

Projet ANR-21-ECOM-0003

ECLODERA

Programme Ecophyto-Maturation 2021

A	IDENTIFICATION	2
B	RESUME CONSOLIDE PUBLIC	2
B.1	Résumé consolidé public en français	2
B.2	Résumé consolidé public en anglais	3
C	MEMOIRE SCIENTIFIQUE.....	5
C.1	Enjeux socioéconomiques, pertinence par rapport à l'AAP	5
C.2	Problématique sur la base des résultats initiaux	5
C.3	Approche scientifique et technique du projet	6
C.4	Travaux effectués et Résultats obtenus.....	6
C.5	Montée en TRL.....	9
C.6	Acquis en termes de transfert.....	10
D	LIVRABLES ET JALONS	10
E	BILAN DE LA COLLABORATION	11
E.1	Difficultés rencontrées et solutions mises en place	11
E.2	Réunions du consortium.....	12
E.3	Suites envisagées	12
E.3.1	Suites envisagées du point de vue de la recherche	12
E.3.2	Suites envisagées du point de vue de la Montée en TRL	12
E.3.3	Financements complémentaires en lien avec le projet	13
E.4	Commentaires libres.....	13
F	VALORISATION ET IMPACT DU PROJET DEPUIS LE DEBUT	14
F.1	Publications et communications	14
F.2	Autres éléments de valorisation	15
F.3	Personnels recrutés en CDD	15

A IDENTIFICATION

Acronyme du projet	ECLODERA
Titre du projet	Vers un système de production basé sur une combinaison de nouvelles solutions de biocontrôle pour lutter contre le nématode à kyste de la carotte
Coordinateur du projet (société/organisme)	INRAE-IGEPP
Date de début du projet	01/01/2022
Date de fin du projet	30/06/2025
Labels et correspondants des pôles de compétitivité (pôle, nom et courriel du corresp.)	Ø
Site web du projet, le cas échéant	Ø

Rédacteur de ce rapport	
Civilité, prénom, nom	M. Josselin MONTARRY
Téléphone	02 23 48 51 59
Courriel	josselin.montarry@inrae.fr
Date de rédaction	Juillet-Août 2025
Période faisant l'objet du rapport d'activité	Rapport final sur l'entièreté du projet

B RESUME CONSOLIDE PUBLIC

B.1 RESUME CONSOLIDE PUBLIC EN FRANÇAIS

Trois solutions innovantes de biocontrôle contre le nématode à kyste de la carotte

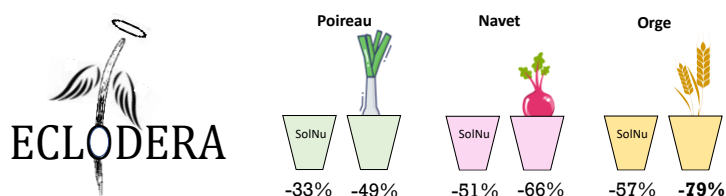
Vers un système de production basé sur une combinaison de nouvelles solutions de biocontrôle pour lutter contre le nématode à kyste de la carotte : Depuis le retrait du dernier nématocide chimique, la filière carotte était orpheline de solutions alternatives. Eclodera démontre l'efficacité de trois solutions agroécologiques pour contrôler les populations d'*Heterodera carotae* : des exsudats stimulant l'éclosion des larves en absence de la plante hôte (éclosion suicide), une variété résistante assainissante (Terapur) et la biofumigation du sorgho.

Des méthodologies et des approches scientifiques de pointes au service d'une impasse phytosanitaire : Lors de ce projet, des essais en parcelles ont été menés pour quantifier l'efficacité des solutions testées en dénombrant les nématodes (larves / g de sol) dans des échantillons de sol prélevés avant et après l'application de la méthode. A ces analyses nématologiques très techniques mais plutôt classiques, Eclodera a ajouté des approches d'évolution expérimentale pour explorer la durabilité de la résistance de Terapur, de description des communautés microbiennes par metabarcoding pour analyser l'effet du microbiote du sol sur l'efficacité de l'éclosion suicide, et de métabolomique non ciblée afin d'identifier la molécule contenue dans les exsudats de carotte qui stimule l'éclosion du nématode.

Résultats majeurs : Eclodera a permis de quantifier le potentiel du sorgho conduit en biofumigation et de la carotte Terapur qui ont induit une diminution importante, de l'ordre de 70%, des populations de nématodes. Une expérimentation menée sur toute la durée du projet montre que les nématodes ne seraient pas capables de contourner la résistance de Terapur. La troisième solution consiste à stimuler l'éclosion des larves en l'absence de leur plante hôte. Eclodera montre que les kystes produits l'année précédente sont moins réceptifs aux exsudats que des kystes plus âgés et que le microbiote du sol peut avoir un impact sur l'efficacité de la solution : les communautés bactériennes et fongiques sélectionnées par le poireau semblent inhiber l'éclosion, ce qui n'est pas le cas de microbiotes sélectionnés par le navet ou l'orge. Enfin, deux approches complémentaires, utilisant des exsudats produits à partir de différentes Apiacées ou de carottes de différents âges, ont permis d'identifier une molécule candidate potentiellement responsable de la stimulation de l'éclosion. Les perspectives du projet concernent la validation de la molécule candidate et l'optimisation d'un procédé de formulation applicable au champ.

Production scientifique : La valorisation associée à ce projet a débuté par un article de synthèse sur *Heterodera carotae* (Montarry et al., 2024, *Nematology* **26** : 1079-1089) et un article présentant un outil moléculaire qui permet de distinguer *H. carotae* de *H. cruciferae* (Fouville et al., 2024, *Physiological and Molecular Plant Pathology* **134** : 102434). Un autre article permet de valoriser les résultats sur la perception des exsudats (Fournet et al., 2025, *Ecology and Evolution* **15** : e71918) et celui sur l'effet du microbiote du sol est soumis (Biget et al., 202-, *Environmental Microbiology*). L'identification de la molécule candidate fera également l'objet d'une publication scientifique. Certains résultats ont été présentés lors de congrès nationaux et internationaux (ESN 2024, RhizosPHARE 2024, E3GP3 2024, SFP 2025, RFMF 2025). Des étudiants (lycée agricole, licence, master) ont été sensibilisés à la problématique et plusieurs articles de presse sont disponibles (Jardins du littoral, AGRA-Innovation).

Illustration :



Légende : Eclodera aura mis en évidence l'effet du microbiote du sol sur l'efficacité de la stimulation de l'éclosion du nématode *Heterodera carotae* par de l'exsudat de carotte.

Informations factuelles : Le projet Eclodera est un projet ANR Ecophyto-Maturation coordonné par Josselin Montarry, chercheur INRAE travaillant à l'UMR IGEPP. Il est le fruit d'un partenariat entre INRAE, le Centre mondial de l'innovation (CMI) du groupe Roullier, la station d'expérimentation et de recherche de la filière légumière normande (SILEBAN) et le semencier Vilmorin-Mikado. Le projet a commencé en janvier 2022 pour une durée de 42 mois et a bénéficié d'une aide ANR de 283 000 €.

B.2 RESUME CONSOLIDE PUBLIC EN ANGLAIS

Three innovative biocontrol solutions against the carrot cyst nematode

Towards a production system based on a combination of new biocontrol solutions to control the carrot cyst nematode: Since the withdrawal of the last chemical nematicide, the carrot sector has no alternative solutions. Eclodera demonstrates the effectiveness of three agroecological solutions for

controlling *Heterodera carotae* populations: exudates stimulating larvae hatching in the absence of the host plant (suicide hatching), a sanitizing resistant variety (Terapur) and biofumigation of sorghum.

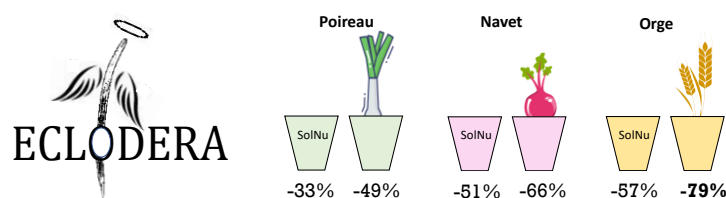
Advanced methodologies and scientific approaches in the service of a phytosanitary impasse:

During this project, field trials were performed to quantify the efficacy of the solutions tested by counting nematodes (larvae / g soil) in soil samples taken before and after the application of the method. To these highly technical but rather classic nematological analyses, Eclodera added experimental evolution approaches to explore the durability of Terapur resistance, metabarcoding to analyze the effect of soil microbiota on suicide hatching, and non-targeted metabolomics to identify the molecule contained in carrot exudates that stimulates nematode hatching.

Major results: Eclodera has enabled us to quantify the potential of biofumigated sorghum and Terapur carrot, which have shown a significant reduction in nematode populations, of around 70%. In addition, experiments performed over the duration of the project seem to show that nematodes are not able to breakdown resistance of Terapur. The third solution is to stimulate larval hatching in the absence of the host plant. Eclodera shows that cysts produced the previous year are less receptive to exudates than older cysts. In addition, particular soil microbiota can have an impact on the effectiveness of the solution: bacterial and fungal communities selected by leek seem to inhibit hatching, which is not the case for microbiota selected by turnip or barley. Finally, two complementary approaches, using exudates produced from different Apiaceae or carrots of different ages, have enabled us to identify a candidate molecule potentially responsible for stimulating hatching. The future prospects of the project concern validation of the candidate molecule and optimization of a formulation process applicable in the field.

Scientific output: The valorisation associated with this project began with a review article on *Heterodera carotae* (Montarry et al., 2024, *Nematology* **26**: 1079-1089) and an article presenting a molecular tool for distinguishing *H. carotae* from *H. cruciferae* (Fouville et al., 2024, *Physiological and Molecular Plant Pathology* **134**: 102434). Another article about exudate perception was recently published (Fournet et al., 2025, *Ecology and Evolution* **15** : e71918) and one about the effect of soil microbiota has been submitted (Biget et al., 202-, *Environmental Microbiology*). The identification of the candidate molecule will also be the subject of a scientific publication. Some results have been presented at national and international conferences (ESN 2024, RhizosPHARE 2024, E3GP3 2024, SFP 2025, RFMF 2025). Students (agricultural schools, bachelor's degrees, master's degrees) have been made aware of the issue, and several press articles are available (Jardins du littoral, AGRA-Innovation).

Graphical illustration:



Legend: Eclodera will have demonstrated the effect of soil microbiota on the efficacy of carrot exudate in stimulating *Heterodera carotae* nematode hatching.

Factual pieces of information: The Eclodera project is an ANR Ecophyto-Maturation project coordinated by Josselin Montarry, an INRAE researcher working at UMR IGEPP. It is the fruit of a partnership between INRAE, the CMI of the Roullier group, the experimentation and research station of the Normandy vegetable sector (SILEBAN) and the seed company Vilmorin-Mikado. The project began in January 2022 for a duration of 42 months, with ANR funding of €283,000.

C MEMOIRE SCIENTIFIQUE

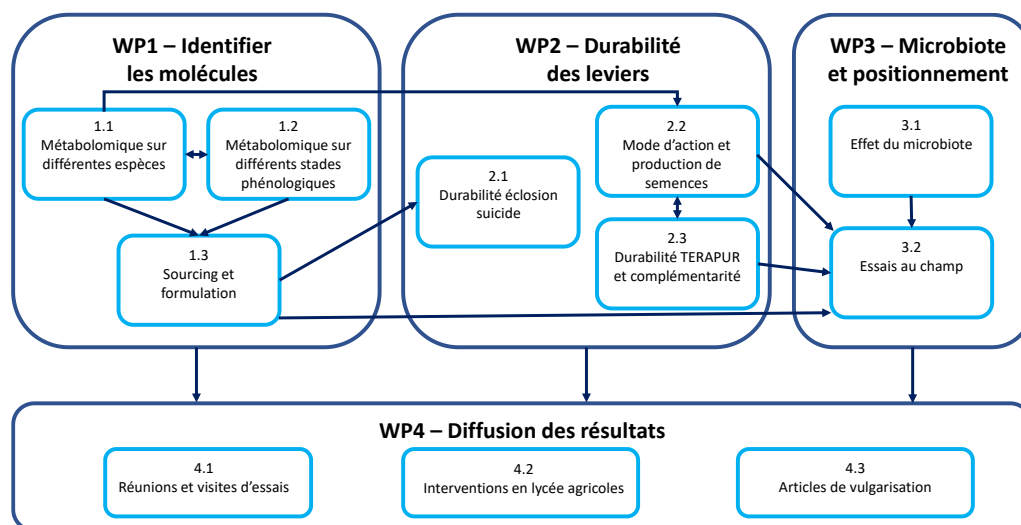
C.1 ENJEUX SOCIOECONOMIQUES, PERTINENCE PAR RAPPORT A L'AAP

Eclodera concerne des leviers mobilisables pour une transition vers un changement de système de culture et s'inscrit dans le développement de solutions pour une situation orpheline. L'objectif affiché est le développement de leviers complémentaires pour remplacer l'utilisation du 1,3-dichloropropène, nématicide chimique qui était utilisé, sous dérogation, par les producteurs de carottes pour désinfecter le sol et lutter contre le nématode à kyste *Heterodera carotae*, qui constitue le premier problème phytosanitaire pour cette culture. Cette substance n'a plus d'autorisation européenne de mise sur le marché depuis 2009, et en 2018 la dérogation française n'a pas été reconduite. La filière carotte est donc depuis en attente de solutions pour contrôler le nématode *H. carotae*. Le ministère de l'agriculture a mis en place un plan de lutte sur 5 ans (2020 – 2024) visant à diversifier et allonger la rotation des cultures. Les solutions explorées par Eclodera sont complémentaires au plan de lutte.

C.2 PROBLEMATIQUE SUR LA BASE DES RESULTATS INITIAUX

Eclodera s'appuie sur des résultats antérieurs qui ont montré le potentiel des deux solutions envisagées pour contrôler les populations du nématode à kyste de la carotte *Heterodera carotae*. L'utilisation d'exsudats racinaires de carotte permet de stimuler l'éclosion des larves contenues dans les kystes qui meurent ensuite dans le sol en absence de la plante hôte. La preuve de concept de l'efficacité de cette solution a été réalisée *in vitro*, en conditions contrôlées et au champ. Néanmoins, elle se heurte au challenge industriel que représente la production massive d'exsudats [verrou]. Nous avons également montré, chez un autre nématode, que le microbiote du sol peut limiter l'efficacité de cette méthode [verrou]. Par ailleurs, en l'absence de variétés résistantes de carotte de consommation, Vilmorin-Mikado a développé une variété résistante de service (Terapur) qui provoque l'éclosion des larves, mais qui, du fait de la résistance, ne permet pas leur multiplication. Les expériences menées en conditions contrôlées et au champ montrent l'efficacité de la résistance et l'amélioration des rendements de la culture suivante de carotte. Néanmoins, il existe des difficultés de production de semences de cette variété, sur le plan quantitatif et qualitatif [verrou], et des expérimentations sont encore nécessaires pour préciser la durabilité de cette résistance [verrou]. La plus-value d'Eclodera sera de considérer ces différents verrous pour permettre une montée en niveau de maturation des deux solutions qui seront combinées pour répondre à l'impasse phytosanitaire que rencontre la filière carotte.

Les objectifs d'Eclodera sont i) d'**identifier dans les exsudats de carotte les molécules** qui stimulent l'éclosion d'*H. carotae*, ii) d'**étudier la durabilité** des deux leviers, utilisés seuls ou combinés, iii) d'**étudier l'effet de microbiotes** sélectionnés par différentes espèces végétales sur la stimulation artificielle de l'éclosion, afin d'identifier puis de tester au champ le **positionnement à privilégier dans l'itinéraire technique**, et enfin iv) d'échanger avec les acteurs de la filière pour **favoriser l'adoption** des solutions alternatives envisagées. Quatre objectifs qui correspondent à quatre work-packages (WP) interconnectés :



C.3 APPROCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU PROJET

Lors de ce projet, des essais en parcelles ont été menés pour quantifier l'efficacité des solutions testées en dénombrant les nématodes dans des échantillons de sol prélevés avant et après l'application de la méthode. A ces **analyses nématologiques**, Eclodera a ajouté des approches de **métabolomique non ciblée** afin d'identifier la(les) molécule(s) qui stimule(nt) l'éclosion du nématode, d'**évolution expérimentale** pour explorer la durabilité de la résistance de Terapur, et de description des communautés microbiennes par **metabarcoding** pour analyser l'effet du microbiote du sol sur l'efficacité de l'éclosion suicide.

C.4 TRAVAUX EFFECTUES ET RESULTATS OBTENUS

WP1 – Identifier les molécules

Deux approches indépendantes ont été menées pour tenter d'identifier la(les) molécule(s) contenue(s) dans l'exsudat de carotte et responsable(nt) de la stimulation de l'éclosion d'*H. carotae*.

La première approche a consisté à produire des exsudats à partir de 15 espèces d'Apiacées. Ces exsudats ont été lyophilisés puis caractérisés biologiquement (test d'éclosion *in vitro*) et métabolomiquement sur deux plateformes complémentaires de métabolomique non ciblée : LC-MS au CMI-Roullier et GC-MS à INRAE-IGEPP. Les tests d'éclosion montrent que ces exsudats couvrent toute la gamme de stimulation de l'éclosion, avec des exsudats qui font fortement éclore les larves du nématode (principalement des carottes cultivées), des exsudats qui font moyennement éclore (principalement des carottes sauvages), et des exsudats qui ne font pas éclore (des plantes non-hôtes comme le panais, le fenouil ou le cerfeuil). Enfin, l'analyse de la covariation entre l'abondance des différents ions détectés et le taux d'éclosion a permis d'identifier un ion candidat qui a un rapport de masse sur charge m/z de 357.

La seconde approche a consisté à produire des exsudats à partir de carottes (cv. Touchon) de différents âges. Les exsudats des carottes jeunes (2, 3, 4 semaines) font peu éclore, puis il y a un optimum d'éclosion (6, 7 semaines) puis la stimulation baisse à nouveau avec les exsudats des carottes les plus âgées (12 semaines). Ceci montre que le nématode, en plus d'être capable de sortir de sa forme de survie uniquement lorsque son hôte est présent, est également capable d'éclore lorsque l'hôte est au stade phénologique le plus favorable à sa multiplication : s'il attaque des racines trop jeunes il risque de tuer sa plante, et si les racines sont trop âgées il aura plus de difficultés à les pénétrer. L'analyse de la covariation entre l'abondance des différents ions détectés et le taux d'éclosion a permis d'identifier un ion candidat qui est le même que dans la première approche, m/z

357. L'analyse des spectres de masse a permis de remonter à la formule brute de cet ion : C₂₀H₃₀O₄. En complément, l'analyse du spectre de fragmentation (MS₂) permet de proposer l'identification suivante : angelate d'acide kurubashic (**L1.1**), molécule qui a été décrite chez une espèce végétale, *Ferula haussknechtii*, qui se trouve être une Apaciée.

WP2 – Durabilité des leviers

Des tests d'éclosion *in vitro* sur des kystes de différents âges montrent que la première stimulation par de l'exsudat fonctionne mieux sur des kystes de 2 et 3 ans que sur des kystes d'1 an (75% d'éclosion vs. 20%). Après un passage au froid de 3 mois (simulant la période hivernale) les larves qui sont restées dans les kystes ont gardé la capacité à éclore, le cumul des deux stimulations étant compris entre 80% (kystes d'1 an) et 100% (kystes de 2 et 3 ans). Ces résultats montrent i) qu'il sera préférable de positionner l'éclosion suicide et la variété Terapur sur des kystes produits il y a plus d'un an, et ii) qu'il existe, chez le nématode, une stratégie de minimisation des risques (bet-hedging) puisque l'exsudat ne sélectionne *a priori* pas des larves qui ont perdu la capacité à éclore (**L2.1**). Nous avons ensuite produit de façon synchrone des larves hâtives (suite à une première stimulation) et des larves tardives (suite à une seconde stimulation) et comparé les traits de vie de ces deux lots de larves. Les larves hâtives produisent un peu plus de kystes que les larves tardives, mais ces kystes néoformés ont des tailles, des contenus larvaires et des vitesses et capacités d'éclosion identiques.

Concernant l'optimisation de la production de semences de Terapur, deux essais ont été menés au champ par Vilmorin-Mikado afin d'identifier les causes de la faible quantité de semences produites (1 dans le sud-ouest et 1 près d'Angers). Les résultats montrent d'importantes différences de maturité des ombelles et une sensibilité à l'égrenage dès que la maturité est atteinte, mais aussi que l'andainage précoce permet de limiter les pertes de graines. Il y a une majorité de graines de petit calibre (< 1.6 mm), mais le calibre des graines n'a pas d'effet sur la qualité de la germination. La fécondation semble être le principal problème, puisque beaucoup de graines sont non fécondées, immatures ou avortées. Ce problème ne semble pas provenir, ou du moins pas seulement, de la composante « mâle » puisque les résultats sont similaires dans les deux essais qui diffèrent par le nombre de mâles à proximité (de multiples mâles dans l'essai du nord contre un seul, Terapur, dans l'essai du sud).

Dans le but d'étudier la durabilité de la résistance de la variété Terapur, deux expériences d'évolution expérimentale ont été mise en place en serre (à INRAE-IGEPP et à Vilmorin-Mikado) durant les 3 ans du projet. *Heterodera carotae* étant capable de réaliser entre 3 et 4 générations par an, nous pouvons considérer qu'il y a eu entre 9 et 12 générations sur la durée du projet. Six lignées indépendantes sont réalisées par modalité. Les 4 modalités consistent à confronter le nématode à une variété sensible seulement (Touchon), à la variété résistante seulement (Terapur), à une alternance Terapur / Touchon / Terapur et à une combinaison Terapur + éclosion suicide. La densité de nématodes a augmenté dans la modalité Touchon, oscillé dans la modalité alternance et fortement baissé dans les modalités Terapur et Terapur + éclosion suicide (**L2.5**). Le nombre de larves disponibles à l'issue des 3 années était trop faible dans ces modalités pour pouvoir réaliser le test visant à mesurer et comparer le niveau de virulence entre les modalités. Nous n'avons donc constaté aucun signe de contournement de la résistance (**L2.4**). Ce potentiel de durabilité constaté peut s'expliquer par nos résultats obtenus en conditions contrôlées qui montrent que cette résistance est quantitative avec un niveau variable au sein d'un lot de graines, et qu'elle agit en cumulant deux mode d'actions : principalement en masculinisant les populations mais aussi en bloquant la migration de larves dans la racine (**L2.2**).

WP3 – Microbiote et positionnement

Nous avons testé l'effet du microbiote sélectionné par des précédents culturels sur l'efficacité de l'éclosion suicide en conditions contrôlées. Pour ce faire, nous avons récupéré 2 types de sols (sable blanc et sable terreux) et avons réalisé 3 cycles de 3 semaines de culture de poireau, navet et orge (cultures susceptibles de rentrer en rotation avec la carotte). Des échantillons de sol ont été prélevés avant, pendant et après la sélection du microbiote par les différentes plantes afin de caractériser par metabarcoding les communautés bactériennes et fongiques et les propriétés physico-chimiques des sols. L'efficacité de l'éclosion suicide a ensuite été testée dans les différents sols et les différents microbiotes en présence et en absence de la plante (pour simuler une application à l'implantation ou en post-récolte) en positionnant des sachets de 12 kystes d'*H. carotae* dont le contenu larvaire est connu et en apportant soit de l'eau, soit de l'exsudat à deux doses. Cette expérimentation était donc constituée de 360 pots individuels (2 sols * 3 microbiotes * 2 conditions * 3 traitements * 10 répétitions). Le dénombrement des larves viables restées dans les kystes à la fin de l'expérimentation montre que le plus fort effet est celui du traitement avec une stimulation de l'éclosion par l'exsudat (par rapport au témoin eau) et un effet dose (dose forte stimulant plus l'éclosion). Il y a aussi un effet condition qui montre que l'efficacité est plus forte quand une plante est présente, et un effet microbiote, l'éclosion étant moins importante dans le microbiote sélectionné par le poireau que dans ceux sélectionnés par le navet ou l'orge. Dans les pots avec du sable blanc, avec un microbiote sélectionné par le poireau, la réduction du nombre de larves par kyste n'est que de 33%, alors qu'avec un microbiote sélectionné par l'orge, on atteint une réduction de 79% du nombre de larves par kyste. Le séquençage de marqueurs ADN fongiques et bactériens (metabarcoding ITS et rpoB, respectivement) montre que les communautés microbiennes ont bien divergé lors de la culture des trois plantes (concept de 'soil legacy'). Le calcul de corrélations entre les abondances relatives des différents taxa microbiens et les pourcentages d'éclosion (analyses DeSeq2) a permis d'identifier deux ASVs (variant de séquence d'amplicon) fongiques. Le premier, moins présent dans le microbiote poireau, correspond à une espèce non-identifiée, mais le second, plus présent dans le microbiote poireau, correspond à l'espèce *Fusarium equiseti*. Ce champignon est connu pour produire une mycotoxine, le DAS (diacetoxy-scirpenol), que nous nous sommes procuré et qui, lorsqu'il est ajouté à l'exsudat de carotte dans un test *in vitro*, inhibe totalement l'éclosion d'*H. carotae*. Ces résultats permettent d'optimiser le positionnement de la solution d'éclosion suicide en préconisant de ne pas appliquer l'exsudat sur ou après un poireau (L3.1). De plus, positionner une carotte juste après un poireau peut permettre de limiter l'éclosion d'*H. carotae* en début de culture. Une diversification spatiale, qui mélange des carottes et des poireaux dans une même parcelle, pourrait aussi avoir un intérêt mais semble agronomiquement difficilement applicable.

Des essais en parcelles ont été mis en place et suivis par le SILEBAN dès la première année du projet. Les deux essais étaient situés dans deux parcelles distinctes et chaque essai était constitué de 4 micro-parcelles (2 planches sur 30 m de long) qui devaient permettre de comparer 4 modalités : Terapur, Terapur + éclosion suicide, éclosion suicide et témoin. Lors de la première année, 2 micro-parcelles ont reçu de la Terapur et nous avons décidé que les 2 autres micro-parcelles recevraient du sorgho qui serait biofumigé afin de disposer de données quantitatives sur l'efficacité de cette solution déjà utilisée dans le cadre du plan de lutte mis en place par le ministère de l'agriculture. Lors de la seconde année, un essai a été planté en poireau et l'autre en orge et les micro-parcelles ont reçu des applications d'exsudats ou d'eau afin de confronter les résultats obtenus en conditions contrôlées à la réalité du terrain. Une carotte a été cultivée lors de la dernière année. Des prélèvements de sols (9 par micro-parcelle) ont été réalisés chaque année avant et après la culture et analysés par INRAE-IGEPP. Les résultats montrent une baisse significative du nombre de larves / g de sol dans les 4 micro-parcelles avec Terapur : 66% en moyenne (L3.2). Une diminution équivalente, de 67% en moyenne, a été obtenue avec le sorgho conduit en biofumigation, mais pour mettre en évidence l'effet du sorgho

il ne faut pas faire les prélèvements trop tôt par rapport à l'enfouissement du sorgho broyé : après 1 mois les différences ne sont pas toujours significatives alors que c'est le cas après 6 mois supplémentaires. Ceci explique des résultats souvent variables obtenus précédemment par le SILEBAN. De l'exsudat de carotte a été produit en grandes quantités et les apports ont été réalisés en année 2 sur orge et poireau. Alors que dans l'essai avec du poireau l'exsudat n'a pas eu d'effet (différences non significatives), la densité de nématodes a diminué significativement dans les deux micro-parcelles de l'essai avec de l'orge (-60% et -73% du nombre de larves / g de sol), ce qui va dans le même sens que les résultats obtenus en conditions contrôlées. Les prélèvements réalisés avant les semis de carotte en année 3 ont montré que les populations avaient fortement diminué (de 5 larves au départ à 0.7 larves / g de sol) dans toutes les micro-parcelles des essais. Cette quasi homogénéité n'a pas permis de comparer les modalités entre elles, mais montre que la multiplication du nématode est très importante lorsque la compétition est faible : la population a été multipliée par 61 dans une parcelle et par 106 dans l'autre.

WP4 – Diffusion des résultats

Le projet a été présenté lors de deux journées Ecophyto-Maturation, à l'AG de la Fredon Normandie et lors des rencontres phyto du CTIFL. Lors du Copil n°3 (qui s'est tenu à Lessay) où nous avons invité les responsables techniques des organisations de producteurs et lors d'une journée technique organisée à Créances par le SILEBAN où de nombreux producteurs étaient présents, les échanges ont permis d'identifier d'éventuels freins à l'adoption des solutions explorées, et ce en particulier pour la variété Terapur. L'hétérogénéité de la levée, le faible pouvoir couvrant de la variété Terapur et le manque d'herbicides homologués sur carotte entraînent d'importantes difficultés pour la gestion des adventices. Cette variété est résistante au nématode mais pas aux autres agents pathogènes attaquant la carotte, ainsi Terapur peut multiplier de l'inoculum fongique dans la parcelle (L4.1).

Plusieurs interventions pédagogiques ont été réalisées (fête de la science à Rennes, interventions devant des étudiants du BTSA de Caen, de Licence Pro de l'Institut-Agro de Rennes et de Master de l'université de Rennes). Une intervention au lycée agricole du Rheu (présentation du projet et TP d'observation des nématodes) a permis de sensibiliser les lycéens à cette problématique (L4.2).

Plusieurs articles de vulgarisation auront été produits (Jardins du littoral, Médiafel, actus-INRAE, AGRA-INNOVATION), et la valorisation académique des résultats d'Eclodera est déjà bien engagée (L4.3). En plus de présentations orales dans des congrès internationaux et nationaux, 3 articles scientifiques sont publiés, 1 soumis et 1 en préparation. Les 2 articles publiés en 2024 correspondent à un article de synthèse sur ce nématode (*Nematology*) et à un outil moléculaire permettant de dissocier *H. carotae* de *H. cruciferae* (*Physiological and Molecular Plant Pathology*), outil qui devient indispensable du fait de la diversification, et donc de l'intégration de crucifères dans la rotation des cultures (LS1 et LS2).

C.5 MONTEE EN TRL

Eclodera avait pour ambition de permettre la montée en maturation du TRL 4 aux TRL 6-7 de deux leviers complémentaires de lutte contre le nématode à kyste de la carotte *H. carotae* : l'utilisation de molécules issues d'exsudats racinaires pour induire l'éclosion des larves en l'absence de la plante (éclosion suicide) et l'utilisation d'une variété résistante (Terapur) comme plante de service.

Concernant Terapur, la production de graines n'aura que légèrement été optimisée, mais les essais en parcelles montrent une baisse très importante de la population du nématode lors de la culture de cette variété. Les résultats des évolutions expérimentales suggèrent que cette résistance a un bon potentiel de durabilité. Des freins à l'adoption ont été identifiés, mais nos recommandations (voir

partie C6 : Acquis en termes de transfert) devraient permettre une utilisation optimale de cette plante de service. Nous pouvons considérer que ce levier a donc atteint un TRL 6-7 en fin de projet.

Concernant l'éclosion suicide, la montée en niveau de maturation est plus lente mais nous avons maintenant identifié une molécule candidate. Les résultats sur l'effet du microbiote permettent clairement d'optimiser le positionnement de cette solution. De plus, l'IGEPP a obtenu, en marge d'Eclodera, un résultat qui répond partiellement au verrou identifié de la production massive d'exsudats liquide : des racines de carotte lyophilisées puis resolubilisées permettent de stimuler l'éclosion *in vitro*. Produire ou récupérer des quantités importantes de racines semble répondre à cette impasse technologique, et lyophiliser des racines sera aussi moins coûteux que la lyophilisation d'exsudats liquides. De par ce résultat original, la montée en TRL de la stratégie d'éclosion suicide sera prochainement réalisée (voir partie E3 : Suites envisagées).

Enfin, et alors que la solution n'était pas mentionnée dans le projet initial, nous avons quantifié et démontré l'efficacité de la biofumigation du sorgho pour diminuer fortement les populations d'*H. carotae* ; solution qui est aujourd'hui pleinement adoptée par les producteurs.

C.6 ACQUIS EN TERMES DE TRANSFERT

Lors du dernier Copil d'Eclodera, nous avons produit une vidéo qui synthétise l'ensemble des résultats du projet et qui est publiquement accessible (<https://youtu.be/2vbXByxvs2k>).

Ce dernier Copil aura aussi été l'occasion de travailler en sous-groupes à l'élaboration d'un schéma de rotation optimal pour contrôler les populations d'*H. carotae*. Les recommandations issues de ce travail sont de positionner Terapur sur une période plus courte que ce qui a été pratiqué lors du plan de lutte, en positionnant une plante de rente la même année (un poireau tardif par exemple). Ceci permettra de limiter les dis-services identifiés (multiplication des adventices et autres agents pathogènes) et de préserver la durabilité de la résistance. Le poireau devrait être positionné juste avant une carotte, mais l'éclosion suicide ne doit au contraire pas être appliquée ni sur ni après un poireau. Ecllosion suicide et Terapur devront être utilisées sur des kystes de plus d'un an, donc pas juste derrière une carotte. Le sorgho conduit en biofumigation peut quant à lui venir derrière une carotte. Un (ou plusieurs) schéma(s) de rotation prenant en compte ces recommandations se dessine(nt) donc et en simulant l'évolution de la densité de nématodes, l'ensemble des groupes de travail a abouti à la conclusion que les solutions devraient être combinées et que le développement de la solution d'éclosion suicide doit être poursuivi pour pouvoir ajouter cette solution aux deux autres qui ne permettront pas à elles seules de réduire les populations d'*H. carotae* sur le long terme.

D LIVRABLES ET JALONS

N°	Intitulé	Nature*	Date de fourniture			Partenaires (souligner le responsable)
			Prévue initiale ment	Repla nifiée	Livrée	
L1.1	Liste de molécules candidates capables de provoquer l'éclosion d' <i>H. carotae</i>	livrable	M18	M24	M42	<u>IGEPP</u> + CMI
L1.2	Prototype d'un produit formulé	livrable	M36		NL	<u>CMI</u>
L2.1	Capacité des larves à éclore suite à une première stimulation	livrable	M36	M18	M18	<u>IGEPP</u>
L2.2	Mode d'action de la résistance de Terapur	livrable	M6	M24	M42	<u>IGEPP</u> + Vilmorin
L2.3	Protocole d'optimisation de la production de semences de Terapur	livrable	M36		NL	<u>Vilmorin</u>
L2.4	Capacité d'adaptation d' <i>H. carotae</i> à la résistance de Terapur	livrable	M36		M42	<u>IGEPP</u>

N°	Intitulé	Nature*	Date de fourniture			Partenaires (souligner le responsable)
			Prévue initiale ment	Replanifiée	Livrée	
L2.5	Gain de durabilité de Terapur apporté par l'alternance des 2 solutions	livrable	M36		M42	<u>IGEPP</u>
L3.1	Liste des précédents et mode d'application à privilégier pour stimuler l'éclosion	livrable	M12		M18	<u>IGEPP</u>
L3.2	Résultats des essais en parcelles	livrable	M36		M42	<u>SILEBAN</u> + IGEPP
L4.1	Liste des freins à l'adoption des solutions	livrable	M6		M18	<u>IGEPP</u> + SILEBAN
L4.2	Matériel pédagogique produit	livrable	M36		M42	<u>IGEPP</u>
L4.3	Article dans Jardins du littoral et brochures	livrable	M36		M42	<u>SILEBAN</u> + IGEPP
LS1	Article de synthèse sur <i>H. carotae</i>	livrable			M42	<u>IGEPP</u>
LS2	Article présentant un outil moléculaire pour distinguer <i>H. carotae</i> et <i>H. cruciferae</i>	livrable			M42	<u>IGEPP</u>
J1	La mise en évidence d'une stratégie de bet-hedging a permis de comparer les traits de vie entre les stratégies d'éclosion distinctes	jalón	M12		M18	<u>IGEPP</u>
J2	Les résultats de métabolomiques ont permis d'identifier une molécule candidate en M36, donc pas le temps de mener une approche de fractionnement bio-guidé	jalón	M12	M24	M36	<u>IGEPP</u> + CMI
J3	Les résultats du WP3.1 ont permis de choisir la culture à mettre en place dans les essais	jalón	M12		M18	<u>IGEPP</u>
J4	L'identification de la molécule candidate en M36 (qui n'est pas encore validé) n'a pas permis d'initier le WP1.3 (sourcing/formulation)	jalón	M18	M24	NF	<u>CMI</u>
J5	Les résultats sur la production de graines de TERAPUR n'ont pas permis d'identifier des études complémentaires	jalón	M24		NF	<u>Vilmorin</u>

* *jalón, rapport, logiciel, prototype, données, ...*; NL: non livré; NF: non franchi; LS: livrable supplémentaire

E BILAN DE LA COLLABORATION

E.1 DIFFICULTES RENCONTREES ET SOLUTIONS MISES EN PLACE

Dans le cadre du WP1 (identifier les molécules), les exsudats des 15 espèces d'Apiacées ont été produits une première fois mais un problème lors de leur lyophilisation a abouti au fait qu'aucun exsudat ne stimulait l'éclosion. Le choix a donc été fait de reproduire les exsudats du WP1.1 en suivant le protocole (de la production jusqu'à la lyophilisation) du WP1.2 qui, lui, a donné des exsudats issus de carottes de différents stades phénologiques qui stimulent comme attendu l'éclosion. Cette difficulté a entraîné le repositionnement des jalons J2 et J4, et la molécule candidate identifiée n'étant pas encore validée, le WP1.3 sur le sourcing et la formulation n'a pas pu être initié. Par conséquent, le projet n'a pas pu fournir le prototype d'un produit formulé (livrable **L1.2** non livré).

Dans le cadre du WP2.2 (optimisation de la production de semences de Terapur), les résultats issus des deux essais menés ont permis d'identifier les causes et de formuler des recommandations (andainage précoce pour limiter les pertes liées à l'égrenage), mais n'ont pas permis d'initier d'autres expérimentations pour réellement améliorer la production (jalón J5 non franchi), ni de produire un protocole d'optimisation de la production (livrable **L2.3** non livré).

Dans le cadre du WP3.1 (effet du microbiote), l'expérimentation en chambre de culture a été réalisée une première fois, mais l'exsudat utilisé ne stimulait pas l'éclosion (problème de pH de l'eau utilisée pour produire cet exsudat). La partie la plus onéreuse (caractérisation des microbiotes par métabarcoding) n'ayant pas encore été engagée, le choix a été fait de reconduire toute l'expérimentation, et cette fois-ci l'exsudat utilisé était bon. Cette difficulté n'a engendré que 6 mois de retard par rapport au planning initialement prévu.

Dans le cadre du WP4 (diffusion des résultats), nous n'avons réussi qu'à réaliser une seule intervention en lycée agricole (Le Rheu). De nombreux échanges, avec plusieurs interlocuteurs, ont eu lieu avec le lycée de Coutances (dans la Manche), mais malgré une proposition clé en main (intervention + TP) et plusieurs relances, l'opportunité n'aura pas été saisie. La production d'un film présentant les résultats du projet est un bon moyen de diffuser les résultats au plus grand nombre.

E.2 REUNIONS DU CONSORTIUM

Date	Lieu	Partenaires présents	Thème de la réunion
02/02/2022	Le Rheu (35)	Tous	COFIL n°1 – réunion de lancement
23/09/2022	Le Rheu (35)	Tous	COFIL n°2 – réunion d'avancement
12/04/2023	Lessay (50)	Tous	COFIL n°3 – réunion d'avancement
24/01/2024	St Malo (35)	Tous	COFIL n°4 – réunion d'avancement
16/10/2024	La Méritré (49)	Tous	COFIL n°5 – réunion d'avancement
26/06/2025	Le Rheu (35)	Tous	COFIL n°6 – réunion de clôture

E.3 SUITES ENVISAGEES

E.3.1 SUITES ENVISAGEES DU POINT DE VUE DE LA RECHERCHE

Le projet Eclodera aura produit des résultats forts sur l'influence du microbiote du sol dans le dialogue chimique entre les plantes et les nématodes. *Fusarium equiseti* (qui est un agent pathogène de plusieurs plantes cultivées) et le DAS (qui est une mycotoxine) ne semblent pas être de bons candidats pour faire du biocontrôle, mais Eclodera aura montré l'importance de considérer le microbiote du sol dans l'interaction entre les nématodes phytoparasites et leurs plantes hôtes.

La solution d'éclosion suicide développée ici est spécifique du nématode de la carotte ; des développements similaires peuvent être envisagés pour cibler d'autres nématodes dont l'éclosion est dépendante des exsudats racinaires, comme c'est le cas des nématodes de la pomme de terre *Globodera pallida* et *G. rostochiensis*.

E.3.2 SUITES ENVISAGEES DU POINT DE VUE DE LA MONTEE EN TRL

Les perspectives du projet Eclodera concernent l'éclosion suicide.

Nous avons soumis un pré-projet (**VALIDERA**) au Challenge ASTRAGAL qui a pour objectif de valider la molécule candidate identifiée. Cette validation passera par une approche de fractionnement bio-guidé qui permettra de purifier et de concentrer la fraction active afin de confirmer la structure de la molécule par spectrométrie de masse et/ou RMN. Les possibilités de sourcing naturel (biosourcing) ou par (hémi)synthèse seront évaluées, et une étude préliminaire de la stabilité (rémanence) de la molécule sera menée en conditions contrôlées.

Nous avons obtenu un financement sur 3 ans (projet FEADER – région Normandie) pour le projet **EVADERA** qui a pour objectif d'optimiser la production de racines de carotte et la formulation en granulés ou capsules applicables en parcelles de production.

E.3.3 FINANCEMENTS COMPLEMENTAIRES EN LIEN AVEC LE PROJET

Acronyme et Titre du projet	Durée	Partenaires impliqués	Titre Appel à projets et Financier	Date (demande ou obtention)
EVADERA	3 ans	SILEBAN, INRAE-IGEPP, CTIFL	FEADER Normandie	Projet financé et démarré le 01/04/2025
VALIDERA	3 ans	INRAE-IGEPP	ASTRAGAL	Pré-projet déposé

E.4 COMMENTAIRES LIBRES

Commentaires du coordinateur

Malgré quelques difficultés rencontrées, mentionnées en C4, le consortium a su s'adapter et prendre les décisions adéquates ; il en résulte que le projet n'a pas pris un retard important. Les résultats obtenus sont très satisfaisants et permettent d'assurer une montée en niveau de TRL des deux leviers explorés, mais aussi de disposer de données chiffrées sur l'efficacité d'un troisième levier, le sorgho conduit en biofumigation. La valorisation académique est également importante : 3 articles publiés, 1 soumis et 1 en préparation. Les interactions entre les différents partenaires ont été bonnes et régulières. Le fait d'avoir confié chaque WP à un binôme constitué à chaque fois d'un membre de l'IGEPP m'a permis, en tant que coordinateur, de suivre aisément l'avancement des différents travaux.

Commentaires des autres partenaires

CMI-Roullier :

Eclodera a permis d'explorer plusieurs leviers afin de proposer des solutions durables contre le nématode de la carotte, dont une stratégie visant à stimuler l'éclosion des larves en absence de la plante hôte.

En partenariat avec INRAE, des analyses métabolomiques non ciblées ont été réalisées et corrélées avec des analyses d'activités biologiques des échantillons (éclosion), permettant ainsi d'identifier différentes molécules candidates d'intérêt. Pour le CMI, ce projet a conduit à l'optimisation d'une méthode de développement en interne ainsi qu'à la réalisation d'une analyse bioguidée des métabolites.

L'organisation régulière des comités de pilotage ainsi que la répartition du travail en binôme, a permis d'avoir une bonne vision de l'ensemble du projet et d'échanger efficacement sur les avancées et points techniques quand nécessaire.

SILEBAN :

Eclodera a permis l'obtention de résultats très intéressants pour la mise en pratique de solutions contre le nématode de la carotte et notamment sur le positionnement des différentes solutions envisagées dans le projet. Ces informations sont cruciales pour la bonne réussite des leviers mis en œuvre sur le terrain.

Le suivi de parcelles réalisé sur les 3 années du projet avec l'appui de l'IGEPP a été techniquement très enrichissant par un suivi très régulier et des analyses réalisées en nombre.

Cela a permis notamment de confirmer la pertinence de la technique de l'éclosion suicide. La poursuite de l'étude et le développement de cette technique prometteuse sont d'ores et déjà en cours dans le projet EVADERA.

Enfin, l'organisation très régulière des comités de pilotage a permis à tous les partenaires de suivre et d'avoir une vision globale du projet, ce qui a permis une compréhension et une communication fluide des résultats. Ceci a été très appréciable.

Vilmorin-Mikado :

Ce projet a contribué à apporter de nouvelles connaissances pour lutter contre le nématode à kyste de la carotte. En tant que semencier, il était important pour nous de mieux connaître les mécanismes biologiques et métabolomiques de l'interaction nématode-hôte mais aussi dans son environnement (rhizosphère). Même si tous les livrables n'ont pas été obtenus, nous avons acquis des données et transférés des technologies pour continuer à travailler à développer des résistances pour fournir une solution génétique.

F VALORISATION ET IMPACT DU PROJET DEPUIS LE DEBUT

F.1 PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

Liste des publications		
International	Revue à comité de lecture	- Montarry J., Biget M., Chereau S., Lebreton L. Grenier E. and Fournet S. (2024) The carrot cyst nematode <i>Heterodera carotae</i>: a major plant-parasitic nematode requiring more investigation. <i>Nematology</i> 26: 1079-1089. https://doi.org/10.1163/15685411-bja10361 - Fouville D., Biget M., Montarry J., Fournet S. and Grenier E. (2024) A diagnostic gap to fill: Development of molecular tools to distinguish the plant parasitic nematode species <i>Heterodera carotae</i> and <i>Heterodera cruciferae</i>. <i>Physiological and Molecular Plant Pathology</i> 134: 102434. https://doi.org/10.1016/j.pmp.2024.102434 - Fournet S., Fouville D., Porte C. and Montarry J. (2025) Empirical evidence of a bet-hedging strategy in the carrot cyst nematode <i>Heterodera carotae</i>. <i>Ecology and Evolution</i> 15 : e71918. https://doi.org/10.1002/ece3.71918 - Biget M., Vannier N., Gazengel K., Marquer B., Linglin J., Langrume C., Porte C., Chéreau S., Fouville D., Fournet S., Lebreton L. and Montarry J. (202-) Soil legacy mediated microbial enrichment determines the hatching induction of the carrot cyst nematode <i>Heterodera carotae</i>. <i>Environmental Microbiology</i> (soumis). - Un article à venir sur l'identification d'une molécule candidate impliquée dans la stimulation de l'éclosion d'<i>H. carotae</i>.
	Ouvrages ou chapitres d'ouvrage	
	Communications (conférence)	Biget M., Vannier N., Gazengel K., Marquer B., Linglin J., Langrume C., Porte C., Chereau S., Fouville D., Fournet S., Lebreton L. and Montarry J. (2024) The biocontrol strategy based on the hatching stimulation of <i>Heterodera carotae</i> is influenced by the soil microbiota selected by previous crops. 35th Symposium of the ESN, Cordoba, Spain, 15-19 April 2024.
France	Revue à comité de lecture	
	Ouvrages ou chapitres d'ouvrage	
	Communications (conférence)	- Biget M., Vannier N., Gazengel K., Marquer B., Linglin J., Langrume C., Porte C., Chéreau S., Fouville D., Fournet S., Lebreton L. and Montarry J. (2024) Harnessing soil microbiota: optimizing hatching stimulation for effective biocontrol of <i>Heterodera carotae</i>. Journées RhizosPHARE, Rennes, 11-13 novembre 2024. - Biget M., Vannier N., Gazengel K., Marquer B., Linglin J., Langrume C., Porte C., Chéreau S., Fouville D., Fournet S., Lebreton L. and Montarry J. (2024) Harnessing soil microbiota: optimizing hatching stimulation for effective biocontrol of <i>Heterodera carotae</i>. Plénière E3GP3, Paris, 25-26 novembre 2024. - Chéreau S., Fournet S., Lebreton L., Biget M., Gazengel K., Vannier N., Montarry J. (2025) A biocontrol solution using carrot root-exudates to lure larvae of the cyst nematode <i>Heterodera carotae</i>. 12ème colloque de la SFP, Bordeaux, 20-23 mai 2025.
Actions de diffusion	Articles de vulgarisation	- Article dans Jardins du littoral (nov. 2022) - Article dans Jardins du littoral (mai 2025)

		3. Article dans les actualités INRAE (02/04/2025)
		4. Article dans AGRA-INNOVATION (29/04/2025)
	Conférences de vulgarisation	1. Intervention lors de l'AG de la Fredon Normandie (07/07/2023) 2. Journée technique organisée par le SILEBAN (27/09/2023) 3. Rencontres phyto du CTIFL à Lanxade (29/11/2023)
	Salons professionnels	1.
	Autres	1. Fête de la science à Rennes (13-14/10/2022) 2. Vidéo de présentation des résultats du projet (YouTube INRAE centre Bretagne-Normandie)

F.2 AUTRES ELEMENTS DE VALORISATION

Liste des éléments. Préciser les titres, années et commentaires	
Brevets internationaux obtenus	1.
Brevet internationaux en cours d'obtention	1.
Brevets nationaux obtenus	1.
Brevet nationaux en cours d'obtention	1.
Licences d'exploitation (obtention / cession)	1.
Créations d'entreprises ou essaimage	1.
Nouveaux projets collaboratifs	1. Projet FEADER région Normandie EVADERA 2. Projet ASTRAGAL VALIDERA (soumis)
Colloques scientifiques	1.
actions vers les médias	1. Interview avec une journaliste de Médiafel (15/01/2024)
enseignements-formation	1. Accueil d'étudiants BTSa de Caen au SILEBAN (20/10/2022) 2. Intervention à l'Institut-Agro de Rennes en Licence Pro (03/02/2023 et 09/02/2024) 3. Interventions à l'université de Rennes en M1 BMC (08/11/2023 et 20/11/2024) et en M2 APVV (08/12/2023 et 22/11/2024) 4. Intervention au sein du lycée agricole du Rheu (08/01/2025)
méthodologies (guides...)	1.
Autres (préciser)	1.

F.3 PERSONNELS RECRUTES EN CDD

Identification				Avant le recrutement sur le projet			Recrutement sur le projet				Après le projet				
No m et pré no m	Se xe H/ F	Adresse email (1)	Date des dernières nouvelles	Dernier diplôme obtenu au moment du recrutement	Lieu d'études (France, UE, hors UE)	Expérience prof. antérieure (ans)	Partenaire ayant embauché la personne	Poste dans le projet (2)	Date de recrutement	Durée missions (mois) (3)	Devenir professionnel (4)	Type d'emploi (5)	Type d'emploi (6)	Lien au projet ANR (7)	Valorisation expérience (8)
Bige t Marine	F	Marinebiget.travail@gmail.com	Juin 2025	Doctorat	France	5 ans	INRAE	Ingénieure	01/02/2022	33 mois	CDD	Univ Rennes	Ingénieure	non	oui