillet-aout, soit en hiver après une culture de solanacée (tomate, poivron) et en remplacement d'une culture de laitue. Les exploitations en AB, plus diversifiées, ont davantage intégré des cultures peu sensibles dans leurs rotations tels que l'oignon ou la mâche. Enfin, d'autres leviers tels que le greffage, ou ponctuellement le biocontrôle, ont été mobilisés par les producteurs. Le tableau 2 présente différents exemples de leviers utilisés et les effets attendus sur les sites du réseau.

### - Discussion

Les systèmes planifiés lors de la première année du projet ont par la suite été régulièrement adaptés en fonction des contraintes des agriculteurs. L'évolution des systèmes a été suivie avec vigilance par les partenaires du projet pour que les systèmes restent en adéquation avec les objectifs initiaux de mobilisation de leviers de lutte contre les nématodes et de pertinence scientifique, tout en s'adaptant aux contraintes de réalisation des producteurs et aux dynamiques de développement/réduction des nématodes.

**Tableau 2** : Leviers utilisés dans le système GONEM et effets attendus

| TYPE DE LEVIER | Exemples de leviers | Effets attendus |
|---|---|---|
| Prophylaxie | - Arrachage des racines des cultures d'été<br>- Elimination des adventices (désherbage régulier, bâche)<br>- Retarder la plantation des cultures sensibles d'automne | - Éliminer une partie de l'inoculum<br>- Eviter la multiplication des nématodes sur les adventices, souvent hôtes<br>- Eviter les périodes d'activité des nématodes |
| Apports de matière organique | Apports réguliers de matière organique « de masse » : fumier, compost | Stimulation de l'activité biologique du sol dont des antagonistes des nématodes |
| Désinfection | - Solarisation<br>- Biofumigation | Diminution de l'inoculum dans le sol |
| Résistance | - Greffage des solanacées<br>- Alternance des gènes de résistances | - Limiter la multiplication des nématodes pendant l'été<br>- Eviter la sélection d'espèces virulentes |
| Diversification avec des cultures mauvais hôtes | - Remplacer des cultures d'automne sensibles (laitue, persil,…) par des cultures mauvais hôtes (cébettes, mâche, roquette)<br>- Remplacer des cultures d'été par des cultures de printemps peu sensibles (fenouil, épinard, navet) | - Diminuer l'impact économique des nématodes sur les cultures<br>- Limiter la multiplication des nématodes |
| Couverts d'interculture Désinfection | - Engrais verts « biomasse », peu sensibles aux nématodes (crotalaire,…)<br>- Plantes pièges : Engrais verts courts d'espèces peu sensibles (sorgho 3 semaines l'été) | - Stimuler l'activité biologique du sol par apport de matière organique<br>- Diminuer l'inoculum en détruisant le couvert avant la fin du cycle du nématode |

## 1.3 Retour des producteurs sur les systèmes évalués dans leurs exploitations

### - Méthodologie

Une enquête en ligne a été réalisée en Janvier-Février 2022 auprès des 10 producteurs ayant expérimenté les systèmes GONEM. L'objectif était de connaitre, en fin de projet, leur perception à la fois sur les systèmes testés et le fonctionnement participatif.
9 réponses sur 10 ont été obtenues

### - Résultats

<u>a) Perception des systèmes testés :</u> les producteurs partenaires de GONEM sont globalement satisfaits voire très satisfaits, sur le plan de l'organisation des pratiques ET du niveau de contrôle des nématodes à galles dans les systèmes GONEM expérimentés (Figure 4). Cela traduit que l'équipe projet a bien pris en compte leurs attentes grâce à la démarche participative.

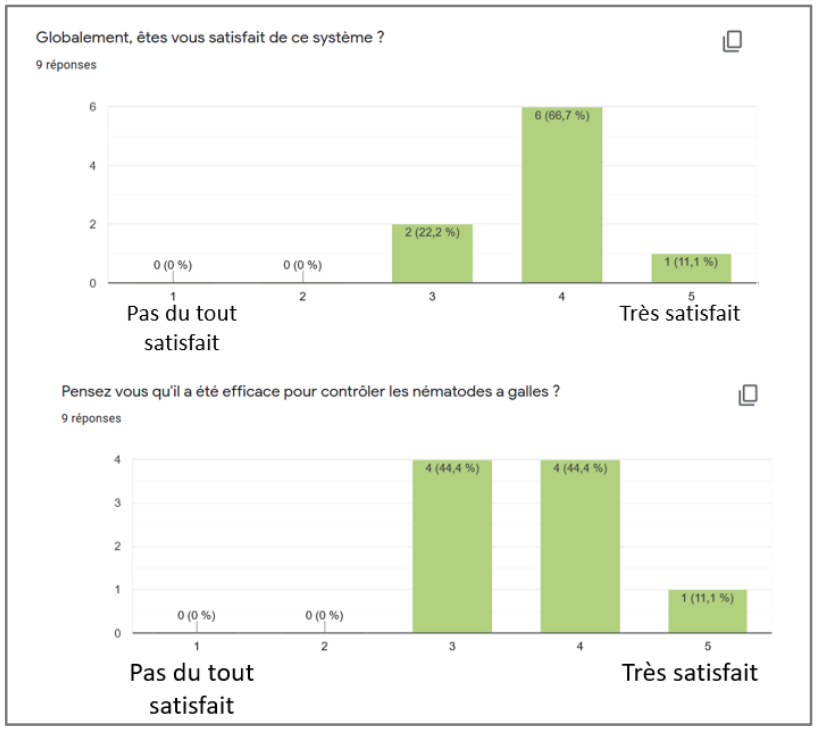



Figure 4 : Satisfaction des producteurs pour les systèmes de culture expérimentés (N=9 réponses)

Il n'y a pas d'accord entre les différents producteurs sur le choix des leviers techniques les plus faciles à mettre en œuvre, car la faisabilité est très liée aux rotations et calendriers de cultures de chacun. Cela plaide pour construire des systèmes de culture en combinant des leviers en fonction de leurs performances agronomiques (cf Section 2.) mais aussi adaptés à chaque exploitation.

Les difficultés à l'adoption des systèmes de culture expérimentés peuvent être séparés en 3 catégories : des difficultés techniques, organisationnelles et économiques (Figure 5).

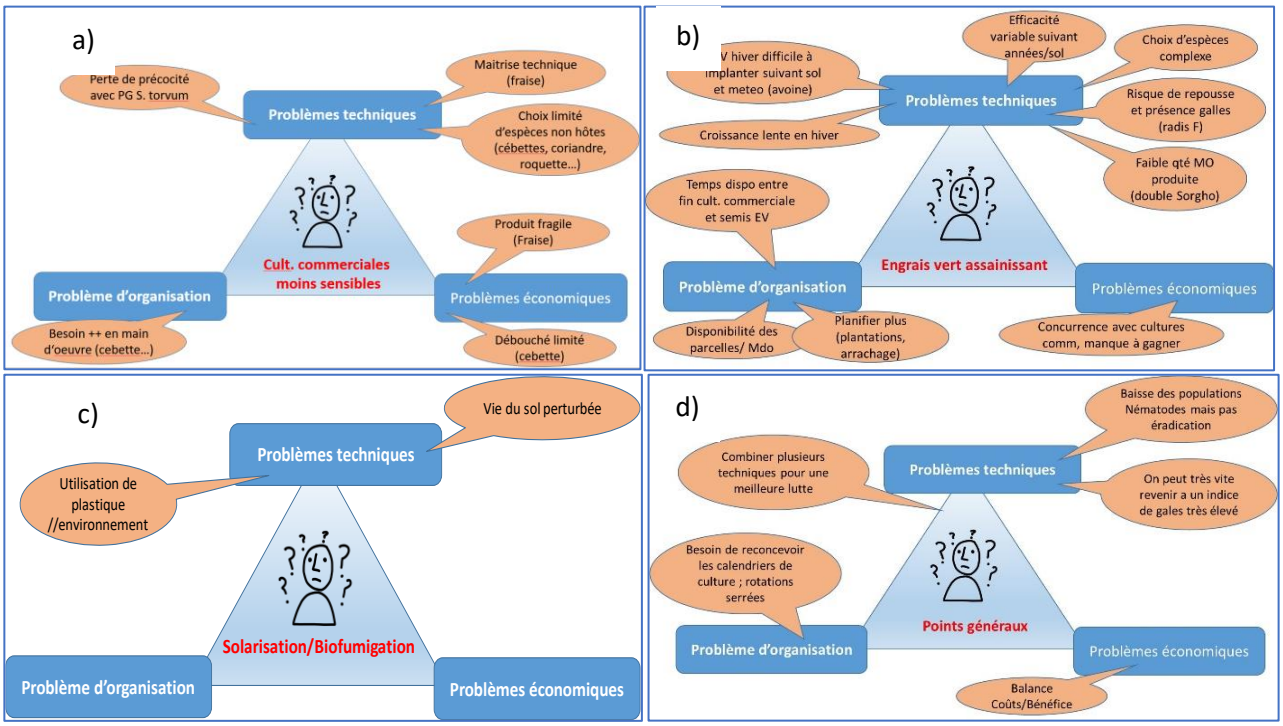



Figure 5 : Difficultés techniques, organisationnelles et économiques à l'adoption des leviers techniques (N=9 réponses)

Pour l'utilisation de **cultures moins sensibles aux nématodes à galles** (Figure 5a), les difficultés sont surtout en termes de débouchés commerciaux (ex : la cébette), mais aussi de manque de connaissances pour piloter ces nouvelles cultures. Le nombre d'espèces de diversification est également jugé limitant.

Pour ce qui est des **engrais verts à fonction assainissante** (Figure 5b), les difficultés techniques dépendent de la période de l'année à laquelle l'engrais vert est semé. En hiver, les conditions de germination sont plus délicates et les quantités de matière sèche produites sont plus faibles. Les problèmes organisationnels sont liés à la disponibilité de la parcelle au moment où il serait le plus efficace de semer l'engrais vert compte tenu du cycle des nématodes à galles et à la disponibilité en temps. Sur le plan économique, la principale difficulté est de remplacer une culture commerciale par une culture de service, qui n'a pas de rentabilité à court-terme.

Pour l'introduction de **solarisation ou de biofumigation** (Figure 5c), qui sont des pratiques régulièrement utilisées par un certain nombre de producteurs de la région, les enquêtés ont identifié peu de limites techniques, mais redoutent un effet négatif sur la vie du sol et regrettent l'utilisation de paillages plastiques supplémentaires.

Enfin quelques difficultés générales ont été citées (Figure 5d) comme la nécessité de reconcevoir les systèmes en profondeur, en combinant plusieurs leviers. Il s'agit là de choix difficiles car la balance entre les bénéfices (souvent à long-terme) et les risques ou coûts (souvent à court-terme) est difficile à évaluer finement. Par ailleurs, les producteurs partenaires ont expérimenté et bien compris que même si ces nouveaux systèmes de culture présentent une efficacité contre les nématodes, ils n'éradiquent pas ces ravageurs. Un retour à des pratiques standards trop intensives ou à des cultures très sensibles conduira à faire ré-augmenter les populations. C'est donc bien **un changement de système sur la durée vers lequel il faut aller**. Les producteurs enquêtés, à 80%, ont cependant dit qu'ils étaient prêts à poursuivre les systèmes expérimentés dans les prochaines années.
Leurs **principales attentes pour une suite au projet GONEM** portent sur 3 options agronomiques :

- Le choix des espèces d'engrais vert : Les différentes espèces efficaces contre les nématodes à galles et leurs périodes possibles d'implantation (été/hiver), en particulier une aide à la décision pour choisir entre les différentes espèces et les variétés de sorgho.
- Le choix de la matière organique apportée et lorsque c'est par un engrais vert, le choix des espèces permettant d'avoir un couvert long de plusieurs mois et résistant aux nématodes pour produire suffisamment de biomasse végétale.
- Enfin, les agriculteurs sont en attente d'une aide au choix des espèces et familles non hôtes des nématodes en cultures commerciales.

## 2. Mise en œuvre et évaluation des systèmes GONEM

Le suivi des expérimentations mises en place sur les 10 fermes du réseau GONEM a été organisé selon la répartition de ces fermes dans 2 réseaux :

- un premier réseau de parcelles expérimentales (« réseau expérimental ») mis en place chez 4 agriculteurs. Dans ce premier réseau, des mesures et observations agronomiques et nématologiques sont réalisées par les expérimentateurs (GRAB, APREL) et les chercheurs (INRAE) de façon à disposer d'une évaluation précise de l'effet des combinaisons de pratiques sur la maîtrise des populations de nématodes dans le sol.

- un deuxième réseau de parcelles (« réseau élargi ») mis en place chez 6 agriculteurs intéressés par la démarche de GONem, et déjà intégrés dans des groupes techniques accompagnés par les conseillers. Sur ces exploitations, les observations et mesures sont un peu moins nombreuses et réalisées par les conseillers et expérimentateurs (GRAB, APREL). Ce réseau permet de disposer d'un plus grand nombre de résultats et d'expériences de producteurs sur la faisabilité des systèmes suivis et leur impact technico-économique.

Pour chaque réseau, les mesures réalisées sont les mêmes dans les 2 systèmes « GONEM » et « REF ». Les observations et enregistrements portent à la fois sur des indicateurs agronomiques (caractérisation des sols, développement des cultures, températures du sol, performance des leviers d'interculture), nématologiques (cartographie des indices de galles racinaires, dénombrement des communautés de nématodes, détermination d'espèces) et technico-économiques (figure 5).

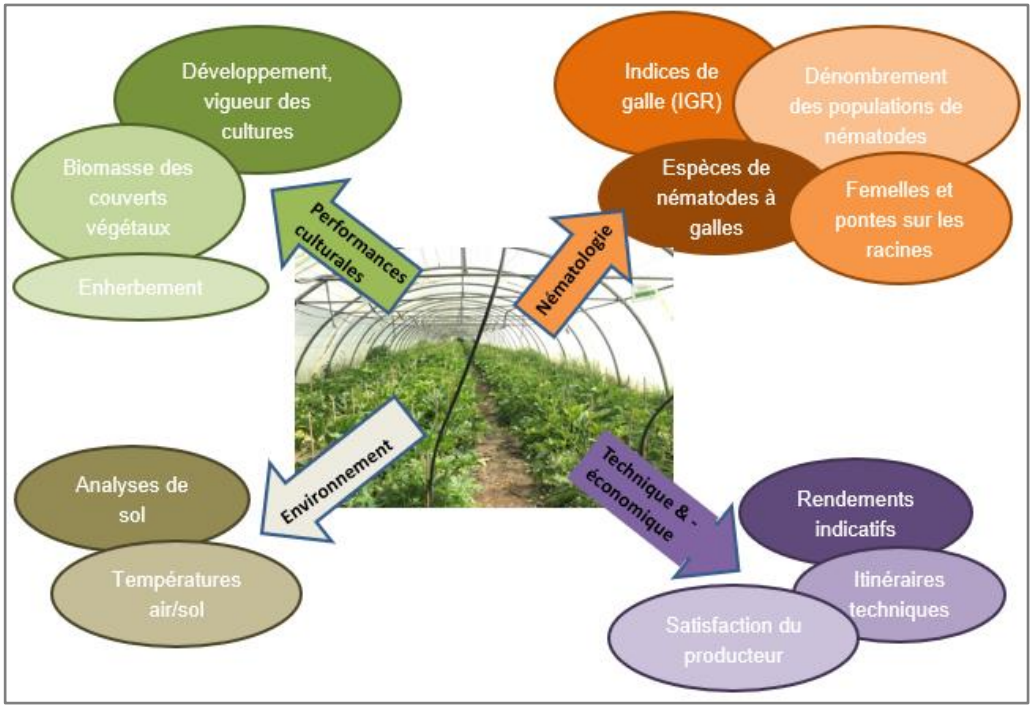



Figure 5 : Les indicateurs mesurés sur les essais

Le niveau de suivi diffère peu entre les 2 réseaux (tableau 3). La différence principale est le nombre et la fréquence des analyses nématologiques, qui sont réalisées à chaque fin de culture sur 8 échantillons par l'INRAE dans le réseau « expérimental » et 1 fois par an par le laboratoire ELISOL dans le réseau « élargi ». Le suivi des différents indicateurs permet de comparer l'évolution entre les sites, et sur chaque site de comparer le système GONEM au système de référence afin d'évaluer l'effet des leviers utilisés sur du court terme et l'effet du système dans sa globalité sur du plus long terme.

**Tableau 3** : Mesures et suivis réalisés dans les essais GONEM sur les exploitations maraîchères

| Mesures/suivis sur les essais « réseau expérimental » | | Réseau « EXPE » | Réseau « ELARGI » |
|---|---|---|---|
| Nématodes | - Cartographie des Indices de galles à chaque fin de culture (28 à 36 observations par système)<br>- Dénombrement nématodes phytophages et non phytophages en fin de culture<br>- Détermination espèce de nématode à galles<br>- Observations des femelles et pontes dans les racines | - 2 fois/an<br>- 2-3 fois/an INRAE (8 échantillons par syst.)<br>Au moins 2 fois – INRAE<br>- ponctuellement | - 2 fois/an<br>- 1 fois/an fin été ELISOL (1 échantillon par syst.)<br>- 1 à 2 fois – INRAE<br>- ponctuellement |
| Performances culturales | - Développement, vigueur des cultures<br>- Biomasse des couverts végétaux | 1 fois/2 mois | 2-3 fois/an |
| Sol | - Analyse physico-chimique à T0 | 1 fois au début de l'essai | 1 fois au début de l'essai |
| Climat | Enregistrement températures sol et air | cultures et intercultures | Intercultures |
| Données technico-économiques | Enregistrement des itinéraires techniques, rendement indicatif, et niveau de satisfaction du producteur | 1 fois/an pour la saison | 1 fois/an pour la saison |

## 2.1 Résultats sur les Indices de Galles Racinaires (IGR)

L'indice de Galles Racinaires (IGR) permet d'évaluer le niveau cumulatif d'attaque d'une culture en fin de saison, et constitue un indicateur à la fois du niveau d'infestation du sol, de la sensibilité de l'espèce cultivée et de la saison d'observation. C'est donc la comparaison des IGR, au cours des années ou à la même date en des lieux différents et sur la même espèce de plante, qui peut être interprétée. L'IGR est déterminé selon l'échelle de Zeck de 0 à 10 (*Zeck, W.M. [1971]. A rating scheme for field evaluation of root-knot nematode infestations. Pflanzenschutz-Nachrichten 24:141-144*), sur une trentaine de plants définis géographiquement dans chaque parcelle. L'ensemble de ces notations d'IGR permet de cartographier une parcelle vis-à-vis de la contamination par les nématodes.

### *Indices de galles racinaires initiaux*

Les cartographies des indices de galles initiaux ont été réalisées à la fin des cultures d'été 2018, en majorité représentées par des cultures de cucurbitacées (courgette et melon). Elles illustrent la diversité des niveaux d'infestation et de répartition des nématodes dans les tunnels de culture.

Ainsi, certaines exploitations ont des niveaux de dégâts racinaires très élevés et assez homogènes sur les parcelles (Cas A), alors que d'autres présentent moins de dégâts (Cas C) et/ou des répartitions hétérogènes avec par exemple des rangs de bordure nettement plus infestés que les rangs centraux (Cas B, figure 6).

La comparaison des niveaux d'IGR initiaux sur l'ensemble des sites (figure 7) montre que les IGR mesurés sont en tendance moins élevés sur les cultures de solanacées (poivrons ou tomates greffées) que cucurbitacées. Sur ces dernières, le niveau de dégâts varie, selon les sites, de très faible (IGR de 0,5 à 1,5) à très élevé (de 9 à 10).

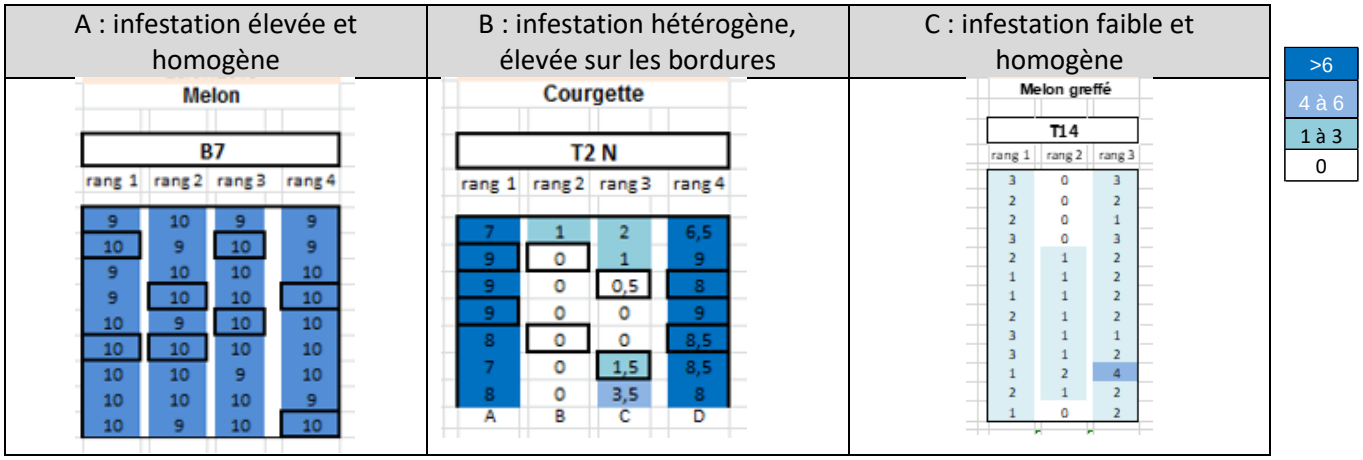



Figure 6 : cartographie des IGR initiaux sur 3 sites sur une échelle de 0 à 10 (échelle de Zeck)

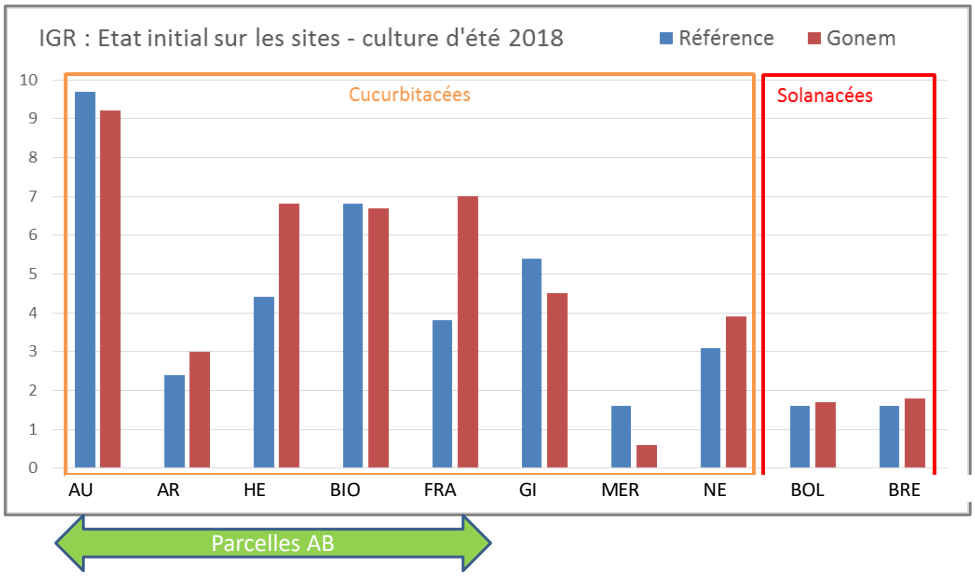



Figure 7 : Comparaison des IGR moyens initiaux sur les 10 sites GONEM - échelle de 0 à 10 (Zeck)

Sur les sites dont le niveau d'infestation initial était variable en fonction des parcelles, le système GONEM a en général été positionné sur la parcelle la plus contaminée selon l'indicateur IGR.

### *Evolution des IGR*

Sur l'ensemble des sites du projet, la culture finale réalisée en été 2021 est la même que celle cultivée l'été 2018 lors de la réalisation de l'état initial, de façon à pouvoir juger de l'évolution des 2 systèmes suivis sur chaque site, indépendamment de l'effet « culture ».

Le calcul du ratio $\frac{IGR\ 2021 - IGR\ 2018}{IGR\ 2018}$ x 100 permet de rapidement visualiser l'évolution de chacun des systèmes entre le début et la fin du projet sur l'ensemble des sites (figure 8). On constate une réduction globale des IGR sur 7 des 10 sites suivis, avec une diminution en tendance plus importante sur le système GONEM. Cette diminution est notamment significative sur 2 sites (AU, FR) par rapport à la référence. Dans les sites où les IGR ont augmenté, le système GONEM n'est inférieur à la référence que dans 1 site (BO).

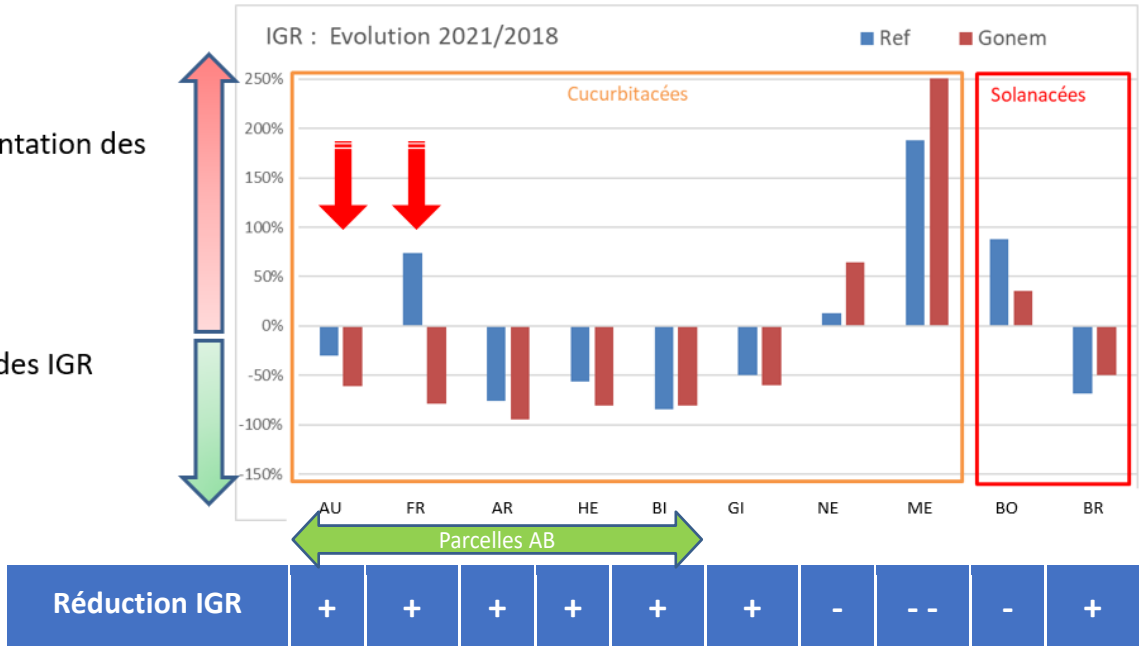



Figure 8 : Evolution des IGR moyens entre l'été 2018 et l'été 2021

En complément de ce ratio, il est nécessaire d'analyser les courbes d'évolution des IGR sur chaque site au cours du temps, afin d'évaluer si l'évolution a été progressive sur les 4 années et résulte de l'effet cumulé de plusieurs leviers ou si elle résulte principalement d'un levier utilisé. De même sur les sites où l'IGR a augmenté, il convient d'analyser si le nombre de leviers utilisé a été suffisamment important ou si l'augmentation résulte de l'absence d'efficacité du levier.
L'évolution complète des indicateurs est présentée pour chaque site dans les fiches « sites » (annexe). On peut par exemple constater que la baisse de l'IGR sur le site AU (fiche n°1) résulte d'une évolution progressive, alors que l'augmentation sur le système « REF » du site FR (fiche n°7) a été brutale suite à une culture particulièrement sensible.
Une analyse des facteurs explicatifs d'évolution est proposée en partie 3.

## 2.2 Résultats sur les populations de nématodes à galles

Des analyses nématologiques concernant l'ensemble de la nématofaune du sol (nématodes à galles mais également autres espèces de nématodes phytoparasites et espèces non phytoparasites saprophages utiles (dits nématodes libres, indicateurs de la santé des sols)), sont réalisées en parallèle par INRAE ou ELISOL après chaque culture pour les sites « EXPE » ou chaque été sur les sites du réseau « Elargi ». Les nématodes sont extraits du sol par élutriation de Seinhorst (1962) (NEM/PS_MO_ELUTRI adaptée de ISO_23611-4) puis identifiés et énumérés (nombre de nématodes/dm3 de sol) sans distinction des stades (juvéniles, adultes) ni des sexes, à l'échelle de la famille ou du genre pour les nématodes phytoparasites, et sans caractérisation taxonomique pour les nématodes non phytoparasites. Ces notations permettent d'évaluer les effets des systèmes sur la structure des communautés de nématodes phytoparasites et non phytoparasites (évolutions spatio-temporelles des patrons de communautés) et sur la santé des sols (espèces saprophages utiles). L'analyse du taux de nématodes à galles dans le sol (IS) (en nombre de larves vivantes / $dm^3$ de sol) permet de suivre l'évolution des populations restant dans le sol après chaque culture ou levier mis en œuvre pendant l'interculture.

### *Populations de nématodes à galles (IS) initiales, lien avec le niveau de dégâts (IGR)*

Les populations de nématodes à galles dénombrées dans le sol à la fin des cultures d'été 2018 varient également de façon très importante entre les sites : elles s'échelonnent de moins de 500 larves/dm3 à 15 000 larves /dm3 (figure 9).
En tendance générale, la hiérarchisation des niveaux de populations de nématodes à galles dans le sol est similaire à celle des IGR, les sites présentant le plus de dégâts racinaires ayant également les populations les plus élevées et inversement. Néanmoins, sur le site en culture de poivron (BOL, figure 9), il n'y a pas de concordance des 2 indicateurs car ce site présente des IGR moyens parmi les plus faibles, de l'ordre de 1,7, alors que les populations sont les plus élevées, environ 14 000 larves/$dm^3$ de sol. Sur ce site, l'indicateur IGR ne semble donc pas pertinent pour une culture de poivrons qui exprime peu de symptômes racinaires malgré une forte contamination du sol en nématodes.
A l'inverse sur d'autres sites, notamment pour les cultures de cucurbitacées, on peut avoir des niveaux d'IGR assez élevés (de 4 à 7) mais des populations modérées dans les sols (environ 2000/dm3). Ceci peut également être expliqué par le fait que les cucurbitacées réagissent fortement aux attaques de *Meloidogyne* en développant de grosses galles même en cas d'attaque modérée.
La différence de niveaux d'IGR entre les 2 parcelles GONEM et REFERENCE d'un même site est globalement cohérente avec les populations de nématodes dans le sol, mais ce n'est toutefois pas le cas pour 3 des 10 sites (AU, HE, BRE).

Les 2 indicateurs utilisés pour mesurer la pression des nématodes à galles sur une parcelle ne vont donc pas toujours dans le même sens, IGR et IS sont complémentaires. L'IGR exprime l'intensité des dégâts racinaire pendant toute la durée de la culture, et est très dépendant du niveau de sensibilité de l'espèce (voire variété) cultivée, alors que la population de nématodes dans le sol (IS) est un indicateur qui reflète la présence des formes mobiles (J2) de ces pathogènes à un instant donné.

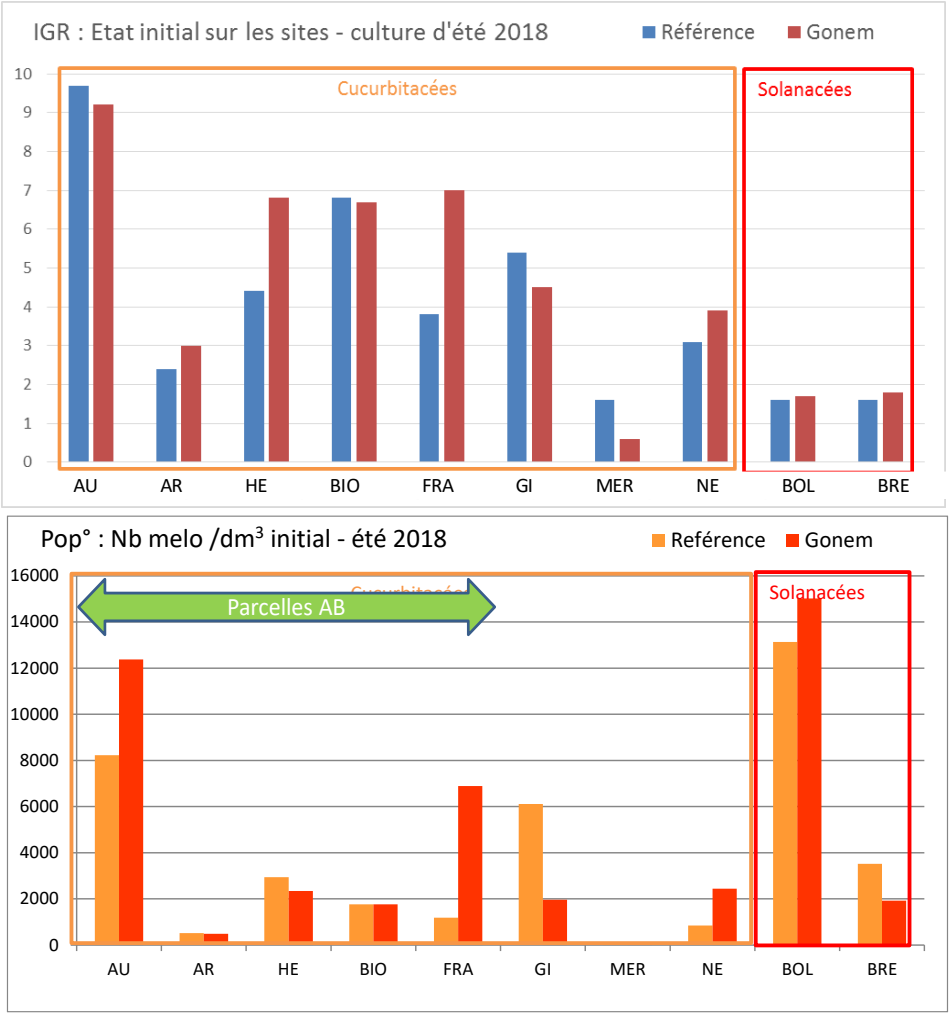



Figure 9 : Populations initiales de *Meloidogyne* spp. dans le sol (IS) sur les 10 sites, été 2018. Corrélation avec les IGR

### *Evolution des populations de nématodes à galles dans le sol*

De la même façon que pour les IGR, le calcul du ratio $\frac{Melo\ 2021 - Melo\ 2018}{Melo\ 2018}$ x 100 permet de rapidement visualiser l'évolution de chacun des systèmes entre le début et la fin du projet sur l'ensemble des sites (figure 10). On constate une réduction des populations sur 6 des 10 systèmes « GONEM », et 4 des systèmes « REF ». Le système GONEM se distingue de façon très significative du système REF sur 2 sites (AU, FR), ce qui était également le cas avec l'évolution des IGR sur ces sites. Globalement, l'évolution des populations entre le début et la fin de l'expérimentation sur chaque site est cohérente avec celle des IGR. La seule exception à cette règle est sur le site GI (voir fiche site n°8 en annexe), où les IGR ont baissé d'environ 50% sur melon mais les populations de *Meloidogyne* ont augmenté.

Pour les populations de nématodes à galles du sol, il est aussi important d'analyser les courbes d'évolution au cours des 4 années sur les différents sites pour juger de l'évolution en fonction des leviers/cultures réalisés (voir fiches sites en annexe).

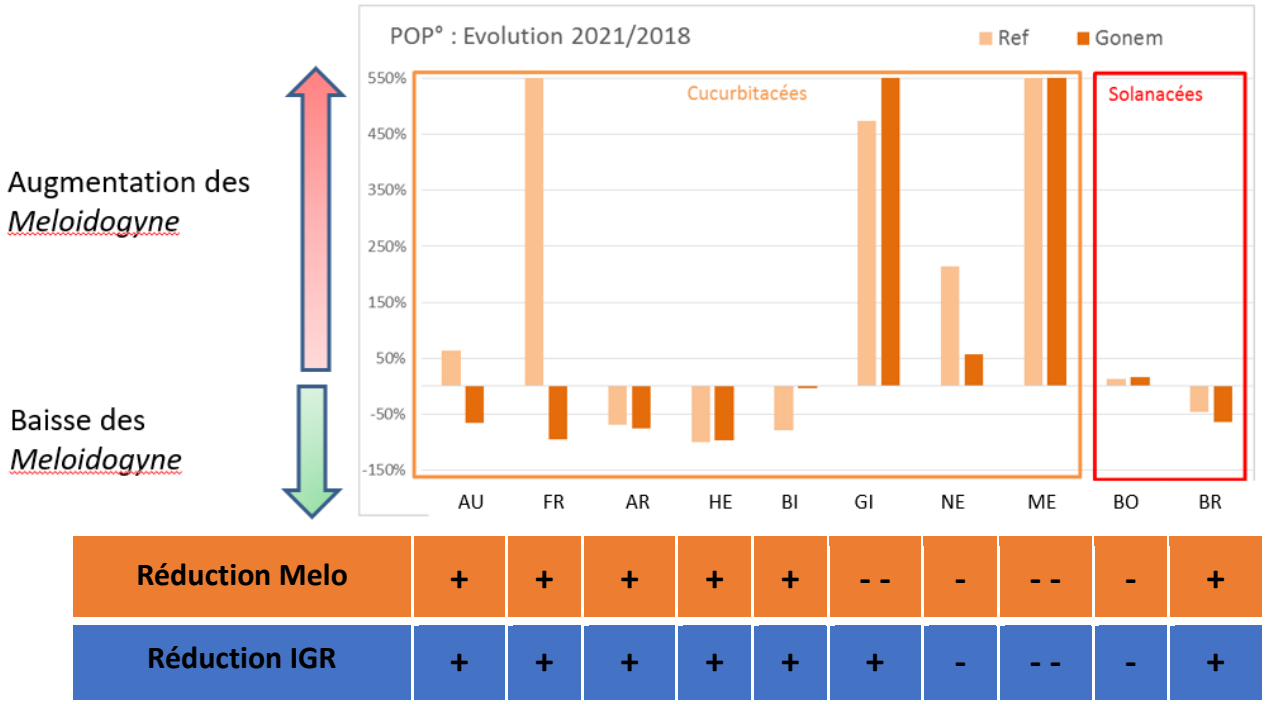



Figure 10 : Evolution des populations de *Meloidogyne spp.* entre l'été 2018 et l'été 2021

## 2.3 Espèces de nématodes à galles *Meloidogyne* présentes

La majorité des sites avait déjà fait l'objet de détermination d'espèces par le passé.
La détermination des espèces de *Meloidogyne spp.* présentes sur chaque site a été suivie par l'INRAE par électrophorèse d'estérases (*Fazari A., Bailly-Bechet M., Frendo Y., Djian-Caporalino C., 2019. Identification des espèces de Meloidogyne par électrophorèse d'estérase. Le Cahier des Techniques de l'INRA, CT97*) sur un échantillon de 50 à 100 femelles prélevées dans les racines de chaque culture aux 8 points de prélèvements définis pour chaque parcelle, et si possible sur chaque culture de chaque parcelle pour les sites expérimentaux, lorsque des femelles ont pu être prélevées dans les galles. Sur les sites élargis, les déterminations ont été réalisées en début et en fin d'essai sur une cinquantaine de femelles au minimum prélevées au hasard sur la culture.
Sur la majorité des sites, les analyses disponibles révèlent la **présence conjuguée des 2 espèces les plus répandues dans la région : *Meloidogyne arenaria* (M.a) et *Meloidogyne incognita* (M.i).** Seuls 3 sites semblent n'avoir la présence que d 'une espèce : M.a dans 2 cas et M.i dans l'autre (Tableau 4).
Cette détermination est essentielle car certaines cultures et intercultures sont plus ou moins sensibles à l'une ou l'autre des espèces de nématodes, et les références disponibles concernent surtout la sensibilité à *M. incognita*.

L'évolution des espèces en fonction des cultures a pu être analysée sur le site expérimental AU (Tableau 5). Si *M. incognita* semble majoritaire à T0 sur les 2 parcelles du site, il semble que tout en réduisant fortement les populations de *Meloidogyne*, les ITK ont modifié légèrement la proportion des 2 espèces, *M. arenaria* étant en proportion équivalente à *M. incognita* en fin d'essai. Néanmoins aucune contamination par *M. hapla* ou autre espèce de *Meloidogyne* n'a été observée, malgré la présence d'une longue culture de fraise (sensible à *M. hapla* en particulier).
Sur le site HE (Tableau 6), aucune femelle n'a pu être trouvée dans les galles des courgettes de la parcelle « Gonem » en fin d'essai. On observe sur la parcelle « Reference » la même évolution que sur le site AU, avec une diminution du pourcentage de *M. incognita* par rapport à *M. arenaria* qui devient prédominante. Aucune autre espèce n'a été décelée sur ce site.

**Tableau 4** : Détermination des espèces de *Meloidogyne spp*. présentes sur chaque site GONEM (moyenne des 8 prélèvements/parcelle en % de *M. incognita* sur le total des 50 à 100 femelles analysées/prélèvement)

| | | parcelle | | analyse précédente | autre pathogène identifié |
|---|---|---|---|---|---|
| | % Mi / (Mi+Ma) | Reference | Gonem | site | |
| AU | Melon T0 | 61 | 94 | Mi + Ma | |
| | Melon T35 | 43 | 58 | | |
| HE | Melon T0 | 66 | 90 | Mi + Ma | |
| | Courgette T36 | 37 | | | |
| BO | Poivron T0 | 99 | 94 | Mi + Ma | |
| | Poivron T36 | 99 | 98 | | |
| AR | Courgette T0 | 65 | 50 | (Mi) + Ma | |
| | Courgette T36 | ? | ? | | |
| FRA | Courgette T0 | 0 | 0 | Ma | |
| | Courgette T36 | 0 | 0 | | |
| MER | Salade T5 | | | Mi + Ma | Plectosphaerella |
| | Melon T24 | 0 | 0 | | |
| BIO | Pack Choi/Céleri | 100 | 100 | Mi | Agrobacterium |
| | Tomate greffée T | 100 | 100 | | |
| BRE | Tomate T0 | 100 | 100 | Mi + (Ma) | Colletotrichum |
| | Tomate T36 | | | | |
| NE | Concombre T12 | 100 | 100 | Mi + Ma | Pythium |
| | Concombre T36 | | | | |
| GI | Courgette T0 | | | Ma | Rhizoctonia |
| | Courgette T36 | | | | |

**Tableau 5** : Détermination des espèces de *Meloidogyne spp*. présentes sur le site AU après chaque culture

| SITE AU | parcelle | | |
|---|---|---|---|
| % Mi / (Mi+Ma) | Reference | Gonem | |
| Melon T0 | 61 | 94 | Melon T0 |
| Mâche T4 | 89 | 94 | Mâche T4 |
| Aubergine KNVFFr | 59 | 75 | Concombre T12 |
| Salade T18 | 87 | | Fraise |
| Melon T23 | 73 | | Fraise T22 |
| Mâche T27 | | | Mâche T27 |
| Salade T31 | | | Salade T31 |
| Melon T35 | 43 | 58 | Melon T35 |

**Tableau 6** : Détermination des espèces de *Meloidogyne spp*. présentes sur le site HE après chaque culture

| HE | parcelle | | |
|---|---|---|---|
| % Mi / (Mi+Ma) | Reference | Gonem | |
| Melon T0 | 66 | 90 | Melon T0 |
| Oignon T7 | 64 | 76 | Oignon T7 |
| Epinard T11 | 100 | | Navet T11 |
| Coriandre T21 | 99 | | Navet T23 |
| Courgette T36 | 37 | | Courgette T36 |

## 2.4 Communautés de nématodes phytophages et non phytophages

Comme précisé en introduction du paragraphe 2.2, les espèces phytophages du genre *Meloidogyne* cohabitent dans le sol avec d'autres espèces, phytoparasites ou non, qui contribuent à la régulation des attaques des nématodes *Meloidogyne*, d'où l'intérêt de les recenser. Les communautés de nématodes présentes sont déterminées et dénombrées à chaque fin de culture sur les sites du réseau « EXPE » et chaque été sur les sites du réseau « Elargi » avec la méthode indiquée dans le paragraphe 2.2.
Sur la majorité des sites, la nématofaune est largement dominée par les nématodes libres non phytophages (nématodes saprophages) et les nématodes à galles (Tableau 7).

**Tableau 7** : Nombre de nématodes à galle et libres, autres espèces phytophages présentes été 2018

| SITES EXPE | système | Nb Melo (nb/dm3) | Nem. Libres | Autres nématodes phyto |
|---|---|---|---|---|
| AU | REF | 8225 | 16470 | Telotylenchidae (Histotyl,Tylenchorhynchus) , Tylenchidae |
| | GO | 12380 | 15430 | Telotylenchidae (Histotyl,Tylenchorhynchus)), Tylenchidae, Hoplolaimu |
| AR | REF | 515 | 5223 | Helicotyl, Telotylenchidae (Histol-, Tylenchorhynchus), Tylenchidae |
| | GO | 480 | 7630 | |
| BOL | REF | 13135 | 7465 | Tylenchorhynchus, Tylenchidae, |
| | GO | 15020 | 9790 | |
| HE | REF | 2943 | 5955 | Helicotylenchus, Telotylenchidae (Histotyl,Tylenchorhynchus) , Tylench |
| | GO | 2341 | 7749 | Telotylenchidae (Histotyl,Tylenchorhynchus) , Tylenchidae |
| SITES ELARGIS | | Nb Melo (nb/dm3) | Nem. Libres | Autres nématodes phyto |
| BIO | REF | 1759 | 3278 | |
| | GO | | | |
| BRE | REF | 3520 | 9120 | Telotylenchidae (Histotyl, Tylenchorhinchus, telotylenchus), Tylenchida |
| | GO | 1920 | 1640 | Helicotylenchus, Tylenchorhynchus |
| FRA | REF | 1185 | 6000 | Tylenchorhynchus |
| | GO | 6889 | 8148 | |
| GI | REF | 6111 | 2667 | Tylenchorhynchus |
| | GO | 1963 | 3815 | |
| MER | REF | 93 | 3019 | Paratylenchus, Tylenchorhynchus |
| | GO | | | |
| NE | REF | 840 | 560 | Tylenchorhynchus |
| | GO | 2440 | 800 | |
| BOL 2 | REF | 417 | | |
| | GO | 946 | | |

### 2.4.1 Nématodes libres

Au démarrage des expérimentations, la densité de nématodes libres varie de façon importante avec moins de 1000 larves/dm3 de sol sur 1 site (NE) et jusqu'à plus de 15000 pour le plus riche (AU) (figure 11). L'abondance des nématodes libres semble indépendante des cultures et des systèmes de production, mais aussi de la densité de nématodes phytoparasites, et plus particulièrement des *Meloidogyne* spp. (le site AU a aussi une des populations de nématodes à galles initiale les plus élevées, voir fig. 9). Ces nématodes n'ont en effet pas la même source trophique et ne sont pas en compétition avec les nématodes phytophages. Ils sont un indicateur de l'activité biologique des sols.

Entre 2018 et 2021, on peut observer l'évolution des nématodes libres dur les différents sites et systèmes en calculant le même ratio que pour l'IGR et les populations de *Meloidogyne spp*. (figure 12). On constate qu'il n'y a globalement pas d'évolution importante des populations, sauf pour 2 sites, BI et GI, le système GONEM ayant un effet positif plus marqué sur ce dernier.

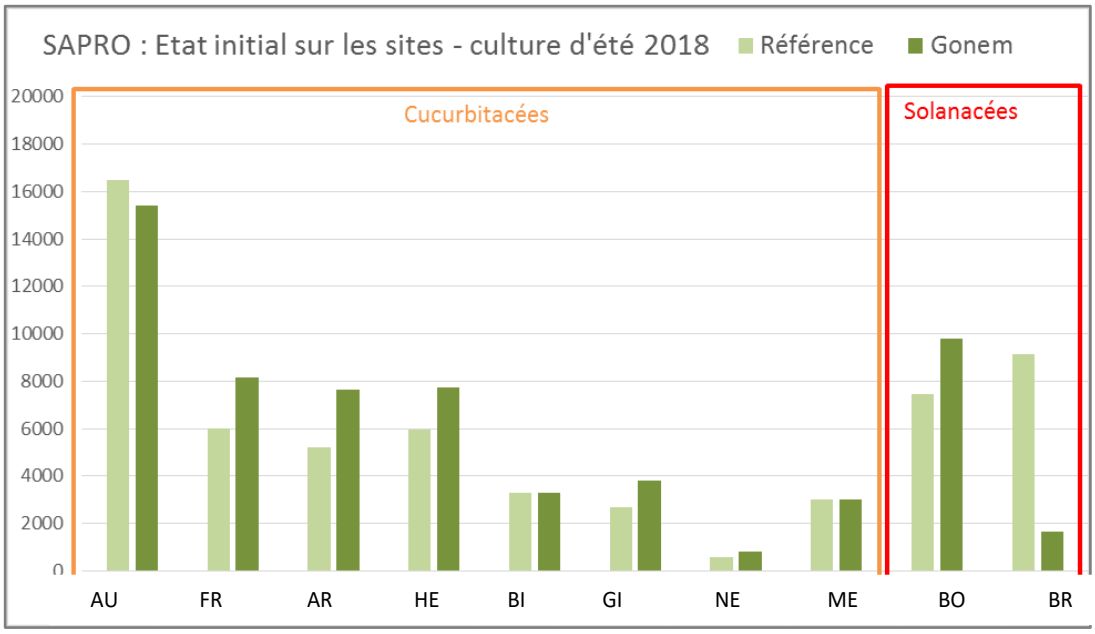



Figure 11 : Populations de nématodes libres initiales sur les 10 sites GONEM – été 2018

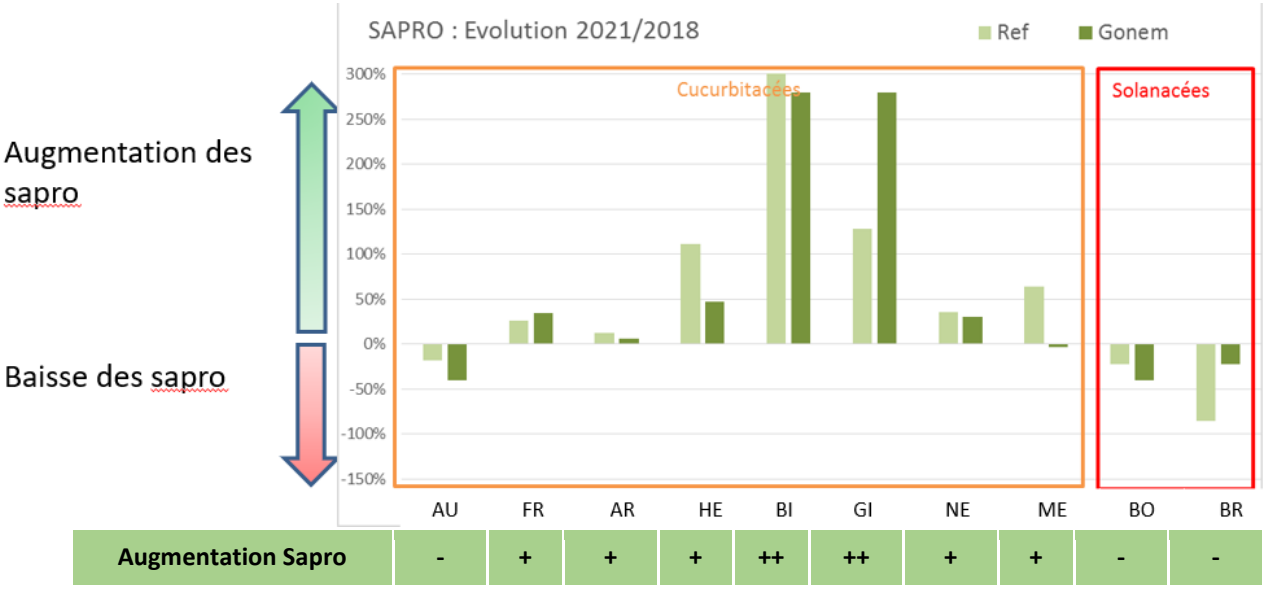



Figure 12 : Evolution des populations de nématodes libres entre l'été 2018 et l'été 2021

### 2.4.2 Nématodes phytophages

Plusieurs genres de nématodes phytophages ont été trouvés sur les sites Gonem avec une majorité de nématodes à galles. Leur mode de nutrition est donné dans la figure 13. Les ectoparasites font très peu de dégâts, les endoparasites migrateurs peuvent provoquer quelques nécroses racinaires surtout s'ils sont en nombre très élevé, les endoparasites sédentaires, dont font partie les nématodes à galles, causent le plus de préjudices à la plante car ils perturbent le système vasculaire de la racine et donc la nutrition de la plante.

La diversité des nématodes phytophages est extrêmement variable sur les sites GoNem. Certains sites possèdent une nématofaune très riche avec de nombreuses espèces présentes (site AR, tableau 7, figure 15 montrant autant de *Meloidogynidae* que des autres genres phytoparasites), mais la plupart des sites ont une nématofaune peu diversifiée (tableau 5) et/ou des effectifs limités (site AU où le nombre de larves de *Meloidogyne* est 100 fois plus important que le nombre des autres genres phytophages, figure 14).

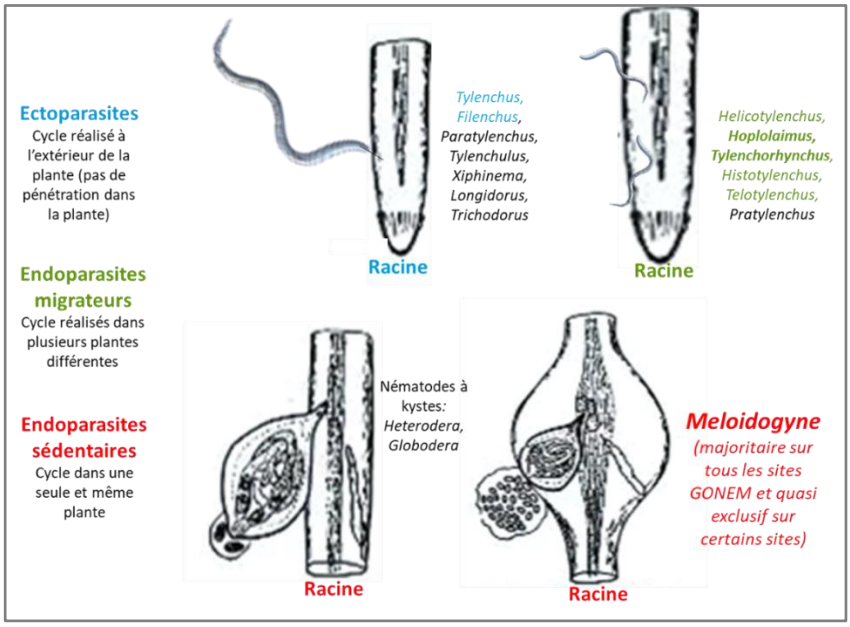



Figure 13 : Mode de nutrition des genres de nématodes phytoparasites
(en couleur, ceux trouvés sur les sites GONem, en caractère gras ceux majoritaires)

Lors du projet Inra Gedunem (2012-2016), Mateille et al. 2020 (*Mateille T., Tavoillot J., Goillon C., Parès L., Lefèvre A., Védie H., Navarrete M., Palloix A., Sage-Palloix A.M., Castagnone-Sereno P., Fazari A., Marteu N., Djian-Caporalino C., 2020. Competitive interaction in plant-parasitic nematode communities affecting organic vegetable cropping systems. Crop Protection 135: 1-6. DOI : 10.1016/j.cropro.2020.105206*) montrait une compétition entre *Meloidogyne* et d'autres espèces phytoparasites. Sur les suivis réalisés dans Gonem, il semble en effet qu'en tendance, plus les effectifs de nématodes à galles sont élevés (site AU par exemple), moins les autres communautés de nématodes phytoparasites sont présentes, et à l'inverse plus les effectifs de *Meloidogyne* sont faibles, plus les autres espèces phytophages sont abondantes et diversifées (site AR), suggérant effectivement une compétition entre ces différents nématodes phytophages.
Sur le site AR, on note l'apparition, après salades et mâches, d'*Aphelenchoides*, phytophage des parties aériennes des plantes (large gamme d'hôtes, même de champignons) et pas des racines comme les autres genres décrits figure 13. La prolifération de ce genre pourrait occasionner quelques dégâts selon les cultures (fraises, bulbes...).

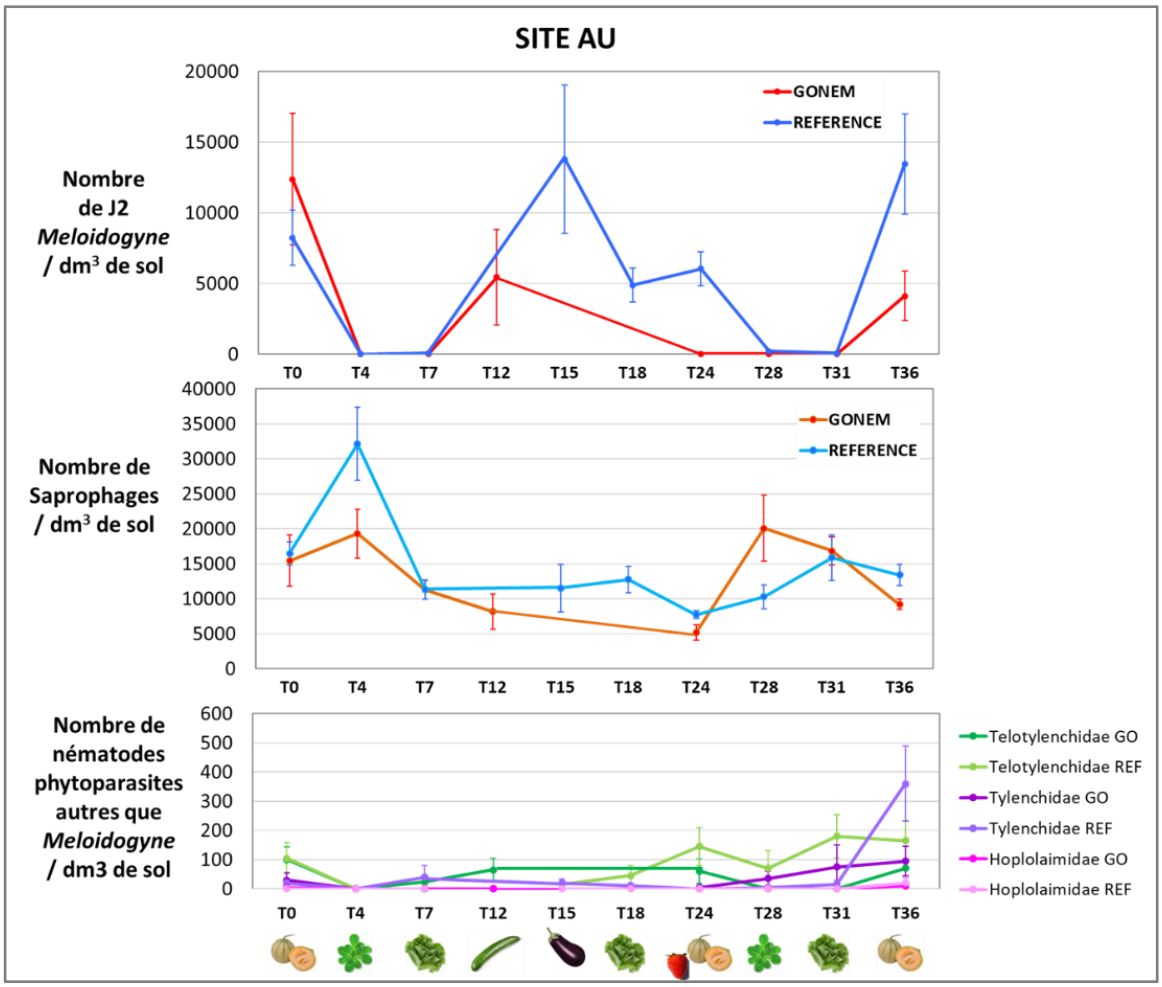



Figure 14 : Evolution de la nématofaune globale sur le site AU après chaque culture

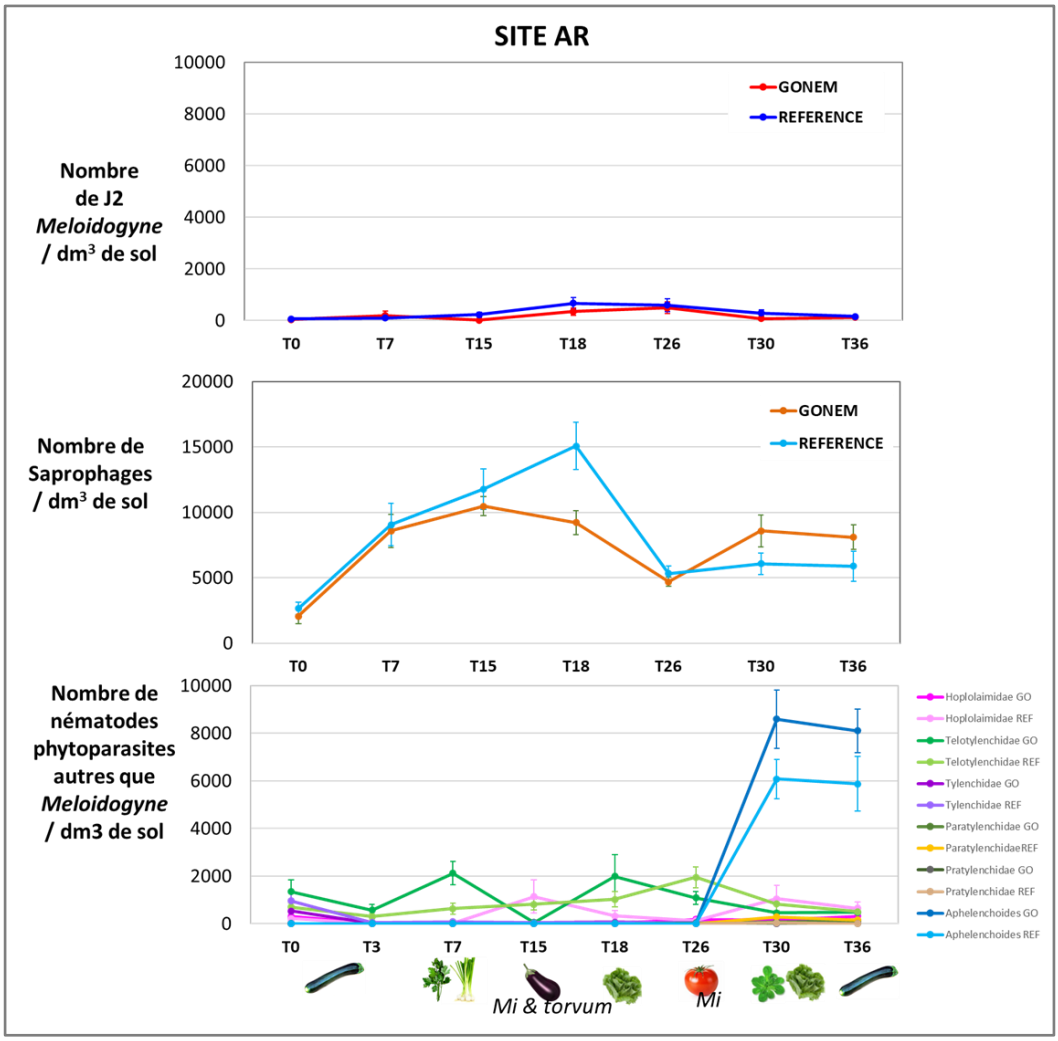



Figure 15 : Evolution de la nématofaune globale sur le site AR après chaque culture

## 2.5. Discussion sur l'évolution globale des paramètres mesurés à l'échelle du réseau

L'évolution globale des paramètres mesurés a été mise en parallèle avec différentes caractéristiques des systèmes tels que le mode de production (AB ou conventionnel), le taux de matière organique des sols, la diversité des nématodes phytoparasites, le niveau d'intensification (nb de cultures/4ans) ou de diversification, et la diversité des leviers utilisés pour limiter la reproduction des nématodes (fig.16).
On constate que :

- L'évolution des indicateurs nématologiques des systèmes GONEM sur la durée du projet, semble principalement corrélée aux caractéristiques suivantes, par ordre décroissant : le niveau de diversification des plantes cultivées, le nombre de leviers utilisés, le mode de production et le taux de MO dans les sols. La diversité de la nématofaune et l'intensité d'exploitation des parcelles (Nb de cultures/4ans) ne semblent pas avoir de lien avec les évolutions mesurées.

- Les sites où l'évolution des indicateurs nématologiques est la plus encourageante correspondent en général aux sites les plus diversifiés et où ayant mis en place un plus grand nombre de moyens de lutte (au moins 3 différents). En conséquence, les 5 sites en AB ont une évolution plus marquée que les sites en conventionnel, sauf sur le site en conventionnel « GI », qui a mobilisé un grand nombre de leviers de lutte et où le niveau de diversification est plus élevé que sur les autres sites en conventionnel.

| Systèmes GONEM | AU | FR | AR | HE | BI | GI | NE | ME | BO | BR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Augmentation Sapro | - | + | + | + | ++ | ++ | + | + | - | - |
| Réduction Melo | + | + | + | + | + | - - | - | - - | - | + |
| Réduction IGR | + | + | + | + | + | + | - | - - | - | + |

| Indicateurs | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Système | AB | AB | AB | AB | AB | conv | conv | conv | conv | conv |
| Taux de MO (%) | 2,5 | 4,5 | 3,7 | 3,4 | 3,4 | 3,9 | 2,8 | 2,3 | 2,5 | 3,1 |
| Diversité de la nématofaune (nb d'esp) | 1 (+3) | 1 (+1) | 3 (+2) | 1 (+3) | 1 (+3) | 2 (+1) | 2 (+1) | 2 (+1) | 1 (+3) | 3 (+3) |
| Nb de cultures /4 ans | 8 | 7 | 7 | 6 | 7 | 8 | 8 | 10 | 4 | 6 |
| Niveau de div° (%) | 67 | 67 | 75 | 86 | 63 | 56 | 42 | 23 | 40 | 43 |
| Nb de leviers alternatifs utilisés | 3 | 4 | 4 | 3 | 4 | 6 | 2 | 2 | 1 | 3 |

Figure 16 : Evolution des paramètres suivis sur les différents sites et caractéristiques des systèmes correspondants.
*Où « Niveau de diversification » est estimé par le ratio du nombre d'espèces différentes cultivées (cultures et engrais verts) sur le nombre de cycles de cultures (cultures et engrais verts), et « nb de leviers utilisés » caractérise la diversité des leviers mis en œuvre, indépendamment de la fréquence d'utilisation sur les 4 ans*

Les évolutions constatées sur les différents sites sont cependant plus liées au site qu'au système expérimenté car même si en tendance le système GONEM a permis de mieux contrôler les nématodes à galles que le système de référence (cf figures 8 et 10), l'effet n'a été très marqué que sur 2 des 10 sites. Ce résultat provient soit d'une distinction insuffisante du système GONEM et du système de référence sur une partie des sites, soit de l'impact plus marqué d'un levier que d'autres, même de façon ponctuelle.

# 3. Analyse de l'efficacité des différents leviers mobilisés dans le réseau expérimental GONEM

L'intérêt de disposer d'un réseau large de parcelles d'essais est qu'il permet de multiplier les observations sur un certain nombre de leviers qui ont pu être utilisés sur plusieurs sites. A l'échelle du réseau, les leviers les plus utilisés ont été les couverts « assainissants », qui ont été introduits dans les rotations dans les 10 sites suivis, avec 30 mises en place sur la durée du projet, et les cultures de diversification moins sensibles qui ont été utilisées sur 6 sites, avec 20 cultures (tableau 8). L'utilisation de porte-greffes résistants, et dans une moindre mesure la solarisation, les produits de biocontrôle et l'apport massif de matière organique sont les autres leviers principaux qui ont été mobilisés.

**Tableau 8** : Mesures et suivis réalisés dans les essais GONEM sur les exploitations maraîchères

| LEVIER | Nb de sites | Nb de fois | |
|---|---|---|---|
| 1-Couverts assainissants | 10 | 30 | 6 espèces |
| 2-Cultures moins sensibles | 6 | 20 | 8 espèces |
| 3-Porte-greffes résistants | 5 | 13 | |
| 4-Solarisation | 4 | 5 | |
| 5-Biocontrôle | 3 | 12 | |
| 6-Apport de MO | 2 | 4 | |

## 3.1 Couverts « assainissants »

Différents couverts à visée assainissante ont été mis en place en interculture. Ce levier présente l'avantage d'être assez facile à mettre en œuvre et de ne généralement pas remettre en question les rotations, il a donc été adopté par l'ensemble des producteurs du projet (figure 3). Les couverts d'été ont été utilisés par 8 producteurs, qui disposaient d'une disponibilité des parcelles après une culture de cucurbitacées ou de culture de printemps. Les couverts d'hiver (avoine) ont été mis en œuvre par 2 producteurs spécialisés en cultures de solanacées qui se terminent en septembre/octobre.
Deux stratégies ont été testées, qui renvoient à des espèces et des modes opératoires très différents i) utiliser des espèces de sensibilité modérée comme plante piège sur de courtes durées et les détruire une fois que les nématodes ont été piégés dans la racine mais avant l'apparition des pontes (de l'ordre de 3 semaines en été) ou ii) cultiver des espèces pas ou peu sensibles pour limiter la multiplication des nématodes sur des durées plus longues et favoriser la production de biomasse végétale incorporée dans le sol (et donc les régulations naturelles).

L'avoine d'hiver a été implantée 1 seule fois sur 2 parcelles différentes suite à des difficultés techniques de mise en place. Le nombre d'observations est donc limité, et n'a pas permis de mettre en évidence un effet de cette interculture par rapport à une sol nu ou une culture de laitue (figure 3). Les performances agronomiques de l'avoine sur le créneau hivernal sous abri sont néanmoins satisfaisantes, avec une croissance intéressante et une bonne maîtrise des adventices.

Les couverts assainissants d'été qui ont été testés (tableau 9) sont en majorité des sorghos fourragers en plante piège (« sorgho court » de 3 semaines environ en été), mais aussi des crotalaires, radis fourragers et quelques mélanges à base de crucifères (« rastaroquette ») ou graminée + légumineuse (« fumigator », mélange de sorgho fourrager et crotalaire).

**Tableau 9** : Couverts d'interculture d'été réalisés dans les essais GONEM sur les exploitations maraîchères

| Sorgho fourrager | Radis fourrager | Crotalaire |
|---|---|---|
| Piège, biofumigation | Mauvais hôte, biofumigation | Mauvais hôte |
| Graminées | Crucifères | Légumineuse |
| Piper, Barsudan<br>Hybrides : Sudal, Jumbo star, | Variété Doublet résistante à *M.chitwoodi, fallax, incognita, javanica* | *C. junceae,*<br>*C. spectabilis* |
| 1 à 3 semis de 17 à 25j | 1 seul semis 30 à 50 j | 1 seul semis 30 à 50j |
| 50 à 100 kg/ha | 30 kg/ha | 50 kg/ha |
| **Mélanges** | | |
| « Rastaroquette » : 80% Radis fourrager var Doublet + 20% roquette var Tiara<br>« Fumigator » : 1/3 Crotalaire *C. juncea* 1/3 Sorgho Jumbo star 1/3 Sorgho Tie Break | | |

### 3.1.1 Performances agronomiques des couverts testés

*Le sorgho fourrager*

Les implantations ont été réalisées, selon les sites et les années, entre le 3 juillet et le 8 octobre, pour des durées de 17 à 34 jours (pour l'implantation la plus tardive). Les doses de semis étaient comprises entre 50 et 100 kg/ha, pour tester la pertinence d'une augmentation du peuplement pour maximiser les piégeages racinaires. Les variétés testées étaient Piper et Barsudan pour les sorghos types « herbe du soudan », Sudal et Jumbo Star pour les sorgho hybrides.
La biomasse produite avec les couverts varie fortement en fonction de la date d'implantation et de la qualité de la levée. Le sorgho est une espèce rustique qui se développe généralement bien dans les conditions sous abris en été. En 2019, année particulièrement chaude, les résultats ont cependant été moins bons. Utilisé essentiellement en plante piège dans les essais GONEM, la rapidité du cycle de sorgho a permis de produire une biomasse maximale de l'ordre de 2 à 3 tonnes de matière sèche par hectare. On a donc peu d'effet « engrais vert » avec cette pratique.

*Le radis fourrager*

Le radis a été testé sur 5 parcelles expérimentales avec des implantations entre avril et août, pour des durées de 25 à 50 jours. Il était en général associé à la roquette dans le mélange « Rastaroquette» (Semences de France) avec la proportion 80/20, et des doses de semis de 30 à 50 kg/ha. Seul le radis de la variété « Doublet » (Semences de France), affiché comme résistant à *M. chitwoodi, M. fallax, M. incognita et M. javanica* a été étudié dans le cadre de Gonem.
Ce couvert se développe assez rapidement et produit les biomasses les plus importantes des couverts testés dans le réseau GONEM pour des durées de culture similaires. Il est par contre pénalisé au cœur de l'été par rapport au sorgho car plus sensible à la sécheresse. Même si l'effet « engrais vert » est intéressant de par la biomasse produite et l'enracinement profond, le principal frein de ce couvert est son attractivité pour de nombreux ravageurs (punaises, altises, teignes) ou de champignon (*sclerotinia*) susceptibles de contaminer les cultures alentour. La présence de galles et pontes de nématodes a facilement été observée également sur les racines.

*La Crotalaire*

La crotalaire est une légumineuse tropicale bien adaptée aux conditions estivales sous abri en zone méditerranéenne. C'est essentiellement la crotalaire *C. juncea* qui a été testée dans le réseau, avec 4 parcelles en crotalaire seule, et 3 parcelles en mélange Crotalaire + sorgho (mélange « Fumigator » de la société Caussade). *C. juncea* est une crotalaire à la croissance assez rapide et au port dressé, qui produit jusqu'à 5 tonnes de matières sèche par hectare pour une durée de culture de 50 jours. *C. spectabilis* a été testée une seule fois dans le projet et a une croissance moins rapide qui laisse la place aux adventices.

### 3.1.2 Effet des couverts assainissants sur le système

L'évaluation du levier couvert assainissant n'est pas toujours aisée car :

- Son effet dépend des conditions de mise en œuvre. Nous avons observé qu'environ 1/3 des couverts réalisés ne pouvaient pas être correctement évalués car ils se sont mal implantés et les adventices, potentiellement hôtes des nématodes, se sont développées. Selon les cas, la mauvaise implantation peut résulter d'une mauvaise qualité de semis, d'une mauvaise germination des semences, d'un stress hydrique, de l'action des fourmis qui déplacent les graines et rend le couvert hétérogène.
- Les couverts ont principalement été cultivés l'été, l'effet à court terme est donc évalué sur une culture suivante d'hiver, avec moins de symptômes de nématodes, et souvent des cultures différentes sur les 2 systèmes GONEM et Ref suivis sur 1 site.

2 sites du réseau GONEM, en agriculture conventionnelle, ont utilisé le levier « couverts assainissants » comme levier principal avec, sur le système « REF », 1 à 2 sorghos courts en interculture estivale chaque année et sur le système « GONEM », des couverts de « rastaroquette », crotalaire et sorgho. Il s'agit des sites « NE » et « ME », avec des successions culturales de concombre-laitue et melon-laitue respectivement (voir figure 3 p.5). Sur ces 2 sites, indépendamment du système Ref ou Gonem, les indicateurs nématologiques, ratio d'évolution d'IGR (figure 8) et ratio d'évolution des populations de *Meloidogyne spp*. (figure 10) sont clairement à la hausse. L'évolution au cours du temps des IGR pour chaque culture réalisée sur ces parcelles pendant toute la durée du projet (figure 17) ne montre aucune diminution des niveaux d'infestation liée aux couverts végétaux d'été. Il apparaît donc sur ces 2 sites que le levier d'interculture utilisé quasiment seul, a été insuffisant.

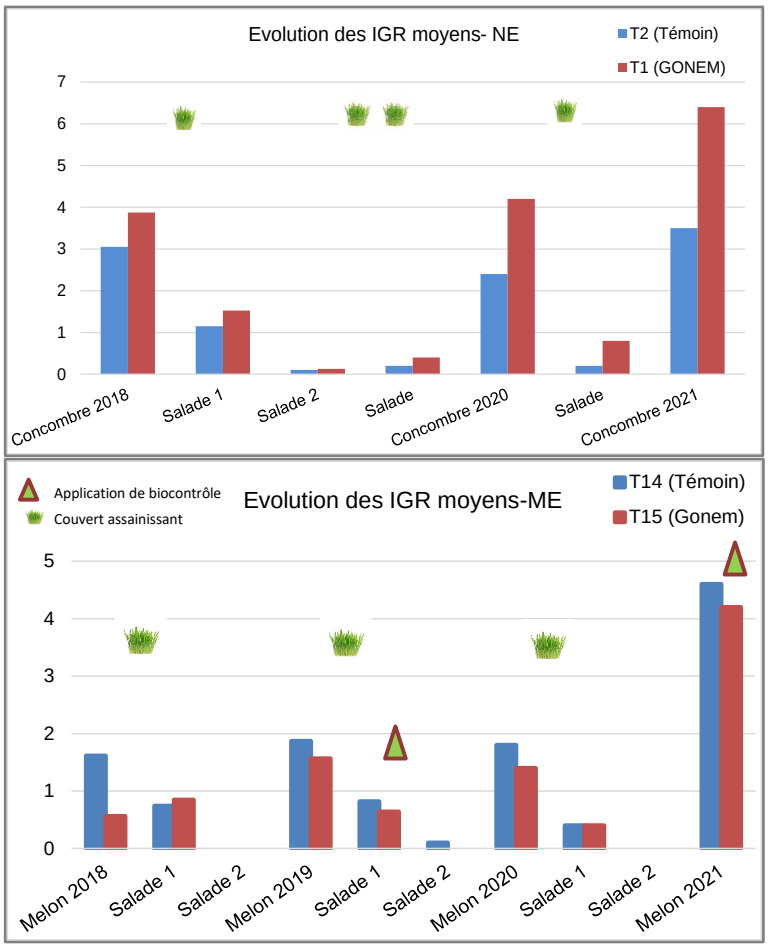



Figure 17 : Evolution des IGR moyen avec couvert assainissant estival annuel sur les sites NE et ME

Il est donc très important de combiner le levier « couvert » avec d'autres leviers et de bien suivre son mode d'emploi (durée de culture inférieur à 3-4 semaines, densité de semis et élimination des mauvaises-herbes,

fermeture du sol après incorporation dans le sol) pour avoir un effet plus durable comme montré dans les essais Gedunem (2012-2016) et Gedubat (2012-2017) *(Djian-Caporalino C. & Navarrete M., Fazari A., Marteu N., Bailly-Bechet M., Dufils A., Tchamitchian M., Lefèvre A., Pares L., Mateille T., Tavoillot J., Palloix A., Sage-Palloix A.M., Védie H., Goillon C., Castagnone-Sereno P., 2019. Conception et évaluation de systèmes de culture maraîchers méditerranéens innovants pour gérer les nématodes à galles. Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement (BASE) 23 (1): Protection des Plantes dans les Agroécosystèmes Méditerranéens,7-21 [En ligne] DOI: 10.25518/1780-4507.17725 ; Djian-Caporalino C., Mateille T., Bailly Bechet M., Marteu N., Fazari A., Bautheac P., Raptopoulo A., Van Duong L., Tavoillot J., Martiny B., Goillon C., Castagnone-Sereno P., 2019. Evaluating sorghums as green manure against root-knot nematodes. Crop Protection 122: 142-150 doi:10.1016/j.cropro.2019.05.002; Goillon C., Mateille T., Tavoillot J., Marteu N., Fazari A., Djian-Caporalino C., 2016. Utiliser le sorgho pour lutter contre les nématodes à galles. Phytoma La défense des végétaux, n° 698, Novembre 2016, 39-44).*

### 3.1.3 Estimation du risque de reproduction des nématodes sur les couverts d'interculture

Pour mieux cerner le potentiel de ces différentes plantes d'interculture, des racines des plantes récoltées sur les essais au champ ont régulièrement été analysées au laboratoire de l'INRAE pour observer la pénétration de nématodes dans les racines après traitement à la fuschine acide (protocole INRAE), et la présence de femelles et de pontes après coloration à l'éosine B 4,5 g/L (protocole INRAE). Ces observations permettent d'estimer un potentiel de reproduction des nématodes dans les racines de ces plantes. Le résultat des différentes observations réalisées est présenté dans le tableau 10.

**Tableau 10** : Présence de femelles et ponte de *Meloidogyne spp*. sur couverts d'interculture d'été dans les essais GONEM sur les exploitations maraîchères

| Espèce | Variété | Semis | Durée | Femelles | Pontes |
|---|---|---|---|---|---|
| sorgho | Piper | 03-juil | 20 | non | non |
| | Jumbo | 01-août | 21 | oui | oui |
| | Piper | 01-août | 23 | oui | non |
| | Piper | 03-août | 21 | non | non |
| | Sudal | 02-août | 20 | non | non |
| | Sudal | 01-août | 21 | non | non |
| | Jumbo | 25-août | 25 | oui (peu) | non |
| | Jumbo | 01-août | 21 | non | non |
| crotalaire | C.juncea | 04-août | 24 | non | non |
| | C.juncea | 07-août | 50 | non | non |
| | C.juncea | 10-juil | 49 | non | non |
| | C.juncea | 20-juin | 34 | non | non |
| Radis fourrager | Doublet | 02-août | 50 | oui | oui |
| | Doublet | 02-août | 20 | oui (bcp) | non |
| | Doublet | 01-août | 21 | oui | non |
| | Doublet | 07-août | 50 | oui | oui |
| | Doublet | 10-juil | 49 | non | non |
| | Doublet | 25-août | 25 | oui | non |
| | Doublet | 30-avr | 35 | non | non |
| | Doublet | 30-avr | 35 | non | non |

Ces observations permettent de compléter les informations sur l'intérêt potentiel des couverts d'interculture testés (en complément des essais en conditions contrôlées, cf partie 4) :

- Les sorghos confirment une sensibilité, même mesurée, aux nématodes car la présence de pontes a été observée sur 1/8 observation, sur la variété Jumbo. Le risque est limité si les intercultures sont de courte durée, ce qui semble confirmer l'intérêt de la stratégie plante piège avec le sorgho, même si le résultat sur la culture sensible suivante n'est pas toujours évident,
- Le radis fourrager « Doublet » (présenté comme résistant aux nématodes à galles) utilisé notamment dans le mélange « Rastaroquette » peut présenter des femelles dans les racines mais pas de pontes lorsque la durée de culture est courte. Les pontes apparaissent si la durée de culture est de 50 jours ou plus. Cette variété ne confirme donc pas la résistance aux nématodes à galles dans nos suivis, ce qui peut être lié la présence de *M. arenaria* sur la plupart des parcelles. Le radis pourrait donc être utilisé comme plante-piège sur une courte durée, mais le risque de multiplication apparaît plus élevé que pour le sorgho et les contraintes agronomiques de cette espèce le rendent moins pertinent en système maraîcher (sensibilité au sclerotinia, à la chaleur et forte attractivité d'insectes) ;

- La crotalaire *C. juncea*, dont la résistance est bien argumentée dans la bibliographie, ne présente ni femelles, ni pontes même pour une durée d'interculture de 50 jours. Elle pourrait donc être utilisée en interculture de longue durée en été. C'est la seule espèce qui apparait potentiellement vraiment résistante aux nématodes dans les observations réalisées.

Il faut par ailleurs être très vigilant sur la présence d'**adventices**, même en faible quantité, dans les couverts qui peut compromettre la réussite de l'effet « assainissant ». En effet, la plupart des systèmes racinaires des adventices prélevés dans les couverts sur le terrain et traitées, comme les plantes de couverture, à la fuschine acide et à l'éosine, présentent des femelles et des pontes, même sur des cycles assez courts qu'elles présentent des galles en quantité (morelle, chénopode) ou pas (pourpier) (tableau 11).
Il est donc nécessaire d'éliminer ces plantes adventices rapidement quand elle se développent dans les cultures, et de détruire rapidement les couverts d'interculture s'ils sont très contaminés par les adventices afin d'éviter tout risque de reproduction.

**Tableau 11** : Présence de femelles et ponte de *Meloidogyne spp.* sur adventices dans les couverts d'interculture d'été dans les essais GONEM

| Espèce adventice | Cycle | **Femelles dans les racines** | **Pontes** |
|---|---|---|---|
| Morelle | 20j | Oui, nombreuses | **OUI** |
| Pourpier | 25j | Oui | **OUI** / NON |
| | **50j** | Oui | **OUI** |
| Chénopode | **50j** | Oui | **OUI** |

## 3.2 Cultures mauvais hôtes

Le 2ème levier le plus mobilisé dans les essais est l'introduction dans les rotations de différentes cultures à priori « mauvais hôtes » des nématodes à galles. Elles ont été implantées sur plusieurs sites (en AB majoritairement) du réseau de parcelles GONEM en alternative à des cultures sensibles comme la salade ou le persil. Il s'agit essentiellement de cultures mises en place à l'automne, la mâche et l'oignon botte étant les plus représentées (tableau 12), mais également de quelques cultures de printemps, comme le fenouil et le navet qui remplacent les cultures longues de cucurbitacées ou solanacées l'été. La plupart de ces cultures « de diversification » occupent les parcelles pendant 2 à 5 mois, mais nous avons eu dans le réseau des cultures longues de fraise et de roquette (cultivée avec plusieurs coupes jusqu'en mai et conservée en engrais vert ensuite).

**Tableau 12** : Cultures moins sensibles introduites dans les rotations sur la durée du projet GONEM

Des cultures d'automne ou printemps de 2 à 5 mois

| Cultures observées | Nb de sites | Nb de fois | Variétés |
|---|---|---|---|
| 1-Mâche | 5 | 8 | Trophy 7/8 - Princess 1/8 |
| 2-Cébette | 4 | 5 | Rebouillon 4/5 - Totem 1/5 |
| 3-Navet | 1 | 2 | Globe |
| 4-Fenouil | 1 | 1 | Solaris |
| 5-Epinard | 1 | 1 | Puma |
| 6- Chou Rave | 1 | 1 | Korrist |
| 7-Fraise | 1 | 1 | Dely |
| 8-Roquette | 1 | 1 | Soria |

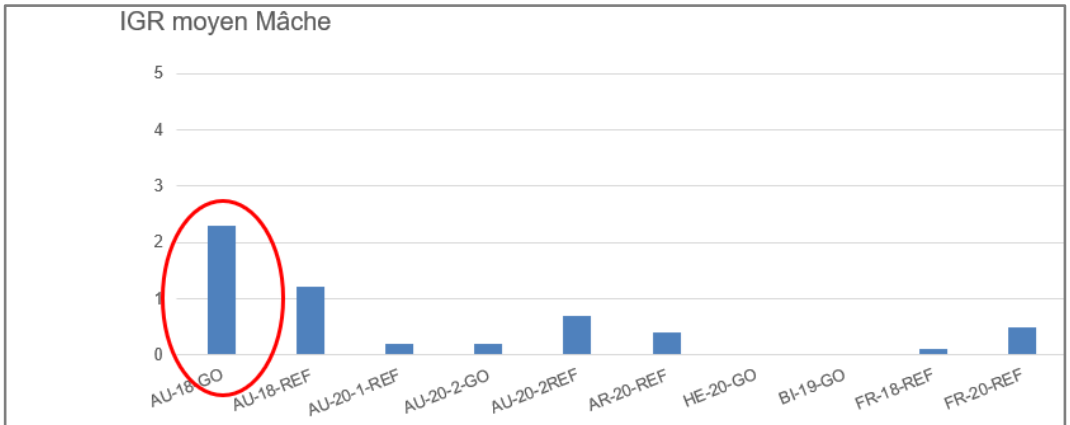
Des cultures de 8-9 mois
Pas de culture d'été sensible

28

### 3.2.1 Performances des cultures de cycle court

*La mâche*

Sur les 10 parcelles observées en mâche pendant les 3 années de suivi, les IGR moyens sont en général très faibles, inférieurs à 1 (figure 18). Seul le site « AU » présente des IGR moyens sur mâche compris entre 1 et 2 au début du projet en 2018. Sur ce site, initialement l'un des plus infesté (voir figures 7 et 9), les systèmes racinaires les plus touchés de la parcelle atteignent alors un IGR de 4. On peut donc conclure de ces observations que la mâche s'avère en général peu sensible, mais qu'elle peut atteindre des IGR non négligeables en sites très infestés.
En parallèle, les populations de larves de nématodes à galles mesurées dans le sol à la fin des cultures de mâche sont toujours limitées, avec moins de 300 individus/dm$^3$ de sol. On a pu observer des femelles dans les racines des plantes plus infestées, mais pas de pontes (figure 18). Il n'y a donc à priori pas de reproduction des nématodes sur le cycle des mâches, même si le nombre d'observations est trop faible pour pouvoir vraiment l'affirmer.




| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Larves Melo sol (nb/dm$^3$ sol) | 0 | 0 | - | 25 | 215 | 293 | 0 | - | - | - |
| Femelles | Oui | Non | | | | | | | | |
| Pontes | Non | Non | | | | | | | | |

Figure 18 : IGR moyens observés sur les cultures de mâche, population de larves de nématodes à galles mesurées dans le sol à la fin des cultures et femelles et/ou pontes observées dans les racines après coloration à l'éosine

*La « cébette » ou « oignon botte »*

Sur les 8 parcelles observées en « cébette » pendant les 3 années de suivi, les IGR moyens sont en général quasi nuls (figure 19). Il y a peu ou pas de larves de *Meloidogyne spp*. présentes dans le sol en fin de culture, les dénombrements étant toutefois limités à 4 occurrences (pas de mesures sur les sites du réseau « élargi »). Les observations des racines collectées sur les sites, après traitement à la fuschine acide et coloration à l'éosine, montrent qu'il n'y a à priori pas de reproduction sur la variété « Rebouillon » de l'espèce *A. cepa*, mais qu'il y a reproduction sur la variété « Totem » de l'espèce *A. fistulosum*, ces 2 espèces pouvant être récoltées en « cébettes ».

*Autres cultures courtes de printemps*

Le nombre d'observations est limité sur d'autres cultures potentiellement mauvais hôtes car elles sont beaucoup moins répandues chez les producteurs du réseau. Les mesures réalisées montrent que les IGR moyens et les populations de larves de nématodes dans le sol sont faibles sur navet, fenouil et chou rave (tableau 13). Ces plantes sont donc potentiellement intéressantes à introduire dans les rotations, mais leur

effet peut également être lié au positionnement dans le cycle de culture : au printemps, lorsque le sol n'est pas encore très chaud (donc l'activité des nématodes à galles M.i et M.a limitée) et sur une durée courte.

Globalement les plantes « mauvais hôtes » testées dans le projet sur la période hiver-printemps semblent intéressantes pour limiter les risques de reproduction des nématodes en comparaison de cultures plus classiques sensibles comme la salade ou le persil.
Cependant, il ne faut pas généraliser à toutes les espèces "de diversification" car des observations plus ponctuelles sur certains sites ont montré une forte sensibilité du céleri, de la betterave, de la coriandre, du basilic ou du chou pak choï qui présentaient de nombreuses galles.

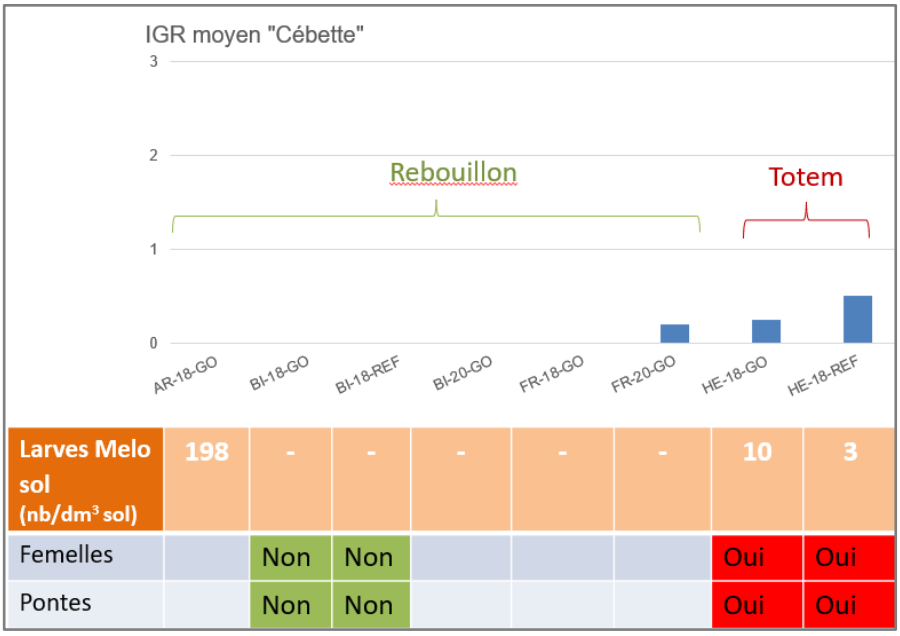



Figure 19 : IGR moyens observés sur les cultures de « cébette » (*A. cepa* var Rebouillon et *A. fistulosum* var Totem), population de larves de nématodes à galles mesurées dans le sol à la fin des cultures et femelles et/ou pontes observées dans les racines après coloration à l'éosine

**Tableau 13** : IGR moyens observés sur cultures « mauvais hôtes » de printemps, population de larves de nématodes à galles mesurées dans le sol à la fin des cultures

| | HE 2019 | HE 2020 | GI 2019 | FR 2020 |
|---|---|---|---|---|
| **Espèce**/Variété | **Navet** globe | **Navet** | **Fenouil** Solaris | **Chou rave** Korrist |
| Date Plantation | 15/03 | 15/03 | 6/03 | 28/02 |
| IG moyen | 0 | 0 | 0 - 0,15 | 0,3 |
| Nb melo/l sol | 0 | 10 | - | - |

### *Effet des cultures « mauvais hôtes » courtes (2 à 5 mois) sur le système*

Sur 2 systèmes « Ref » du réseau, on peut observer l'évolution des niveaux d'infestation des parcelles, avec peu d'autres leviers mobilisés que des cultures peu sensibles courtes de mâche. Sur le site « AU », on constate que 3 cultures de mâches successives cultivées à l'automne (2018 et 2020) et au printemps (2020) n'ont pas permis de limiter de façon nette les IGR sur les cultures d'été sensibles suivantes (figure 20). Même constatation sur le site « FR », où une culture de mâche pendant l'automne-hiver 2020-2021 n'a pas permis de limiter l'augmentation des IGR sur la courgette d'été 2021.

La mise en œuvre unique de ce levier ne permet donc pas de diminuer le niveau d'infestation des parcelles de façon significative.

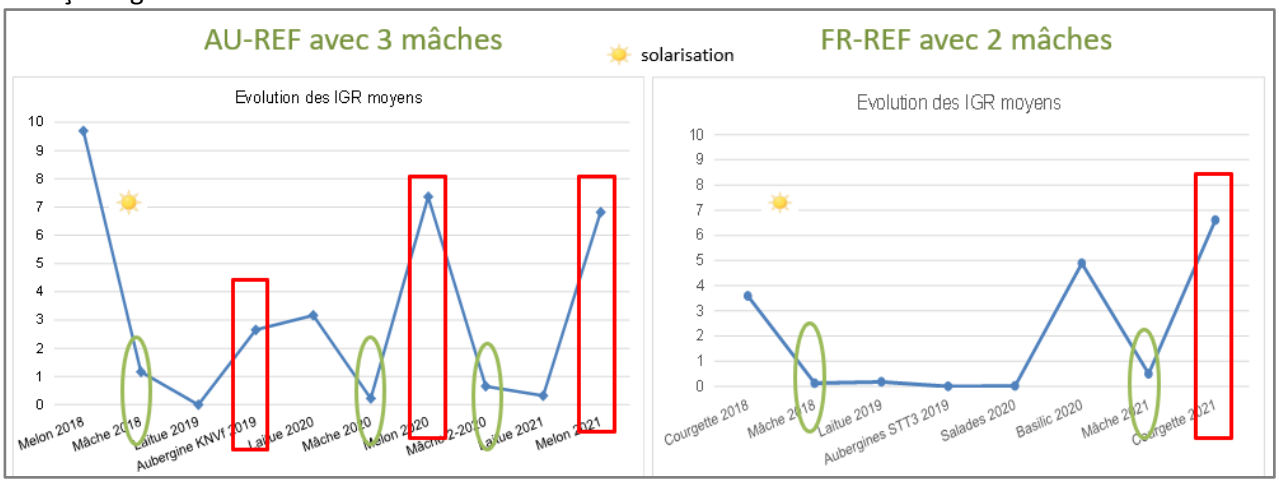



Figure 20 : Evolution des IGR moyens sur les systèmes « REF » du site « AU », avec 3 cultures de mâches, et du site « FR » avec 2 cultures de mâche sur la durée du projet

### 3.2.2 Performances des cultures de cycle long : roquette et fraise

Les observations réalisées dans le projet GONEM sur ces 2 cultures longues sont limitées à 2 sites, car ce sont des espèces qui n'étaient pas cultivées chez les autres producteurs du réseau. Elles ont été implantées sur les parcelles « Gonem » sur ces sites d'expérimentation, mais pas sur les parcelles « Ref », permettant de juger de l'évolution comparée des 2 systèmes.
On constate que sur le site « AU », avec une infestation forte en *Meloidogyne incognita* et *M. arenaria*, une culture de fraise (variété « Dely ») cultivée pendant 9,5 mois ne présente aucune galle et que la population de larves de nématodes dans le sol est quasi nulle en fin de culture (tableau 14). Nous pouvons faire la même observation sur le site « He », où une roquette de type sauvage (*Diplotaxis erucoides, var. « Soria »)* a été cultivée pendant 7,5 mois. Ces 2 plantes semblent donc avoir permis une véritable coupure dans le cycle des nématodes sur ces 2 sites.

**Tableau 14** : IGR moyens observés sur cultures de fraise et roquette, population de larves de nématodes à galles mesurées dans le sol à la fin des cultures

| | He 2019-2020 | Au 2019-2020 |
|---|---|---|
| Variété | Roquette Soria | Fraise Dely |
| Date Plantation | 22/10/2019 | 5/09/19 |
| Date arrachage | 2/06/2020 (7,5 mois) | 25/06/2020 (9,5 mois) |
| IG moyen | 0 | 0 |
| Nb melo/l sol | 25 | 25 |

*Effet des cultures « mauvais hôtes » longues (plus de 7 mois) sur le système*

Sur les 2 systèmes « Gonem » du réseau où les cultures de 7,5 mois de roquette (système HE-GO) ou 9,5 mois de fraise (système AU-GO) ont été réalisées en 2019/2020, on observe une diminution importante et semble-t 'il plus durable du niveau des IGR moyens (figure 21). Cette baisse des contaminations s'observe également sur les niveaux de populations de larves de *Meloidogyne spp.* dans le sol sur ces 2 sites (voir fiches sites n° 1 et 4 en annexe). Ce levier semble donc avoir un impact assez net sur l'évolution des

contaminations des parcelles, même s'il n'est pas définitif car les niveaux d'IGR remontent légèrement sur la culture sensible d'été finale en 2021.
Il faut toutefois garder une certaine réserve sur cette conclusion car sur les 2 systèmes GONEM concernés, d'autres leviers ont été mobilisés, tels que solarisation, cultures mauvais hôtes courtes (cébettes, navet, mâche) et sorgho piège. C'est donc l'effet d'une combinaison de leviers que l'on peut observer et non l'effet d'un seul levier.

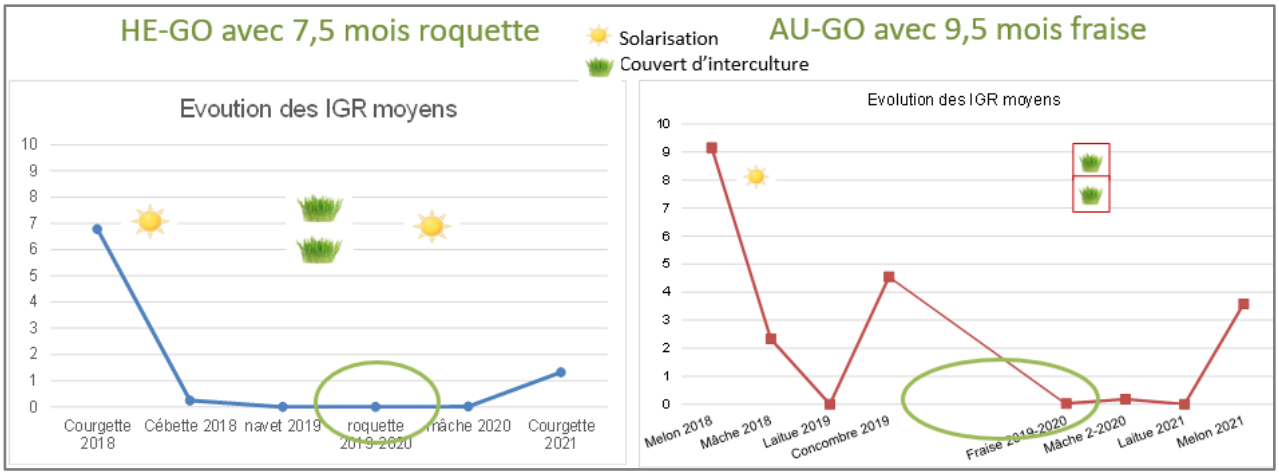



Figure 21 : Evolution des IGR moyens sur les systèmes « GONEM» du site « HE », avec culture de roquette sauvage et du site « AU » avec culture de fraise

## 3.3 Porte-greffes résistants

Le greffage est utilisé seulement pour les cultures de Solanacées Tomate et aubergine, pour lesquelles il existe des porte-greffes résistants aux nématodes et le greffage est quasi systématique pour ces cultures. Pour les 2 cultures, ce sont des porte-greffes "KNVFFr" possédant le gène Mi de résistance à la plupart des nématodes du genre *Meloidogyne*, notamment M.i et M.a présents sur les parcelles du réseau GONEM. Sur le terrain, on observe cependant de plus en plus souvent des galles, mettant en évidence une fragilité de cette résistance.
Pour l'aubergine, il existe une autre espèce de porte-greffe *Solanum Torvum* également résistant aux nématodes. Ce porte-greffe nécessite des températures plus élevées, il faut donc adapter le calendrier de culture avec une plantation plus tardive.
Dans le réseau de parcelles GONEM, le levier porte-greffe a été utilisé dans 5 parcelles. On ne peut pas juger de l'effet de ce seul levier dans le réseau de parcelles où le greffage est intégré à une combinaison de différents leviers, néanmoins, des observations ponctuelles sur certains sites permettent de faire des comparaisons de certains porte-greffes.

### *Porte-greffe aubergine Solanum torvum*

Ce porte-greffe a été utilisé sur 2 sites en 2019. Sur le site « AR », ce porte-greffe a été utilisé dans le système GONEM, alors qu'un porte-greffe tomate plus classique (var « Emperador ») a été utilisé dans le système « REF ». L'IGR et le nombre de larves de nématodes à galles dans le sol en fin de culture étaient nuls sur la parcelle en *S. torvum* alors que de rares galles et des larves de nématodes étaient présentes sur le système REF (figure 22). Mis en place sur les 2 systèmes, REF et Gonem du site FR (voir fiche site n°7 en annexe), on a également mesuré des IGR et populations de larves de nématodes quasi nuls sur *S. torvum.*

### *Porte-greffe tomate (gène Mi)*

Sur le site « BI », la tomate a été greffée sur 2 porte-greffes différents en 2020 : sur « Fortamino » sur le système REF et sur « Equifort » sur le système Gonem. Il s'est avéré que le porte-greffe « Equifort » était nettement plus sensible que « Fortamino » avec des IGR et populations de larves plus élevées dans le sol en fin de culture (figure 22).

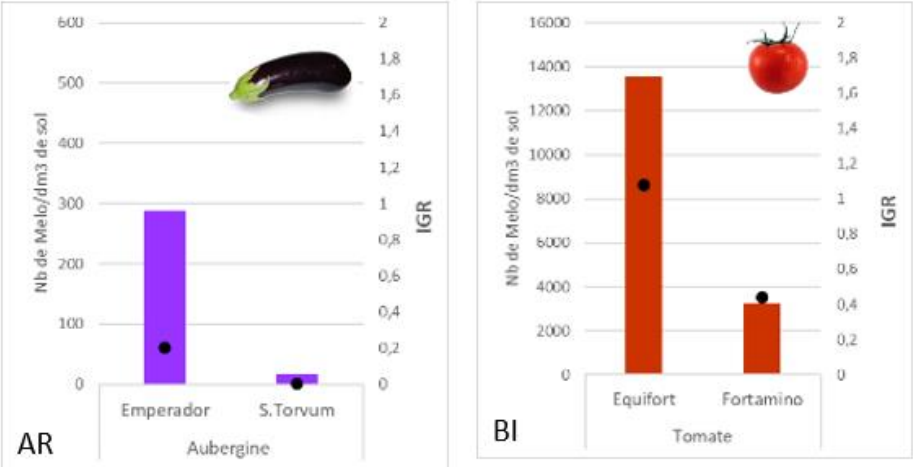



Figure 22 : IGR moyens et populations de larves dans le sol en fin de culture d'aubergine (AR) ou de tomate (BI) sur différents porte-greffes

Sur porte-greffe tomate résistant KNVF, on a constaté que sur certains sites, on observait une diminution des IGR sur les cultures en comparaison aux cucurbitacées cultivées l'été précédent, mais que les populations de nématodes à galles augmentaient dans le sol : cela a été le cas sur le site « AU » (voir fiche site n°1), où les populations ont augmenté de 40% entre le melon 2018 et l'aubergine greffée sur tomate en 2019, et sur le site « BI » (voir fiche site n°5) où les populations ont augmenté de 63% entre concombre 2018 et tomate 2019. Il peut s'agir dans ces cas soit d'une désactivation du gène de résistance *Mi*, inactif au-delà de 30°C, soit de la présence de nématodes virulents qui contournent cette résistance, soit enfin comme le poivron de 2018 sur le site « BO » (cf page 16), peu d'expression de symptômes racinaires (fond génétique partiellement résistant) mais permettant quand même la multiplication des nématodes dans le sol. Ces porte-greffes KNVF et variétés de poivrons ont été testés dans les essais en conditions controlées et les résultats sont donnés Figure 30.

Dans un système conventionnel spécialisé en tomate (BR, fiche site n° 6), on observe par ailleurs une hausse très importante (400%) sur la tomate greffée (porte-greffe résistant KNVF) en l'absence de traitement Velum prime sur le système GONEM pendant 3 ans.

## 3.4 Solarisation

La solarisation a été mise en œuvre sur 4 sites (6 parcelles) du réseau GONEM.
Mise en place en été, en général après la fin de cultures de cucurbitacées ou cultures de printemps, la solarisation entraîne une augmentation de la température du sol qui élimine une partie des pathogènes présents. Son efficacité est très dépendante des conditions de mise en œuvre, idéalement : pose assez précoce en juillet, après arrosage suffisant du sol, à une période très ensoleillée, et pendant au moins 6 semaines.
Les conditions de mise en œuvre sur les 4 sites sont présentées dans le tableau 13. On constate que le positionnement a été, sauf exception, plutôt tardif à partir de fin juillet, ce qui limite la période d'efficacité de la technique et rend son effet plus aléatoire. Les températures du sol ont été mesurées pendant la solarisation sur la plupart des sites où elle a été réalisée pour vérifier son efficacité, et donnent à priori des sommes de températures suffisamment élevées à 15 cm de profondeur.
On constate que les IGR mesurés sur les cultures suivantes sont toujours faibles quelles qu'elles soient, mais qu'ils peuvent rester non négligeables sur les sites où le niveau d'infestation est élevé (AU) et/ou la solarisation tardive (AU, GI).
On conclut donc de ces observations, corroborées par de précédents essais, que la solarisation peut permettre de diminuer les populations de nématodes à galles dans le sol sur les premiers centimètres (au moins jusqu'à 15 cm), de façon efficace si sa mise en œuvre est soignée, mais les nématodes ne sont pas éliminés et peuvent progressivement recoloniser le sol à partir d'horizons plus profonds.

Nous avons pu également mesurer que l'effet de la solarisation sur les autres nématodes, et notamment les nématodes libres, étaient limités car ils recolonisaient rapidement le sol, même sur les sites régulièrement solarisés (résultats non montrés).

**Tableau 15** : Mise en œuvre de la solarisation sur les expérimentations

| Sites | Date pose | Durée | IGR culture suivante |
|---|---|---|---|
| AU | 14/08/2018 | 54j | 1,2 – 2,3 (mâche) |
| HE | 24/07/2018 - 28/06/2020 | 62j – 116j | 0,5 -0,3 (ciboule bunching) – 0,3 - 0 (coriandre, mâche) |
| FR | 28/07/2018 | 60j | 0 (mâche) |
| GI | 31/07/2019 | 50j | 1,6 (laitue) |

## 3.5 Produits de protection des cultures

Sur 3 sites où l'occupation du sol en été ne permettait pas d'utiliser certains leviers majeurs (intercultures, solarisation), des applications de produits en cours de culture ont été testées. Les produits choisis visaient différentes actions : action contre les nématodes, stimulation des plantes ou modification du milieu. Tous les produits entraient dans la catégorie de biocontrôle, biostimulant ou fertilisant, utilisables en maraîchage.

*Action contre les nématodes*

- **Nemguard granulés**, société CERTIS. Ce produit avec une AMM phyto est à base d'extraits d'ail et agit sur les larves de nématodes par libération de composés biocides. Sous forme de granulés, il s'utilise à la dose de 25 kg/ha en une application juste avant plantation. Il a été testé sur 1 site en tomate (application sur rang) et laitue (application en plein). Aucun effet n'a été observé sur les IGR et sur les quantités de *Meloidogyne* dans le sol en fin de culture.
- **Bioact Prime,** société BAYER. Ce produit avec une AMM phyto agit par parasitisme des œufs de nématodes par le champignon *Paecilomyces lilacinus* (souche 251) qui entre dans sa composition. Sous forme liquide, il s'utilise à la dose de 0.75L/ha en 2 ou 3 applications proches de la plantation. Il a été testé sur 3 sites en tomate, concombre et melon. Aucun effet n'a été observé sur les IGR (fig. 23). Par contre, sur 2 sites (melon et tomate), le nombre de larves de *Meloidogyne* en fin de culture semble avoir été un peu réduit par rapport au témoin. Si l'application de Bioact Prime n'a permis aucun effet à court terme sur les dégâts de nématodes dans les cultures, il faudrait suivre s'il participe à freiner la multiplication des nématodes dans le sol à plus long terme.

*Action de stimulation des plantes ou de modification du milieu*

- **MycoUp**, société Symborg. Ce produit est composé de mycorhizes. L'hypothèse est de favoriser la colonisation des racines des cultures maraîchères par les mycorhizes de façon à ce qu'elles jouent un rôle de barrière pour les nématodes à galles tout en maintenant une activité racinaire performante. Ce produit a été utilisé à 3 kg/ha en 2 applications proches de la plantation de tomate sur 1 site. Le taux de colonisation des racines est resté très faible (environ 30%) et aucun effet n'a été observé sur les IGR et sur les quantités de *Meloidogyne* dans le sol en fin de culture.
- **Larvasoil**, société Biodevas. Ce produit à base d'extrait de plantes est proposé pour son action sur la nutrition et la stimulation de la croissance. Sous forme liquide, il est injecté au goutte à goutte régulièrement tout au long de la culture à la dose de 5 L/ha. Testé sur 1 site en tomate avec 6 applications, les observations ont mis en évidence aucun effet sur les IGR et les quantités de *Meloidogyne* dans le sol en fin de culture.
- **VIBF**, société Vivagro. Cette solution fertilisante (NFU 44-051) à base de tanins de châtaigner apporte une modification du milieu qui peut perturber les nématodes. Testé sur 1 site en culture

de melon, il a été appliqué 3 fois (15 L/ha) au goutte à goutte dès la plantation. Il n'y a pas eu d'effet sur les IGR mais une réduction significative des larves présentes dans le sol en fin de culture. Comme pour le produit bioact Prime, il faudra continuer les suivis pour évaluer si ce produit participe à freiner la multiplication des nématodes dans le sol à plus long terme.

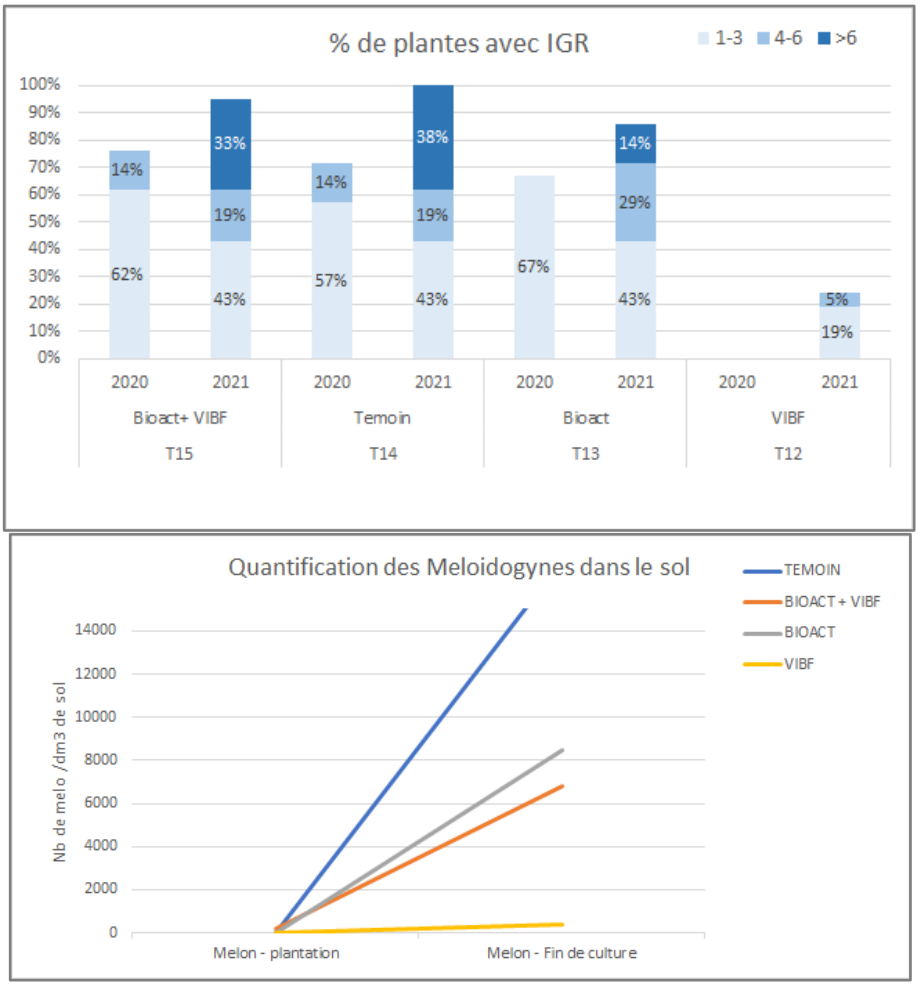



Figure 23 : Essais de BIOACT Prime et VIBS sur le site ME en 2021. Pourcentages de plantes de melon touchées en 2021 en comparaison de la campagne 2020. Comparaison des teneurs en larves de *Meloidogyne* sp. selon les différentes modalités

L'ensemble des solutions testées ne semblent pas permettre de réduire les dégâts causés par les nématodes à galles dans une culture. Cependant, il serait intéressant de tester sur le long terme certains produits qui ont montré une réduction des effectifs de Meloidogyne sp. dans le sol en fin de culture.

## 3.6 Apports massifs de matière organique

La matière organique est un élément clé dans l'équilibre biologique des sols. L'apport d'une grande quantité de compost animal ou végétal est un levier qui a été mis en avant en début de projet mais qui a rencontré des difficultés pour être utilisé sur les différents sites. En effet, ce levier nécessite d'avoir des ressources à proximité des exploitations et surtout un matériel d'épandage qui n'est aujourd'hui pas disponible dans le parc existant.

Néanmoins, 3 sites ont pu apporter de la matière organique en masse au printemps : 20 à 30 T/ha de compost de fumier sur le site AR et BI, 30 T/ha de compost de déchets verts sur le site GI. Il n'y a généralement pas eu de différenciation des apports entre le système GONEM et le système REFERENCE, sauf sur le site GI. Sur les 3 sites, on observe une réduction globale des IGR entre 2018 et 2021 mais sans pouvoir attribuer l'effet de la matière organique (Fig 24). Une quantité élevée de nématodes saprophages

a été mise en évidence sur les sites BI et GI qui ont mis en place les apports de compost sur les deux dernières années du projet (le site AR utilise cette pratique depuis plus longtemps, ce qui crée sans doute moins d'écart entre 2018 et 2021, fin du projet). Sur le site GI, la différence est marquée entre la modalité GONEM et la modalité REFERENCE qui n'a pas reçu les apports. Les apports de matière organique semblent donc avoir stimulé le développement des nématodes saprophages qui la consomment, mais le résultat sur les nématodes à galles n'a pas pu être démontré sur la durée du projet.

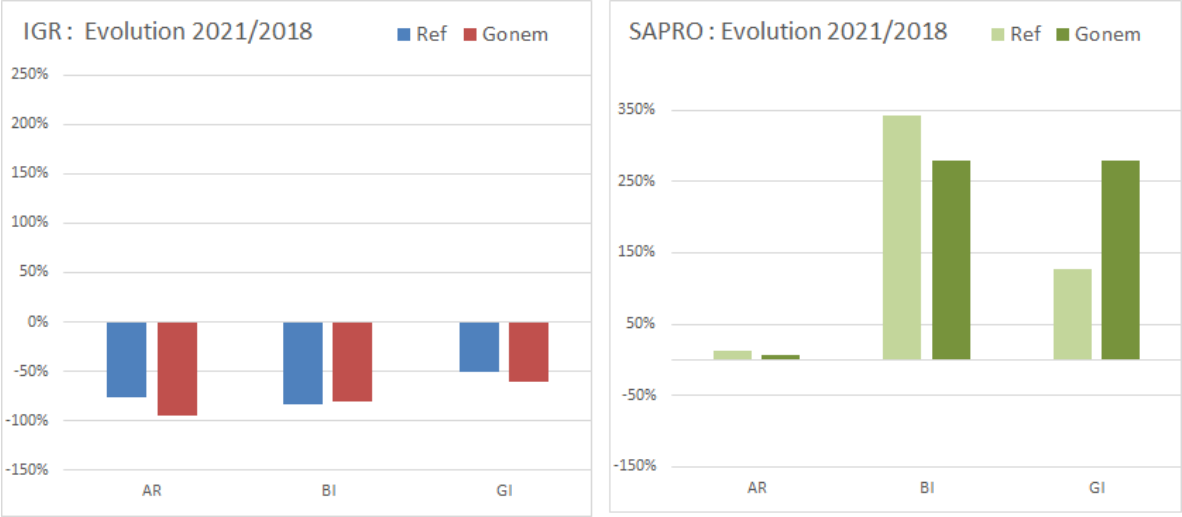



Figure 24 : Evolution différenciée sur 4 ans des IGR et des quantités de nématodes saprophages sur les sites ayant utilisé des apports importants de matière organique.

# 4. Essais en conditions contrôlées

Des essais complémentaires aux observations de terrain sur les fermes, en conditions contrôlées, étaient prévus au démarrage du projet pour répondre à des « trous de connaissance » sur le résultat d'une technique ciblée sur laquelle on disposerait de moins de références. C'est notamment le cas pour des plantes d'interculture, dont le niveau de sensibilité/résistance aux différentes espèces de *Meloidogyne spp*., le mode d'action ou l'effet assainissant sur le sol étaient mal connus au démarrage du projet.
De plus, les premières observations de terrain ont parfois révélé des cultures ou intercultures qui semblaient avoir un effet intéressant sur la réduction de l'inoculum, ou à l'inverse semblaient favoriser les nématodes (voir partie 3). Pour mieux cerner le potentiel de ces différentes plantes cultivées, ou d'interculture, des expérimentations complémentaires ont été programmées dans le projet GONEM :

- Récolter des racines de différentes cultures commerciales et d'intercultures pour observer la pénétration de nématodes, la présence de femelles et de pontes après traitement à la fuschine acide et coloration à l'éosine (protocoles INRAE). Ces observations permettent d'estimer un potentiel de reproduction des nématodes dans les racines de ces plantes et figurent en partie 3 du rapport.

- Mettre en place des essais en conditions contrôlées sur une sélection de plantes d'intérêt pour la production ou l'interculture. Ces essais en laboratoire avec inoculation maîtrisée en nombre de larves et espèces de nématodes apportent une réponse directe sur le niveau de sensibilité des plantes utilisées vis-à-vis des différentes espèces de nématodes rencontrées sur les sites expérimentaux. Les résultats de ces tests en conditions contrôlées, réalisés à l'Inrae de Sophia Antipolis, sont présentés ci-après.

## 4.1 Méthodologie

Les plantes pour les essais en conditions contrôlées ont été choisies par les partenaires en 2019 en privilégiant i) les plantes de cultures et/ou d'intercultures présentes sur les sites d'expérimentation Gonem dont la sensibilité à *M. incognita* et/ou *M.arenaria* étaient peu documentés et ii) des plantes qui pouvaient présenter un intérêt pour diminuer les populations de nématodes à galles dans la bibliographie (*Djian-Caporalino C., Bourdy G. et Cayrol J.C., 2008. Plantes nématicides et plantes résistantes aux nématodes. In : C. Regnault-Roger, B. Jr. Philogène, C. Vincent (Eds) Biopesticides d'origine végétale : potentialités phytosanitaires. Ed. Tec & doc, Lavoisier, Paris, 546 pages, pp. 125-185 (1ère edition en 2002*). Plusieurs espèces, et parfois variétés, de plantes cultivées, de porte-greffes tomate et aubergine et de couverts d'interculture pour les créneaux d'été ou d'automne ont fait l'objet des essais en conditions contrôlées (tableau 16). Des graines ont été utilisées pour les porte-greffes et les couverts d'interculture, ou des plantules pour les cultures de mâches, roquettes et cébettes.
Les essais ont été réalisés par l'INRAE en 2020 et 2021. **Deux espèces de *Meloidogyne* (*M. incognita* Morelos et *M. arenaria* Avignon)** ont été choisies et multipliées pour les tests. Ce sont les 2 principales espèces trouvées seules ou en mélange dans les exploitations maraîchères du Sud de la France. *(NB : une variabilité importante existe pour l'espèce M. arenaria, plusieurs populations pouvant donner des résultats de sensibilités différentes selon les plantes ; Djian-Caporalino C., L. Pijarowski, a. Januel, v. Lefebvre, a. Daubeze, a. Palloix, a. Dalmasso, p. Abad, 1999. Spectrum of resistance to root-knot nematodes and inheritance of heat-stable resistance in pepper (Capsicum annuum L.). Theorical and Applied Genetic 99, 3/4, 496-502).* Ces populations sont multipliées en routine en serre Inrae-ISA sur tomates Saint-Pierre (Fig. 25a) et contrôlées régulièrement par PCR (*Zijlstra C., Donkers-Venne T.H.M., Fargette M., 2000. Identification of Meloidogyne incognita, M. javanica and M. arenaria using sequence characterised amplified region (SCAR) based PCR assays. Nematology 2(8):847–853*). Après 2 cycles de multiplication (4 mois après inoculation de plants âgés de 2 mois), les racines chargées de galles et de pontes ont été nettoyées à l'eau (Fig. 25b) et broyées dans une solution de javel à 1% de chlore actif (Fig. 25c) pour libérer les œufs de la masse mucilagineuse les entourant (1 ponte contient environ 100 à 1000 œufs). Le broyat était passé sur une série de tamis (Fig. 23d) pour concentrer les œufs en éliminant les débris de racines. Ils ont ensuite été mis en suspension dans de l'eau fraiche et dénombrés sous loupe binoculaire (Fig. 25 e & f).

| Créneau | plantes de | Espèce | variété | semencier | Testé dans GONEM | Remarque | N° du Bio-essai |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Eté | cultures | p.g aubergine *Solanum torvum* | STT3* | Vilmorin | Aude<br>Francart (GONEM&REF) | *ref ctifl sur M.arenaria* | 1 |
| | | p.g tomate *Solanum lycopersicum* | KNVFFr Emperador<br>KNVFFr Protector<br>KNVFFr Kaiser | Monsanto<br>?<br>? | Arnaud (Aub. 2019, Tom.2020), Aude (Aub.2019), Bres (Tom 2018&2021)<br>Bioval (Tom. 2019), Bres (Tom. 2019)<br>non | *ref ctifl : Beaufort + sensible à M.arenaria que* | 1&2<br>1&2<br>1&2 |
| | | poivron *C. annuum* | Calibello<br>Lipari | ?<br>? | Bolusset<br>Bolusset | | 2<br>2 |
| | interculture | *Crotalaria juncea* | Crescent sun<br>Pas de nom de var, cultivar US | Semences de France (Renaudat)<br>Caussade | Bolusset 2018 , Mercier 2018&2019, Nencioni 2019<br>testé en mélange avec Sorgho chez Hévin 2019, Ginoux 2019 et Mercier 2020 | | 1&2<br>1&2 |
| | | *C. spectabilis* | Pas de nom de var, cultivar US | | Non | | 1&2 |
| | | sorgho Sudangrass *Sorghum sudanense*<br>sorgho hybride *S. bicolor x S. sudanense* | Piper<br>Jumbo star<br>Sudal | libre<br>Caussade<br>? | nombreuses fois<br>Hévin, Nencioni, et mélanges avec C. Ju<br>Ginoux 2018, Bioval 2018 | *ref manip INRA sorgho avec M.incognita* | 1&2<br>1&2<br>2 |
| | | millet Perlé *Pennisetum glaucum* | ADR 300<br>NutriC | ?<br>? | non | | 1&2<br>2 |
| | | sarrasin *Fagopyrum esculentum* | Pas de nom | ? | non | | 2 |
| | | œillet d'Inde *Tagetes patula* | Nana<br>Pas de nom | INRAE Avignon<br>Caussade | non<br>non | *ref manip INRA* | 2<br>2 |
| | | rose d'Inde *Tagetes erecta* | Crackert Jack | Caussade | non | *ref manip INRA* | 2 |
| Hiver | cultures | oignon botte *Allium fistulosum* | Rebouillon<br>Totem | libre<br>? | Arnaud 2018, Francart 2018&2020, Bioval 218&2020<br>Hévin 2018 | | 2<br>2 |
| | | mâche *Valerianella locusta* | Trophy<br>Gala | ?<br>? | Francart 2018&2020, Aude 2018&2020, Arnaud 2020, Hévin 2020, Bioval 2019<br>non | *ref manip INRA avec M.incognita* | 1&2<br>1&2 |
| | | fenouil *Foeniculum vulgare* | Solaris printemps<br>Rondo | ?<br>? | Ginoux 2019<br>non | | 1&2<br>1&2 |
| | interculture | radis fourrager *Raphanus sativus* | var. oleiformis Doublet | Semences de France | Arnaud (2018 en pur), En mélange Rastarocket chez Bioval 2018, Ginoux 2018, Mercier 2018, Nencioni | *radis + roquette = mélange "rastarocket"* | 1&2 |
| | | roquette sauvage *Diplotaxis tenuifolia* | Soria (culture)<br>Tiara (EV dans Rastarocket) | ?<br>Semences de France | Hévin 2019-2020<br>En mélange Rastarocket chez Bioval 2018, Ginoux 2018, Mercier 2018, Nencioni 2018&2019, Bolusset 2018 | *ref manip INRA avec M.incognita* | 1&2<br>1&2 |
| | | avoine rude *Avena strigosa* | Pratex<br>Max | Semences de France<br>Agrosemences | Bolusset 2018 & 2020, Bres 2019<br>non | | 1&2<br>2 |
| | | Phacelie *Phacelia tanacetifolia* | Pas de nom | ? | non | | 1&2 |
| Témoins | cultures | tomate sensible | Saint-Pierre | Vilmorin | | | 1&2 |
| | | tomate résistante | Piersol | Vilmorin | | | 1&2 |
| *NB : il n'a pas été possible de faire germer l'aubergine sauvage *Solanum torvum* STT3. | | | | | | | |

**Tableau 16** : Liste des espèces/variétés testées en conditions contrôlées à INRAE vis-à-vis des espèces de nématodes *M. arenaria* et *M. incognita*

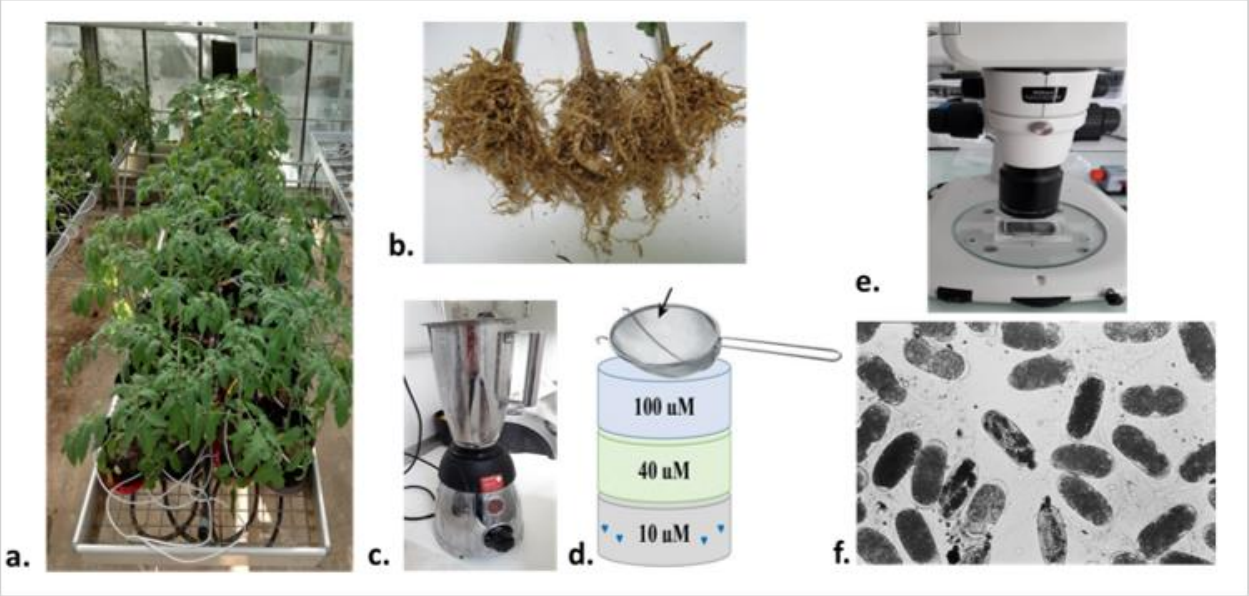



**Figure 25.a.** Multiplication de nématodes à galles sur tomate sous serre pendant 6 mois. **b**. Racines de tomate fortement infestées par *M. incognita*. **c**. Blender pour broyer les racines avec une solution de javel à 1% de chlore actif. **d**. Dispositif utilisé pour collecter et concentrer les œufs en éliminant les débris de racines. **e**. Dénombrement des œufs sous loupe binoculaire **f.** Œufs de *M. incognita* à différents stades dans une ponte.

Deux tests indépendants (Bio-essai n°1 en 2020 et Bio-essai n°2 en 2021) ont été réalisés en chambre climatique INRAE-ISA. Pour chaque test, 6 plantes de chaque espèce ou variété ont été testées.

Lors du Bio-essai n°1, **les plantes « d'été » ont été maintenues à 24°C dans une chambre de culture** (12h de lumière/jour et humidité relative de 60-70%) et **les plantes « d'hiver » ont été maintenues en chambre climatique à 16°C** (11h de lumière/jour et humidité relative de 60-70%) durant toute l'expérimentation, sauf avoine et radis fourrager qui germaient et poussaient bien à 24°C (Fig. 26). Seul un arrosage régulier à l'eau a été réalisé. Le semis des graines a été réalisé entre le 02 et 09/07/2020 sur coton puis les plantules repiquées en pots de 7x7x7 contenant 300 g de sol sablo-argileux (52,7% sable; 14,3% argile; 22,2% limon; 2,7% matière organique; pH8,1) préalablement stérilisé à l'autoclave et laissé 2 mois à l'air libre. Après 1 mois, les plantules ont été inoculées avec 2 mL d'une suspension aqueuse contenant 2000 œufs, dans 4 trous autour de la plantule. Six semaines après l'inoculation pour les plants maintenus à 24°C et 10 semaines après inoculation pour les plants maintenus à 16°C (durée nécessaire à l'achèvement du cycle de vie du nématode), les racines des plantes ont été récoltées, soigneusement lavées individuellement avec de l'eau du robinet et congelées jusqu'à analyse. Les pots avec le sol étaient pesés et le sol extrait pour les analyses des larves de *Meloidogyne* et des espèces libres saprophages restant dans les pots.

Pour améliorer ce protocole, lors du Bio-essai n°2, les plantes « d'hiver » **ont été maintenues en chambre climatique à 16°C jusqu'à l'inoculation mais elles ont ensuite été transférées dans la chambre de culture maintenues à 24°C** pour que la durée du cycle soit la même pour toutes les plantes. Le même protocole a ensuite été suivi. Les semis ont été réalisés entre le 02 et 09/09/2021, les inoculations ont été retardées d'un mois (le 28/10/2021) suite à des problèmes de germination de certaines graines. Les analyses ont été réalisées 5 semaines après inoculation (entre le 06 et 09/12/2021).

**Figure 26** : Expériences 2020 et 2021 en chambre climatique. 21 variétés (6 plantes/variété/ test x 2 répétitions) et une variété témoin tomate sensible (6 plantes/test x 2 répétitions) ont été inoculées avec une suspension aqueuse de 2000 œufs de *M. incognita* ou *M. arenaria*. Après 6 semaines à 24°C, les plantes sont analysées et le sol est récupéré pour les analyses nématologiques.

Pour les analyses nématologiques, différents paramètres ont été analysés :

- le nombre de pontes sur racine a été déterminé après coloration à l'éosine à 0.45% (Fig. 27);
- un indice de galles racinaires sur une échelle de 0 à 3 (0= pas de galle, 1= moins de 20 galles, 2= entre 20 et 50 galles, 3=plus de 50 galles) a été enregistré lors du Bio-essai n°1 ; pour plus de précisions dans

les analyses, en plus du comptage de pontes, le nombre de galles sur racines (comptées sous loupe binoculaire) a été enregistré à la place des indices de galle lors du Bio-essai n°2;

- le nombre de nématodes dans le sol en fin de culture : larves de stade J2 de *Meloidogyne* (seul stade présent dans le sol), et larves et adultes sans caractérisation taxonomique pour les nématodes saprophages (espèces non parasites amenées par l'eau du puit d'arrosage). Les nématodes étaient extraits du sol par élutriation (NEM/PS_MO_ELUTRI adaptée de ISO_23611-4) (Fig. 28) puis identifiés et énumérés (nombre de nématodes/pot) sous microscope. Cette analyse a pu être réalisée pour les 192 échantillons du bio-essai n°1 et pour 108 échantillons (*M. incognita*) du bio-essai n°2.

Les analyses statistiques ont été réalisées pour chaque bio-essai indépendamment : tests de Kruskal-Wallis, $p<0.05$ pour les tests globaux sur k échantillons, tests de Wilcoxon post-hoc avec correction de tests multiples, $p<0.05$ ou $p<0,1$ pour les tests 2 à 2 afin de vérifier les différences entre plantes.

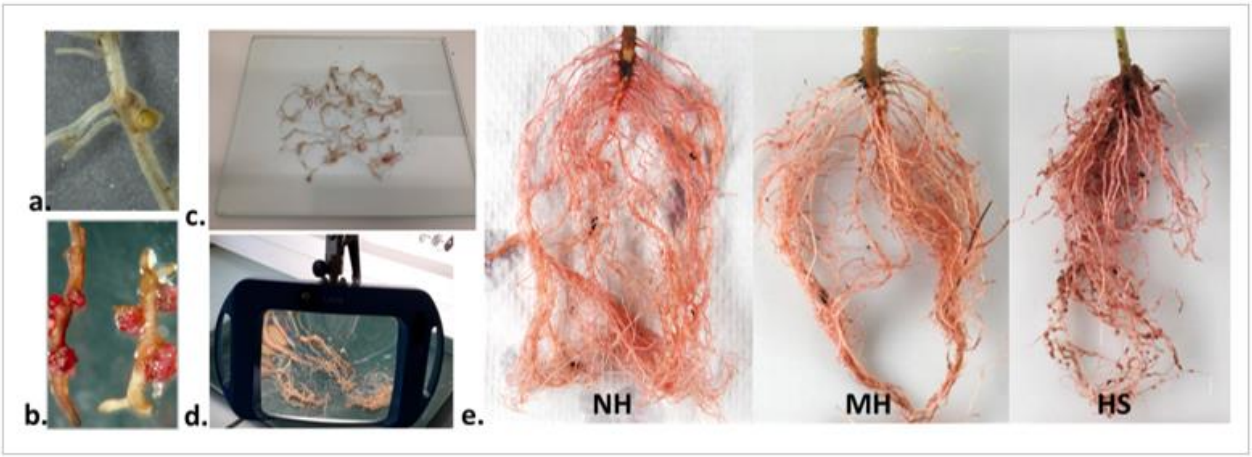



**Figure 27 a.** Ponte sur racine de sorgho 6 semaines après l'inoculation. **b**. Coloration des masses d'œufs sur racine de tomate avec une solution aqueuse d'éosine à 0,45 %. **c**. Individualisation et étalement des racines sur plaque de verre pour comptage. **d**. Loupe pour visualiser les galles et masses d'oeufs. **e**. Plante non hôte (NH) (pas de galle, pas de ponte), mauvais hôte (MH) (peu de galles, peu de pontes), hôte sensible (HS) (nombreuses galles et pontes).

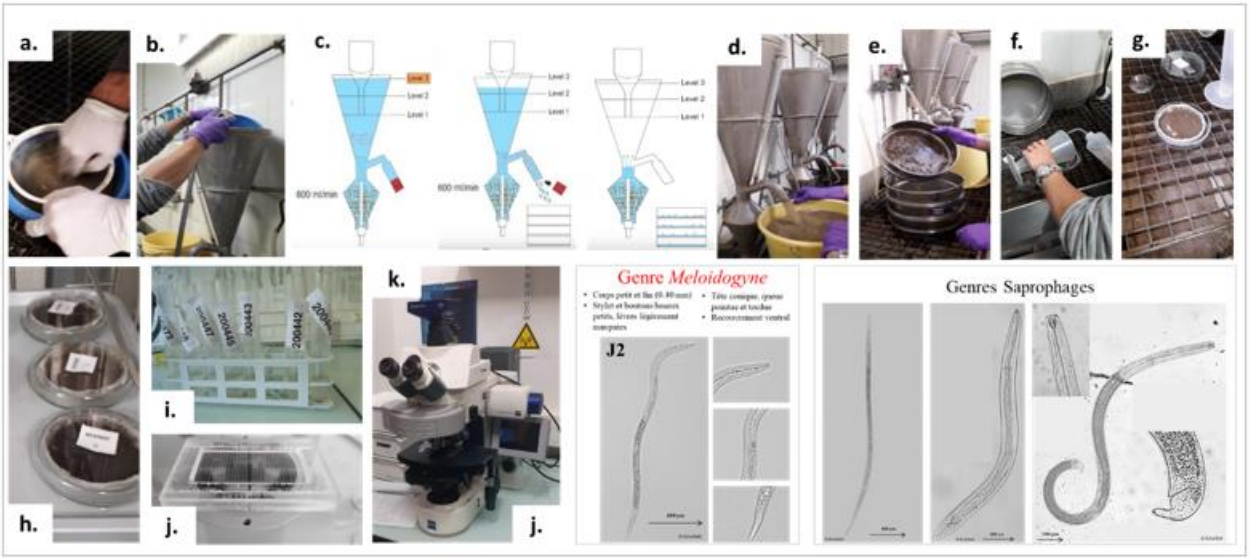



**Figure 28.** Principe de l'élutriation d'Oostenbrink pour extraire les nématodes du sol. **a.** Extraire la totalité du sol du pot dans 300 mL d'eau maximum. **b.** Vider l'ensemble dans l'élutriateur. **c.** Régler le flux d'eau sur 600 mL/min: les particules de sol lourdes décantent dans l'ampoule, les nématodes restent en suspension. **d.** Lorsque l'entonnoir est plein, vider le contenu dans un seau de 7 L. **e.** Verser le contenu du seau sur une série de 4 tamis de maille 50 µm et récupérer dans un verre à pied les nématodes sur les 4 tamis avec un jet fin d'eau. **f & g**. Récupérer les nématodes concentrés sur un petit tamis de maille 1 mm recouvert d'un Kleenex et le déposer dans une boite de Petri en verre. **h**. Attendre 2-3 jours que les nématodes passent à travers les mailles du tamis et du kleenex. **i.** Eliminer le tamis et transférer la solution dans un tube de 50 mL. Attendre 1h30 min de décantation des nématodes au fond du tube avant

d'enlever le surnageant en ajustant à 25 mL. **j.** Homogénéiser la suspension de nématodes avant d'en prélever 5 mL pour déposer sur une lame à compter de 5 mL. **k.** Observer au microscope pour compter les larves J2 de *Meloidogyne* et les nématodes saprophages. Renouveler le comptage sur 5 mL supplémentaires pour vérifier les résultats.

## 4.2 Résultats sur les plantes de diversification et plantes d'interculture

### *Résultats du bio-essai n°1*

Les résultats du bio-essai n°1 réalisé en 2020 sont synthétisés dans la Fig. 29. Toutes les plantes de service testées sont des **mauvais-hôtes** de *M. incognita* Morelos et *M. arenaria* Avignon, avec moins de 10 pontes et un indice de galle de 0 à 1, mais avec un effet variétal significatif (cf fenouils, roquettes, mâches, sorghos) (Fig. 29a).

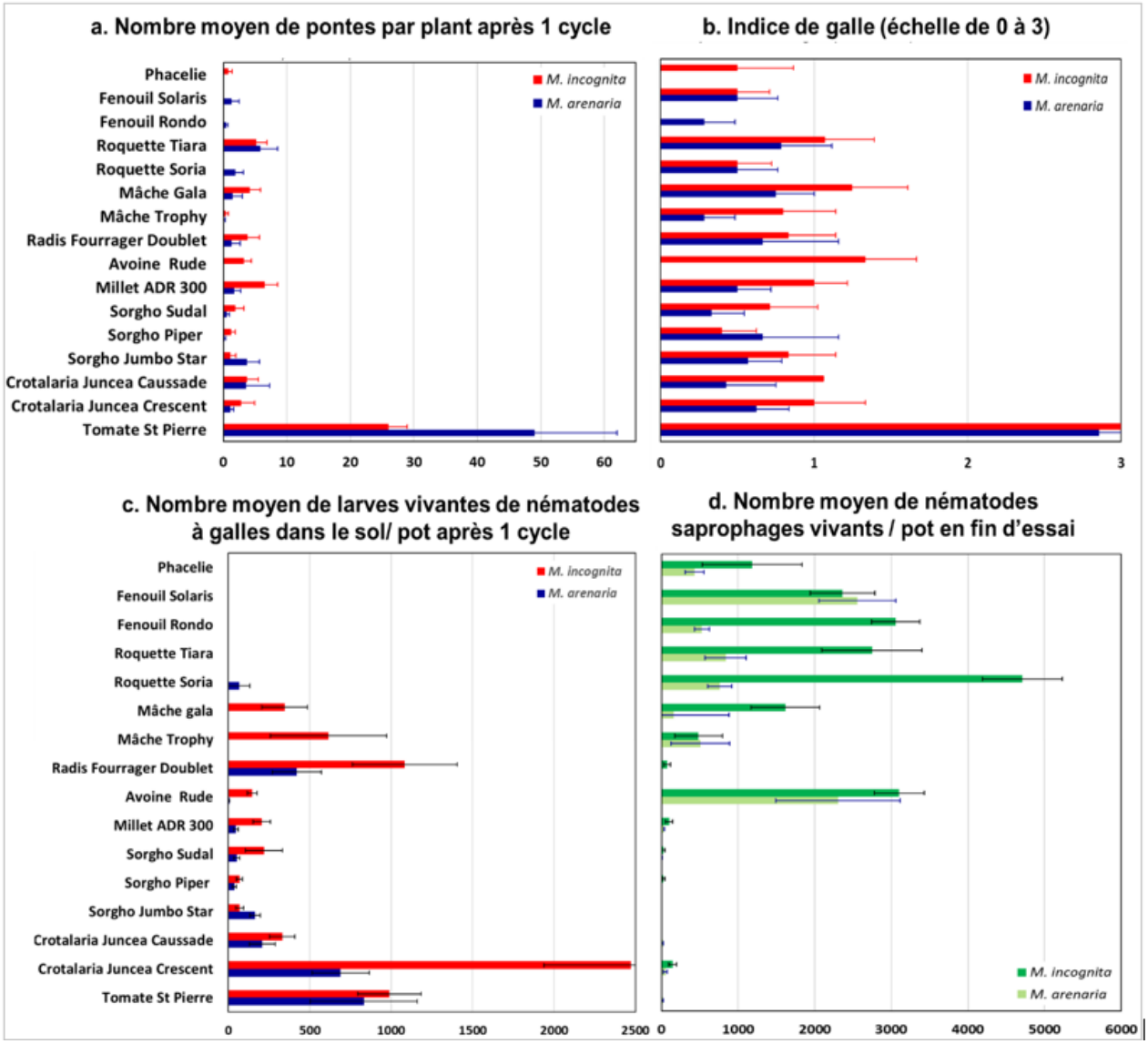



**Figure 29.** Résultats du Bio-essai n°1 pour déterminer l'efficacité de plantes candidates vis-à-vis des nématodes à galles (inoculation avec 2000 œufs de *Meloidogyne* / 300 g sol en pots x 6 répétitions): **a.** Qualités d'hôtes (non hôtes, mauvais-hôtes) des PdS; **b.** Symptôme sur racines indiquant une pénétration des larves; **c.** Piégeage des larves de *Meloidogyne*; **d.** Impact sur les nématodes utiles saprophages.

Aucune plante de l'essai n'est non-hôte des 2 espèces de nématodes conjointement. En effet, des réponses différentes aux attaques des 2 espèces de *Meloidogyne* sont observées (Fig. 29a) :

- les plantes sont globalement plus mauvais-hôtes de *M. arenaria* Avignon que *M. incognita* Morelos, sauf les fenouils, la roquette Soria, et le sorgho Jumbo Star, et bien que *M. arenaria* Avignon se

multiplie plus que *M. incognita* Morelos sur la tomate St Pierre. Seules la **phacélie** et l'**avoine rude Pratex** sont **non-hôtes de *M. arenaria* Avignon** (ne permettant pas sa reproduction). Aucune galle n'est observée sur les racines de ces plantes après inoculation avec cette espèce de nématode (Fig. 29b), suggérant que les nématodes ne pénètrent pas dans les racines ou qu'ils n'atteignent pas le cylindre central de la racine pour initier leurs sites nourriciers. Pour toutes les autres plantes, des larves de *M. arenaria* Morelos pénètrent et certains initient des cellules géantes puisque quelques galles sont observées.

- Les plantes les moins multiplicatrices de ***M. incognita* Morelos** seraient les **fenouils** (non-hôtes), la **roquette Soria** (non-hôte), la mâche Trophy, et les sorghos (Fig. 29a). Néanmoins, **seul le fenouil Rondo n'a pas de galle racinaire** (Fig. 29b), suggérant que les larves de *M. incognita* Morelos pénètrent dans les racines des autres plantes testées mais n'arrivent pas à se développer en femelle gravide : elles pourraient agir comme plantes-pièges.

En fin de culture (6 semaines après l'inoculation pour les plants maintenus à 24°C et 10 semaines après inoculation pour les plants maintenus à 16°C), des larves de 2$^{nd}$ stade de *Meloidogyne* sont retrouvées dans le sol sauf après les plantes non-hôtes (Fig. 29c). Les phacélies, fenouils et roquettes semblent les plus « assainissantes » pour les 2 espèces de nématodes. De très nombreuses larves de *M. incognita* Morelos sont retrouvées dans le sol après culture de mâches, radis fourrager et crotalaires. Ces observations sont à considérées avec **prudence** car il est possible également que la durée du cycle des nématodes soit plus lente dans certaines plantes mauvais-hôtes, en particulier pour les plantes d'hiver, et que des œufs non-mâtures au moment des extractions de sol auraient pu éclore 1 semaine plus tard dans des conditions plus chaudes.
Des espèces de **nématodes saprophages** se sont multipliées dans les pots ayant contenus des **phacélie, fenouils, roquettes, mâches** (plantes maintenues 10 semaines à 16°C) et dans les pots ayant contenus de l'**avoine rude** (maintenue 6 semaines à 24°C) (Fig. 29d). Les cultures de radis fourrager, millet, sorghos, crotalaires et tomate n'ont pas permis cette multiplication, quelle que soit l'espèce de *Meloidogyne* inoculée.

### *Résultats du bio-essai n°2*

Les résultats du bio-essai n°2 réalisé en 2021 sont synthétisés dans la Fig. 30. Il est important de rappeler que dans ce bio-essai, 1/ les plantes d'hiver ont été placées à 24°C avec les plantes d'été, après inoculation, pour mieux comparer les résultats sur une même durée de cycle des nématodes à galles, et 2/ la culture a été interrompue à 5 semaines au lieu de 6 comme c'était le cas pour le bio-essai n°1.

Comme dans le Bio-essai n°1, toutes les plantes testées sont des **mauvais-hôtes de *M. incognita* Morelos et *M. arenaria* Avignon** avec moins de 10 pontes, sauf les oignons botte en particulier Allium Totem et l'avoine rude Pratex, et avec un effet variétal significatif (cf fenouils, roquettes, sorghos, crotalaires, oignons botte) (Fig. 30a).
Avec une durée de culture plus courte (5 semaines au lieu de 6, mais à 24°C pour les plantes « d'hiver »), les plantes les moins multiplicatrices de ***M. incognita* Morelos** seraient : toutes les espèces et variétés de **tagètes,** le **sarrasin** (non-hôtes : aucune galle, aucune ponte), la **phacélie et** la **roquette Tiara** (quelques pénétrations mais pas de multiplication), le **fenouil Rondo** (pas de galle, mais 2 pontes décelées lorsque le cycle est réalisé à 24°C). Pour **les sorghos**, si pas ou très peu de galles sont observées, quelques rares pontes sont retrouvées à l'intérieur des racines comme déjà observé (*Djian-Caporalino C., Mateille T., Bailly Bechet M., Marteu N., Fazari A., Bautheac P., Raptopoulo A., Van Duong L., Tavoillot J., Martiny B., Goillon C., Castagnone-Sereno P., 2019. Evaluating sorghums as green manure against root-knot nematodes. Crop Protection 122: 142-150 doi:10.1016/j.cropro.2019.05.002*). Dans ce Bio-essai, aucune galle et aucune ponte n'a été observée pour le millet ADR 300 et *Crotalaria juncea*.

**Figure 30.** Résultats du Bio-essai n°2 pour confirmer l'efficacité de plantes candidates vis-à-vis des nématodes à galles (inoculation avec 2000 œufs de *Meloidogyne* / 300 g sol en pots x 6 répétitions): **a.** Qualités d'hôtes (non hôtes, mauvais-hôtes) des PdS (152 pontes et 215 galles de *M. arenaria* ont été obtenues en moyenne sur tomate sensible Saint-Pierre) ; **b.** Symptôme sur racines indiquant une pénétration des larves; **c.** Piégeage des larves de *Meloidogyne incognita* (pas d'analyse pour *M. arenaria)*; **d.** Impact sur les nématodes utiles saprophages. * = pas d'analyse car les plants étaient morts.

Bien que *M. arenaria* Avignon se multiplie 10 fois plus que *M. incognita* Morelos sur la tomate St Pierre, les plantes testées restent relativement très mauvais-hôtes de cette espèce (en particulier toutes les espèces et variétés de tagètes, la phacélie, les mâches, les sorghos Sudal et Piper (aucune galle, aucune ponte), le millet ADR 300. Les « oignons botte », le sarrasin, les fenouils, la roquette Soria, le millet Nutri C, et

*Crotalaria juncea* (Caussade ou Crescent) sont plus multiplicateurs de *M. arenaria*. Toutes les tagètes se sont révélées totalement non-hôtes des 2 espèces de Meloidogyne. Ce sont également les seules plantes n'ayant aucune galle sur racine avec les 2 espèces de Meloidogyne (Fig. 30b). La Phacélie semble également non-hôte des 2 espèces mais le cycle des nématodes à été interrompu à 5 semaines, et quelques rares pontes avaient été obtenues après 10 semaines à 16°C dans le bio-essai n°1 avec M. *incognita*.
Après 1 cycle de développement, des larves de 2nd stade de *M. incognita* sont retrouvées dans le sol sauf après les plantes non-hôtes (Fig. 28b) (pour la roquette Tiara, sur les 6 pots, 5 pots n'avaient aucune larve de Meloidogyne, un seul pot pour lequel la plante était morte avait encore des Meloidogyne dans le sol). Les tagètes, sarrasin, phacélie, et fenouils semblent les plus « assainissantes » pour *M. incognita* Morelos. De très nombreuses larves de *M. incognita* sont retrouvées dans le sol après culture de millet, sorghos, crotalaires et Allium.
Des espèces de nématodes saprophages se sont multipliées dans tous les pots, principalement ceux ayant contenus des fenouil Rondo, roquette Tiara, crotalaires et oignon bottes (Fig. 30d). Le sol nu, sans aucune plante pendant 5 semaines, n'a pas permis cette multiplication. Les différences obtenues avec le Bio-essai n°1 peuvent s'expliquer par la différence de composition et d'abondance des espèces saprophages dans l'eau du puit entre juillet-août 2020 et septembre-décembre 2021.

## 4.3 Résultats sur les porte-greffes

Les résultats sur les porte-greffes sont indiqués sur les figures 31 et 32.
Dans le Bio-essai n°1, les plantes ont été analysées après 6 semaines à 24°C. Si une **bonne efficacité des 4 porte-greffes tomate Emperador, Protector, Kaiser et Piersol est notée sur *M. incognita*** (moins de 1 ponte en moyenne et aucune ponte pour Piersol) (Fig. 31a), même si quelques galles sont observées (Fig. 31b), **ce n'est pas le cas sur *M. arenaria*, tous les porte-greffes multipliant l'espèce** puisque des pontes sont observées, Piersol étant le moins multiplicateur. Des larves de stade J2 des 2 espèces de *Meloidogyne* sont retrouvées dans le sol après 6 semaines de culture (Fig. 31c), le plus faible nombre étant obtenu avec le témoin Piersol mais cette variété résistante réduit également le nombre d'espèces libres saprophages (Fig. 31d). Un très grand nombre de J2 de *M. incognita* ont été retrouvées dans le sol après culture du PG Kaiser alors que le nombre de pontes sur racines était très faible. Il est possible que ces quelques pontes aient éclos plus tôt (cycle accéléré) par rapport aux autres tomates, y compris les variétés sensibles.
Cette hypothèse semble confirmée dans le Bio-essai n°2, avec des plantes analysées après 5 semaines : aucune J2 n'a été retrouvée dans le sol pour les différents porte-greffes résistants testés, ni pour la variété de tomate sensible (Fig. 32c), confirmant que le cycle n'était pas complet (pontes non-mâtures). La **bonne efficacité des 2 porte-greffes tomate testés durant le Bio-essai n°2, Emperador et Kaiser, est confirmée sur *M. incognita*** (Fig. 32a&b). Pour *M. arenaria*, les plants de Kaiser étaient morts, seuls ceux d'Emperador ont pu être analysés, et quelques pontes ont été observées bien que le cycle ait été interrompu à 5 semaines, confirmant les résultats de 2020. Les espèces libres saprophages se sont multipliées avec les 2 porte-greffes en 2021 (Fig. 32d).
Les **2 poivrons testés (Lipari et Calibello)** se sont révélés **très sensibles à *M. incognita*** (Fig. 32a&b), avec un cycle accéléré par rapport à la tomate sensible St Pierre, puisque de très nombreuses J2 ont également été retrouvées dans le sol après seulement 5 semaines de culture (Fig. 32c). Par contre, ils se sont révélés **résistants à *M. arenaria***, d'où l'importance de l'identification des espèces avant d'utiliser des variétés ou porte-greffes dit résistants aux nématodes à galles. Des espèces libres saprophages ont été retrouvées dans le sol après culture des 2 variétés (Fig. 32d).

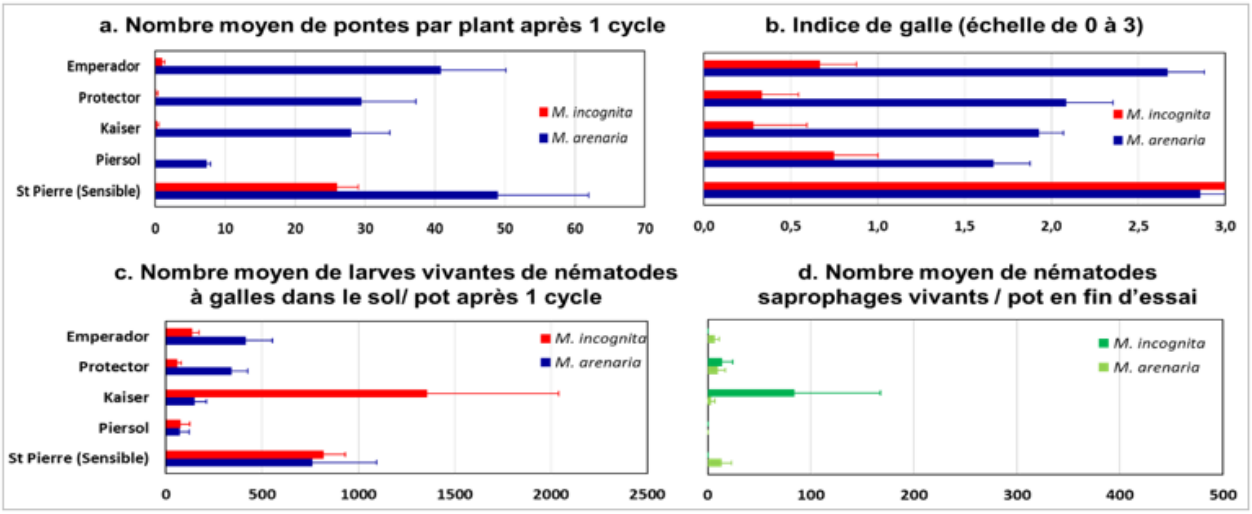



**Figure 31.** Résultats du Bio-essai n°1 pour déterminer l'efficacité des porte-greffes vis-à-vis des nématodes à galles (inoculation avec 2000 œufs de *Meloidogyne* / 300 g sol en pots x 6 répétitions). **a.** Qualités d'hôtes (non hôtes, mauvais-hôtes) des porte-greffes; **b.** Symptôme sur racines indiquant une pénétration des larves; **c.** Piégeage des larves de *Meloidogyne*; **d.** Impact sur les nématodes utiles saprophages.

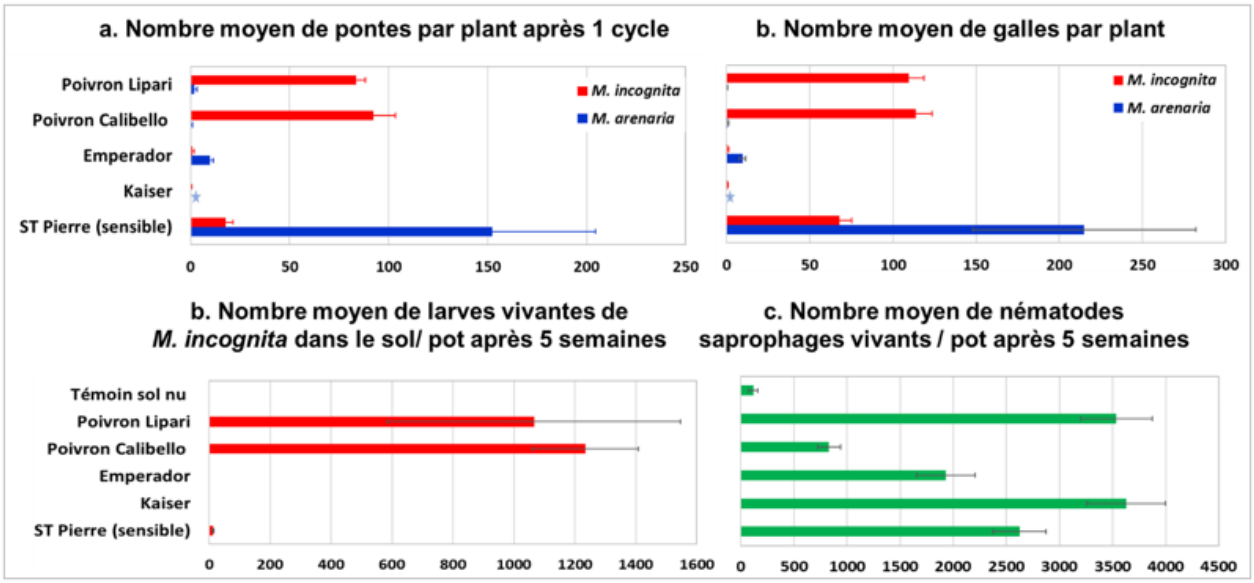



**Figure 32.** Résultats du Bio-essai n°2 pour déterminer l'efficacité des porte-greffes vis-à-vis des nématodes à galles (inoculation avec 2000 œufs de *Meloidogyne* / 300 g sol en pots x 6 répétitions): **a.** Qualités d'hôtes (non hôtes, mauvais-hôtes) des porte-greffes; **b.** Symptôme sur racines indiquant une pénétration des larves; **c.** Piégeage des larves de *Meloidogyne*; **d.** Impact sur les nématodes utiles saprophages. * = pas d'analyse car les plants étaient morts.

## Conclusions sur les essais en conditions contrôlées

- Les différentes variétés de *Tagetes erecta* et *T. patula* testées semblent être les seules plantes complètement non-hôtes (aucune reproduction) de *M. incognita* et *M. arenaria* (exsudat racinaire toxique et/ou répulsif et/ou racine toxique; *Karakas M. & Bolukbasi E., 2019. A Review: Using Marigolds (Tagetes spp.) as an Alternative to Chemical Nematicides for Nematode Management. IJAEMS 5 (9): 556-560. doi:10.22161/ijaems.59.3, & Lahoreau M., 2022. Contribution to the study of the mode of action of nematicidal plants. M2 BOOST Internship report funding by PPR Project "CAP Zero Phyto" 2021-2027: 40 pp*), assainissent le sol et sont sans effet trop négatif pour les espèces saprophages.
- La phacélie même maintenue à 24°C, est complètement non-hôte de *M. arenaria*, ne permettant pas la pénétration ou l'établissement des larves dans les racines (probablement exsudat racinaire

toxique ou répulsif ou racine toxique). Elle ne permet qu'à quelques larves de *M. incognita* de s'installer mais pas à se reproduire (plante-piège de coupure) sur un cycle court à 24°C.

- Ces 2 plantes assainissent le sol et n'ont pas d'impact négatif sur les espèces saprophages utiles.
- Le fenouil Rondo est la seule variété cultivée confirmée non-hôte de *M. incognita* Morelos et ne permettant pas ou très peu la pénétration ou l'établissement des larves dans les racines (exsudat racinaire toxique ovicide ou répulsif et/ou racine toxique pour les larves; *Lahoreau M., 2022. Contribution to the study of the mode of action of nematicidal plants. M2 BOOST Internship report funding by PPR Project "CAP Zero Phyto" 2021-2027: 40 pp*). Cette variété est également très mauvais-hôte de *M. arenaria* Avignon mais permet quelques pénétrations de larves et le développement de quelques rares pontes pouvant maintenir la population.
- La variété de fenouil Solaris s'est par-contre révélée plus multiplicatrice des 2 espèces de *Meloidogyne* même si elle reste mauvais-hôte.
- Les autres plantes testées semblent plutôt être des plantes-pièges mauvais-hôtes (mais pas non-hôtes) dans lesquelles les nématodes pénètrent, initient des galles mais se reproduisent très peu. Un effet variétal important a été observé pour toutes les plantes et variétés cultivées testées.

## 5. Valorisation et diffusion

Plusieurs communications écrites et orales, ainsi que des visites d'essais ont été réalisées autour du projet GONEM :

- Présentation orale des projets soutenus par PICLég , dont GONEM, visant à combiner des méthodes pour gérer les nématodes à galles en maraîchage sous abris lors du Salon MedAgri 'Rendez-Vous Cultures méditerranéennes - Tech & Bio 2018', Avignon 16 – 18/10/2018 [INRAE, APREL, GRAB]
- Publication écrite dans le bulletin Maraîchage Bio Infos publié par le GRAB en décembre 2018 [GRAB]
- Publication écrite sur le site internet PICLég en novembre 2018
- Article de presse « : Contrôler les nématodes à galles », 2019. Fruits et Légumes n°400, fruits et légumes n°400, déc. 2019, page 82 [GRAB]
- Communications orales auprès des techniciens et chercheurs lors de la commission phyto de la chambre d'agriculture des Bouches du Rhône le 7 février 2019 [APREL et GRAB]
- Communication orale lors des journées du GIS PICLég le 22 novembre 2019 à Lyon [INRAE].
- Communications orales auprès des techniciens et chercheurs lors du « café technique » organisé par l'APREL sur les bioagressseurs telluriques à Chateaurenard le 5 mars 2020 [APREL et GRAB]
- Article « Dephy Ferme ». Témoignage d'un maraîcher du réseau GONEM. Treiz Maraîchage n° 49 - Mai 2020 - Chambre d'agriculture des Bouches-du-Rhône
- Communication orale « Crop rotations and role in nematode management : the INRAE SMaCH "GEDUNEM" and EIP "GONEM" projects » pour le Workshop Régional du projet Européen Best4Soil, Webinaire 01 & 02/12/2020 (https://www.best4soil.eu/videos)[INRAE].
- Communications orales en visio-conférence auprès des techniciens et chercheurs lors du « café technique » organisé par l'APREL sur les bioagressseurs telluriques le 4 février 2021 [APREL, INRAE et GRAB]
- Visites d'essais : Journées portes-ouvertes sur 2 sites du réseau le 24 juin 2021 après-midi
- Diffusion de fiches synthétiques sur le projet GONEM en 2021 : 1 fiche « projet » et 10 fiches « sites » présentant les résultats et l'évaluation sur chaque site : https://www.grab.fr/gestion-des-nematodes-a-galles-en-maraichage-biologique/
- Colloque de restitution du projet GONEM le 1er mars 2022 à Avignon. 40 participants. Lien vers les présentations : https://www.grab.fr/gestion-des-nematodes-a-galles-en-maraichage-bio-compte-rendu-du-colloque/
- 1 communication orale et 2 Posters présentés lors du 7eme Congrès International de Nématologie 3-8 Mai 2022 Antibes-Juan-les-Pins (France), Sessions 'Soil suppressiveness and nematode control using cover crops', 'Natural products' et 'Integrated nematode management' [INRAE]
- Enseignement pour les Masters 'BOOST : Solutions de Biocontrôle pour la Santé des Plantes' de l'UCA (Nice) et Masters 'Résistance des plantes aux bioagresseurs' d'AgroCampus Ouest (Rennes) en 2019, 2020, 2021 et 2022: présentation des systèmes de culture et résultats GONEM.

# Conclusion – Perspectives

Le projet GONEM a permis de créer un réseau de 10 producteurs qui ont tous mis en place des essais sur leur exploitation. La dimension participative est un atout indéniable du projet avec une bonne implication des partenaires dans les réflexions menées et les suivis sur le terrain, et des échanges constructifs entre producteurs, conseillers, expérimentateurs et chercheurs. Les agriculteurs, même s'ils n'ont pas tous eu de résultats très probants sur leur exploitation, se sont déclarés satisfaits d'avoir participé au projet (voir évaluation dans les fiches sites en annexes) et ont particulièrement apprécié de faire de l'expérimentation sur leur exploitation (voir résultats d'enquête finale en figure 33).

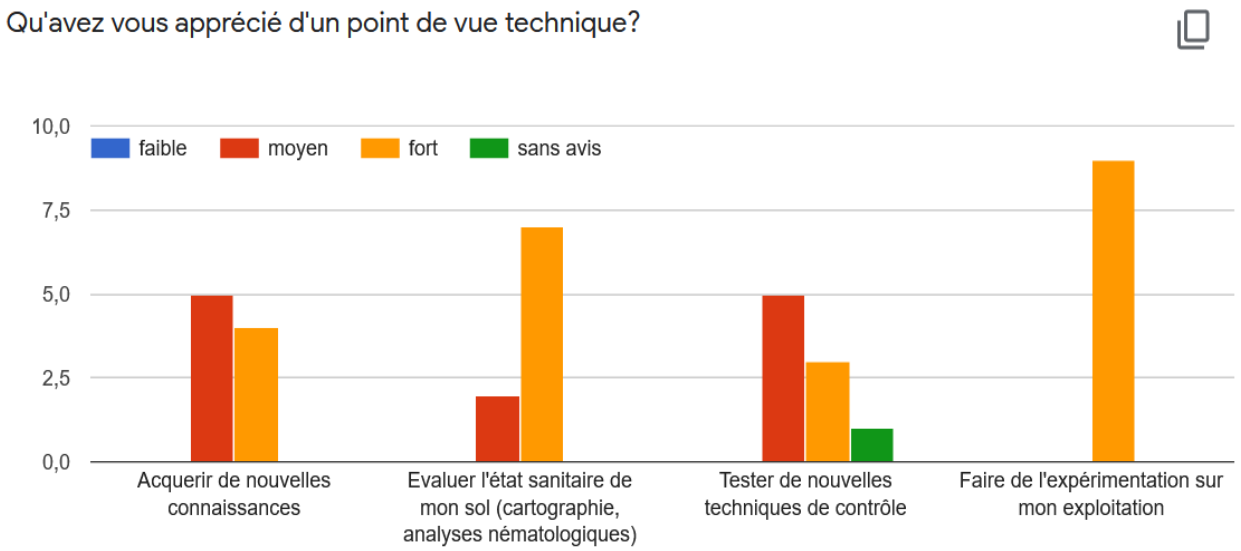



**Figure 33.** Satisfaction technique des producteurs à la fin du projet : synthèse des 9 réponses obtenues dans l'enquête réalisée en 2022

Les résultats obtenus sur les essais terrain et en conditions contrôlées ont permis de mieux cerner le potentiel et les limites de certains leviers de lutte contre les nématodes, comme la résistance de différents porte-greffes, les cultures moins sensibles dans les rotations ou les couverts assainissants d'interculture. Ils confirment l'intérêt potentiel de certaines plantes d'interculture (le sorgho fourrager, assez peu sensible, en plante piège ou les crotalaires, résistantes, et potentiellement les tagètes et phacélie intéressantes en conditions contrôlées) ou de cultures commerciales de coupure (fraise de 9 mois sur les 2 espèces *M. arenaria* et *M. incognita* (mais pas *M. hapla)*, roquette sur *M. incognita* ). Les résultats en conditions contrôlées montrent les différences variétales qui peuvent être importantes pour chaque espèce testée, et la sensibilité parfois très différente des plantes aux 2 espèces de *Meloidogyne, M. incognita* et *M. arenaria* souvent présentes ensemble dans les parcelles de la région. Les variétés de portes-greffes tomate testées ont par exemple une sensibilité très variable, et s'avèrent non résistantes à la souche testée de *M. arenaria.* Les essais en conditions contrôlées sont donc essentiels pour mieux connaître les effets des plantes introduites dans les systèmes, et des préconisations d'usage de certaines plantes, résumées dans la figure 34, peuvent donc être formulées à l'issue de ce projet.

Les conclusions sur l'effet des leviers sont néanmoins partielles dans les essais de type « système » tels qu'ils ont été menés dans GONEM car les successions de cultures diffèrent entre les 2 systèmes suivis dans une grande partie des situations, ce qui rend difficile l'évaluation de l'efficacité d'un levier. C'est donc bien l'effet du système global avec insertion de différents leviers qui a été évaluée dans le projet, avec des cultures révélatrices finales identiques sur les 2 systèmes de chaque site, et identiques aux cultures initiales pour juger de l'évolution globale sur 4 ans. Les résultats montrent que les niveaux de contamination ont baissé sur la majorité des sites, et ont en général plus baissé sur les systèmes « Gonem » que sur les

systèmes référence. Les évolutions positives semblent liées au niveau de diversification du système et à la combinaison d'au moins trois leviers de maîtrise des nématodes.

1. Plantes les moins multiplicatrices

| PdS moins multiplicatrices | *M. incognita* | *M. arenaria* |
|---|---|---|
| | Phacélie, Fenouils Rondo & Solaris, Roquette Soria, Mâche Trophy, Sorghos Sudal & Piper, *Crotalaria spectabilis* | |
| | Sorgho Jumbo Star | Mâche Gala, Avoine Rude, Millet, *Crotalaria juncea* Crescent |

2. Plantes avec effets assainissants

| PdS assainissantes | *M. incognita* | *M. arenaria* |
|---|---|---|
| | Phacélie, Fenouils Rondo & Solaris, Roquette Soria & Tiara, *Crotalaria spectabilis* | |
| | | Mâche Trophy & Gala, Avoine Rude, Millet, Sorghos Sudal & Piper |

**Figure 34.** Plantes "moins multiplicatrices" et plantes assainissantes à privilégier dans les rotations. Synthèse issue des essais en conditions contrôlées.

Les échanges au cours du projet ont été un peu limités pendant un an en lien avec la situation sanitaire pendant laquelle les réunions physiques et certaines actions de communications orales ou visites ont été suspendues. Néanmoins, de nombreux documents ont été réalisés et largement diffusés, comme les fiches techniques (voir annexes) et les synthèses des résultats présentées lors du colloque de restitution en mars 2022.

Les avancées techniques obtenues avec le projet Gonem permettent d'envisager des travaux de recherche-expérimentation complémentaires pour alimenter le référentiel des connaissances sur les niveaux de sensibilité et l'intérêt des différentes espèces/variétés de plantes cultivées ou d'interculture. C'est une attente des producteurs qui voudraient plus de références techniques pour les aider à choisir les plantes et variétés les plus intéressantes. Des tests sur le terrain avec certaines plantes identifiées comme particulièrement intéressantes dans les essais en conditions contrôlées mais absentes dans le réseau d'essais Gonem seraient également souhaitables pour tester leur efficacité sur le terrain.