



Une démarche de co-conception d'innovations du système de culture au système agri-alimentaire pour une gestion agroécologique des bioagresseurs telluriques en maraîchage provençal

Yann Boulestreau

► To cite this version:

Yann Boulestreau. Une démarche de co-conception d'innovations du système de culture au système agri-alimentaire pour une gestion agroécologique des bioagresseurs telluriques en maraîchage provençal. Sciences agricoles. Université d'Avignon, 2021. Français. NNT : 2021AVIG0725 . tel-03210879

HAL Id: tel-03210879

<https://theses.hal.science/tel-03210879>

Submitted on 28 Apr 2021

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

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

THESE

pour obtenir le grade de Docteur de l'Université d'Avignon

École Doctorale 536 Agrosociétés & Sciences

Une démarche de co-conception d'innovations du système de culture au système agri-alimentaire pour une gestion agroécologique des bioagresseurs telluriques en maraîchage provençal

Présentée et soutenue publiquement par

Yann BOULESTREAU

le 11 Février 2021

Sous la direction de **Mireille NAVARRETE** (Directrice de thèse) et

Marion CASAGRANDE (Co-encadrante de thèse)

Devant le jury composé de :

Pr. Walter ROSSING, FSE Wageningen University & Research, Pays-Bas, **Rapporteur**

Dr. Lorène PROST, UMR LISIS INRAE, Paris, **Rapporteuse**

Dr. Olivier THEROND, UMR LAE INRAE/UL, Colmar, **Examineur**

Pr. Stéphane de TOURDONNET, Supagro, Montpellier, **Examineur**

Dr. François BOUSQUET, UR GREEN, CIRAD, Montpellier, **Examineur**

Dr. Mireille NAVARRETE, UR Ecodéveloppement, INRAE, Avignon, **Directrice de thèse**

Dr. Marion CASAGRANDE, ITAB, Gotheron, **Co-encadrante de thèse**

Dr. Antoine PIERART, ADEME, Angers, **ingénieur référent, invité**

Résumé

Français

Un changement rapide et d'ampleur vers des pratiques agricoles qui contribuent à la protection de l'environnement et la santé humaine est nécessaire. Dans de nombreux cas, ces pratiques alternatives existent, mais elles ne sont pas mises en œuvre du fait de contraintes au niveau de la parcelle, de l'exploitation, du territoire, de la filière et/ou à une échelle globale. Dans ma thèse, j'ai développé une méthodologie d'accompagnement du changement de pratiques prenant en compte les déterminants du choix des pratiques aux différentes échelles. J'ai appliqué cette méthodologie sur un cas d'étude précis : la gestion des bioagresseurs telluriques, en particulier des nématodes à galles, en maraîchage sous abris provençal. Les nématodes à galles causent des dommages importants sur les cultures maraîchères au niveau provençal (40% des exploitations touchées) et mondial. Leur gestion actuelle repose essentiellement sur l'usage de nématicides non sélectifs causant des dommages en matière environnementale et de santé humaine.

Tout d'abord, j'ai réalisé une analyse sociotechnique montrant que le système agri-alimentaire maraîcher provençal était majoritairement verrouillé autour de l'utilisation des techniques « de désinfection radicale des sols », excluant ainsi la mise en œuvre de techniques alternatives agroécologiques. Ce verrouillage était constitué d'un ensemble de freins interconnectés qui ont entravé le changement de pratiques et auxquels prenait part une diversité de parties prenantes au niveau provençal et au-delà : les agriculteurs, l'amont et l'aval de la filière (consommateurs inclus), la R&D et les acteurs des politiques publiques. Suite à cette analyse, j'ai étudié des innovations couplées existantes facilitant la mise en œuvre d'une protection agroécologique des cultures dans les systèmes légumiers français. Cette « traque aux innovations » nous a permis d'identifier 5 types d'innovations couplées, et pour chaque type les combinaisons de leviers sociotechniques mobilisés et leurs conditions de mise en œuvre. En parallèle, j'ai mis au point un jeu sérieux me permettant de partager efficacement le résultat de l'analyse sociotechnique avec les parties prenantes du problème. Ce jeu sérieux m'a également permis de faciliter la gestion des connaissances et la créativité chez les parties prenantes et de favoriser leur collaboration, afin d'initier la conception de solutions innovantes adaptées au problème traité. Enfin, j'ai mobilisé les travaux précédents (analyse, traque et jeu) lors de 4 ateliers de coconception avec les parties prenantes. J'ai créé et mobilisé une diversité de dispositifs d'accompagnement dans ces ateliers. Ils ont permis de concevoir des solutions de plus en plus élaborées pour faciliter le changement de pratiques. Au total, nous avons collectivement conçu 50 solutions innovantes dont 41 innovations couplées, ouvrant ainsi l'espace des solutions possibles. Nous avons également évalué une partie des innovations couplées.

En discussion, je pointe les pistes d'action et de recherche prometteuses pour faciliter l'implémentation de pratiques agroécologiques de gestion des bioagresseurs telluriques en maraîchage provençal sous abris. Je discute les évolutions possibles du dispositif méthodologique que j'ai développé au cours de ma thèse. Je propose ainsi d'améliorer son efficacité et de compléter le processus de conception en précisant les conditions de mise en œuvre des innovations conçues, en les évaluant et en les ancrant dans le système agri-alimentaire territorial. Enfin, je montre que ce travail contribue à établir des bases théoriques et méthodologiques à l'accompagnement du changement de pratiques par la reconception multi-échelle de systèmes agricoles.

Les parties A « Problématique » et C « Discussion » de ma thèse sont rédigées en français. La partie B est constituée de trois articles et d'un chapitre de thèse rédigés en anglais.

English – Title: A co-design approach for innovating from the cropping to the agrifood system – Application to the agroecological management of soil-borne pests and diseases in Provençal vegetable production systems.

A rapid and far-reaching change towards farming practices that contribute to the protection of the environment and the human health is needed. In many cases, these alternative practices exist but are not implemented due to interconnected barriers at the plot, farm, territory, value chain and/or global level. In my thesis, I developed a methodology taking into account the determinants of the farming practice choices at the different levels to support the change in farming practices. I applied this methodology to a specific case study: the management of soil-borne pests and diseases, mainly root-knot nematodes, in sheltered vegetable farming systems in Provence (France). The impact of root-knot nematodes on vegetable crops is significant both in Provence (40% of farms affected) and worldwide. Their management is essentially based on the use of non-selective nematicides that are damaging for the human health and the environment.

First, I carried out a sociotechnical analysis showing that most of the Provençal agri-food system was locked around the use of "radical soil disinfection" techniques, thus excluding the implementation of alternative agroecological techniques. This lock-in arose from interconnected barriers to the change in practices, involving a diversity of stakeholders at the Provençal level and beyond it: farmers, upstream and downstream of the sector (including consumers), R&D and public policy actors. Following this analysis, I studied existing coupled innovations that foster the implementation of agroecological crop protection in French vegetable systems. This "tracking of innovations" led us to identify 5 types of coupled innovations, and for each of them, the combinations of sociotechnical levers mobilized and the way they were implemented. Meanwhile, I developed a serious game enabling the effective sharing of the sociotechnical analysis results to the stakeholders of the studied problem. This serious game also enabled to facilitate stakeholders' knowledge management and creativity and the collaboration between them, for initiating the design of innovative solutions tailored for the problem under study. Finally, I mobilized the previous works (analysis, tracking, serious game) in 4 co-design workshops conducted with the stakeholders. I created and implemented several methods in these workshops to design increasingly elaborate solutions that favor change in practices. As a result, we collectively designed 50 coupled innovations including 41 coupled innovations, thus opening up the space of possible solutions. We evaluated part of the complex coupled innovations.

In the discussion, I point out the promising avenues of action and research to facilitate the implementation of agroecological practices for the management of soil-borne pests and diseases in Provençal sheltered vegetable farming systems. I discuss the possible evolution of the methodology I developed during this thesis, in order to improve its efficiency and complete the design process. I make proposals to specify the conditions of the implementation of the innovations designed, evaluate them and anchor them in the territorial agri-food system. Finally, I show that this work contributes to establishing theoretical and methodological bases to multi-level redesign of agricultural systems for accompanying changes in farming practices.

Parts A "Problem" and C "Discussion" of my thesis are written in French. Part B consists of three articles and one chapter of the thesis written in English.

Avant-propos

Cette thèse a été financée par l'ADEME et le département INRA SAD aujourd'hui INRAE ACT, avec le soutien également de l'ITAB et de l'UMT SI BIO pour l'encadrement. Elle fut réalisée au sein de l'unité Ecodéveloppement de l'INRAE d'Avignon (département ACT). Elle fut dirigée par Mireille Navarette (INRAE Ecodéveloppement) et co-encadrée avec Marion Casagrande (ITAB, INRAE).

J'ai choisi de réaliser cette thèse car elle se tient au croisement de mon engagement pour le développement durable et ma passion pour l'analyse des systèmes complexes, naturels et humains. Thierry Doré dans sa série de présentation sur l'Agroécologie à Louvain La Neuve (Belgique) m'a apporté un élément qui a joué un rôle clé dans ma décision de réaliser cette thèse: nous savons qu'il nous faut des professionnels qui facilitent la coordination entre les acteurs du système agri-alimentaire pour faciliter la transition agroécologique. Cependant les questions du « Qui ? » et « Comment ? » restent à explorer.

Liste des productions scientifiques

Articles publiés

Boulestreau Y, Casagrande M, Navarrete M (*accepté avec modifications*) Analyzing barriers and levers for change towards agroecological practices: a new framework applied to vegetables' soil pest management. Agron Sustain Dev

Articles en cours de préparation

Boulestreau Y, Casagrande M, Peyras C-L, Navarrete M (*soumission prévue pour Janvier*). Tracking coupled innovations to foster agroecological transition. The case of agroecological crop protection in French vegetable production systems. Agric Syst (**Chapitre 2**)

Boulestreau Y, Casagrande M, Navarrete M (*en préparation*). Using a serious game to support the codesign of coupled innovations for agroecological transition. (**Chapitre 3**)

Chapitre d'ouvrage en cours de préparation

Dernat S, Ferrand N, Angeon V, **Boulestreau Y**, Dureau R, Michelin Y (*en préparation*). Approches déontologiques et théoriques. In: Michelin Y, Dernat S (eds) Conception de jeux de plateaux pour l'agriculture et le paysage. Springer

Actes de conférence

Boulestreau Y, Casagrande M, Navarrete M (2019). Co-designing crop diversification strategies from plot to sociotechnical system to manage root-knot nematodes in Mediterranean market gardening systems. <https://zenodo.org/record/3784275#.XrP6WJ4zap0>. Accessed 7 May 2020

Boulestreau Y, Casagrande M, Navarrete M, (*acceptée, présentation à venir*). Sociotechnical lock-in hinders transition to agroecological management of soil health in Provençal market gardening systems. In: 14th European IFSA Symposium. Evora, Portugal.

Présentation ou Posters dans des conférences

Boulestreau Y, Casagrande M, Navarrete M (2018). Coconception multi-échelle pour une gestion agroécologique des bioagresseurs du sol en maraîchage provençal sous abris. In: Les Rencontres du Végétal 10^{ième} édition, Angers, France. **Présentation**.

Boulestreau Y, Casagrande M, Navarrete M (2018). Explorer des leviers originaux à l'échelle du système sociotechnique pour une meilleure gestion des bioagresseurs telluriques In: Journée d'échanges Traques aux innovations, Paris, France. **Poster**.

Boulestreau Y, Casagrande M, Navarrete M (2019). Quand les professionnels du maraîchage construisent des stratégies de gestion agroécologique des ravageurs ... en jouant ! In: Jeux et Enjeux, Marseille, France. **Poster**.

Autres communications

J'ai présenté ma thèse à plusieurs évènements de vulgarisation scientifique :

- Présentation de ma thèse en 120s (Angers, 2018), vidéo accessible avec le lien suivant : https://www.youtube.com/watch?v=4QQc4Y9r5Ac&feature=youtu.be&ab_channel=YannBoulestreau
- Festival des Sciences (Avignon,) : présentation de la gestion d'une rotation en maraîchage et des problèmes que cela pose de la parcelle au territoire.
- Festival Pint of Science Avignon (2019). Présentation des problématiques d'accompagnement au changement de pratiques en maraîchage sous abris Provençale. Vidéo accessible au : https://www.youtube.com/watch?v=tA7F99xUrq8&t=29s&ab_channel=Dezertyfr

Animation d'un atelier participatif prévu au *Organic World Congress 2021* sur la base du jeu sérieux *Soilh&co* (Chapitre 3). Atelier intitulé: "A serious-game to foster transition to sustainable food systems regarding soil health management based on a Provençal market gardening case study"

Activités d'encadrement

J'ai co-encadré Claire-Lise Peyras pour son stage de fin de M2 (SupAgro Montpellier) intitulé « Analyse des innovations organisationnelles permettant la gestion des bioagresseurs des légumes à l'échelle des territoires » de Mars à Septembre 2019. Le chapitre 2 est basé sur les données qu'elle a récoltées au cours de son stage.

Activités d'enseignement

J'ai réalisé deux intervention (7h en total) pour la License Pro *Transition Agro-écologique (TAET)* de l'Université d'Avignon, sur la base du jeu sérieux conçu (Chapitre 3)

Remerciements

Cette thèse fut un exercice **éminemment collectif** ! Je remercie donc tous.tes ceux et celles qui y ont contribué.

Je vous prie de me pardonner pour l'usage récurrent du « je » dans le corps de cette thèse. Apparemment, il est nécessaire pour montrer aux lecteurs extérieurs que j'assume ce que j'écris, ce qui est bien le cas. Cependant il ne doit rien enlever au fait que ces pages se sont construites avec la collaboration, la participation et le soutien de nombreuses personnes, à qui je dis donc ...

un grand MERCI !!!

Merci d'abord à mes deux encadrantes Mireille et Marion. Quand je cherchais des éléments pour savoir si cette thèse pourrait se réaliser dans un environnement favorable sur le plan humain et scientifique, Thierry Doré m'a loué les qualités de ses deux anciennes étudiantes, en insistant sur ce fait : « elles ne te laisseront pas tomber ». Et il avait raison. Vous m'avez toutes deux accompagné tout au long de cette aventure, malgré les turbulences que vous pouviez traverser, qui, en particulier pour Marion, ont été parfois violentes. Vous avez gardé cette même exigence et cette même envie de me faire avancer et progresser. Pour tout cela, merci !

Merci ensuite à tous les acteurs du maraîchage provençal qui ont donné de leur temps bénévolement dans les ateliers ou enquêtes. J'espère de tout mon cœur qu'il vous sera utile en retour. J'espère qu'il aidera en effet ce beau terroir Provençal et ses acteurs à avancer vers plus de durabilité, quitte à bousculer un peu cette fameuse « mentalité Provençale » qui a ses bons côtés, mais qui doit réussir à dépasser ses mauvais pour avancer. Un merci tout particulier à Laurent Camoin et Eléonore Bouvier, qui m'ont accompagné pour une grande partie de ce travail. J'espère que vos idées infuseront au sein de vos organisations respectives pour que vous puissiez continuer à avancer sur les sujets que nous avons traités ensemble. Enfin, merci à l'équipe de GONEM, en particulier Hélène, Claire et Caroline, qui m'ont permis de me former rapidement aux enjeux et leviers techniques de gestion des nématodes à galles. À tous, merci !

Merci à la team Ecodev' : Arnaud, Guillaume, Stéphane, Marc, Rodolphe, Aurélie, Diassé, Esther, Natacha, Martine, Romain, Salah, Ghislain, Sabine, les codocotorants (râlez pas, vous avez un paragraphe pour vous ;)), et ceux que j'oublie ! Ce fut un plaisir de partager avec vous ces moments et idées lors des repas, aux pots, pendant les réunions, etc. J'aurais aimé le faire bien plus. Merci à vous tous !

Merci encore aux amis Avignonnais ! En particulier aux compagnons de thèse: Marti, Louitos, Raphou, Coco, Rico, Max, Claire, Camille, Johanna, Sara, Kathleen, mais aussi aux autres membres du flamboyant « groupe poubelle » : Laura, Johnny, Jeanette, Andréa, Claire, et je n'oublie pas les autres : Julien, Mélanie, Anna, Caroline, Arthur, Karine, Camille, Olivia, Annaëlle, Didier et tous ceux qui ne me viennent pas en tête maintenant, mais que j'ai toujours plaisir à retrouver, à l'Explo, en rando, à une crémaillère, une fête de départ ou de la trentaine. Vous avez fait de cette période de ma vie, un moment riche et épanouissant, plein de découvertes culturelles, de bonnes bouffes, de beaux paysages et surtout de personnes avec une profonde humanité. Une mention spéciale à Marti, ma sœur de thèse, avec qui j'ai

partagé de longues heures dans notre grand bureau ombragé¹, le même rythme et contrat de thèse, avec son lot de galères, de rigolades et de soutiens réciproques ! Une autre à Louitos, avec qui j'ai partagé un superbe appart' (n'est-ce pas ?), de nombreux et riches débats, et avec qui je partage une certaine communauté d'esprit. Une mention pour Raphou, qui m'a très vite ramené dans ce fameux « réseau Avignonnais », et avec qui j'ai bien failli rester bloqué en Hongrie ... c'est pas passé loin ahahah. Et enfin pour Coline et sa générosité, je ne compte plus tes coups de main ! Merci !!!

Merci à ma famille, sans qui je n'en serais pas là aujourd'hui. Vous m'avez transmis une grande exigence pour la qualité de travail et un amour pour la nature, les animaux et les plantes. Vous m'avez aussi soutenu dans les moments difficiles de ma vie. Merci à vous !

Merci aux membres de mon COPIL : Jean-Marc Meynard, Elsa Berthet, Mathieu Conseil, Jean-François Vian, Antoine Pierart, pour les riches échanges que nous avons eus, et pour les contributions que vous avez apporté à mon travail. Merci à tous mes relecteurs extra-encadrement: Imke, Louis, Maman, Simon, Liz, Nonta, Jean-Marc. Merci à mon jury de thèse, pour avoir accepté de lire, évaluer et débattre sur cette dernière. Merci au réseau IDEAS, qui fait un travail passionnant et m'a bien aidé à avancer ! Et merci à tous ceux que je n'ai pu noter ici. Si vous vous sentez concerné par ces remerciements, c'est sûrement qu'il y a une bonne raison !! ☺

Enfin, un merci spécial à Imke Harms, au soutien que tu m'as apporté, par ton amour, ta présence à mes côtés, de m'avoir permis de commencer et aider à finir ce projet exigeant, qui me tenait à cœur. Et maintenant, en route pour de nouvelles aventures...

¹ Il faut toujours qu'on le décore d'ailleurs ! ^_^

Liste des acronymes

Français

ADEME : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie

BT : Bioagresseur Tellurique

NàG : Nématode à galles

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique

INRAE : Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement.

SATS : Système Agri-alimentaire Territorial et Sectoriel

English

RKN : Root-Knot Nematodes

STAFS : Sectorial and Territorial AgriFood System

TABLE DES MATIÈRES

Partie A. Problématique.....	22
Introduction générale	23
Problématique et contexte	26
1. Le changement de pratiques, un problème agronomique complexe multi-échelle et multi-acteur	26
1.1. Des déterminants des pratiques de la parcelle au paysage sociotechnique dépendant des acteurs du système agri-alimentaire	27
1.1.1. À l'échelle parcellaire.....	27
1.1.2. À l'échelle de l'exploitation	28
1.1.3. À l'échelle du territoire et du système agri-alimentaire territorial.....	29
1.2. Les changements de pratiques : un processus sociotechnique dynamique.....	31
1.2.1. L'étude du changement de pratiques vue par l'agronomie et les sciences sociales	31
1.2.2. L'utilisation de la théorie des transitions pour penser le changement de pratiques.....	32
1.3. Vers un cadre opérationnel pour l'analyse du changement de pratiques comme un problème agronomique complexe.....	35
2. Accompagner le changement de pratiques vers l'agroécologie : un processus de conception multi-échelle de solutions innovantes	37
2.1. L'accompagnement du changement de pratiques, un problème de conception .	37
2.2. Apports et limites des approches de conception existantes pour l'accompagnement du changement de pratiques	39
2.3. La conception d'innovations couplées pour résoudre un problème complexe	40
3. Apports des théories et outils existants pour la conception multi-échelle de solutions	43
3.1. Le cadre de la conception innovante : la théorie C-K et la démarche KCP pour aider les acteurs à concevoir des innovations en rupture	43
3.2. La traque aux innovations pour nourrir l'activité de conception avec des connaissances originales	46

3.3. Les objets intermédiaires et objets frontières pour faciliter la collaboration dans des ateliers multi-acteurs.....	47
3.4. Le jeu sérieux, un outil de partage de connaissances et d'exploration de l'inconnu	48
3.5. Les méthodes d'évaluation d'innovations couplées et leurs limites	49
4. Présentation du cas d'étude	50
4.1. Les bioagresseurs telluriques, un problème d'importance en maraîchage sous abris provençal	51
4.2. Systèmes de production maraîchers provençaux et modes de gestion des NàG .	53
4.3. Le système agri-alimentaire maraîcher provençal.....	58
5. Positionnement de la thèse	61
5.1. Analyse sociotechnique multi-échelle des déterminants des pratiques pour initier la conception.....	61
5.2. Traque aux innovations multi-échelles pour collecter et mettre en forme des connaissances utiles à la conception	63
5.3. Opérationnalisation de l'analyse sociotechnique et de la traque aux innovations par un jeu sérieux pour initier la conception.....	64
5.4. Chapitre 4 : Co-conception multi-échelle de solutions pour faciliter le changement vers des pratiques agroécologiques de gestion des nématodes à galles	65
5.5. Plan et déroulé de la thèse	66
Partie B. Chapitres de résultat	69
Chapitre 1. Analyse sociotechnique des pratiques de gestion des nématodes à galles en entrant par leurs déterminants de la parcelle au paysage sociotechnique	70
1. Introduction.....	73
2. Materials and methods.....	75
2.1. A framework to analyze changes in farming practices	75
2.1.1. Determinants of farming practices	75
2.1.2. The sociotechnical processes underpinning practices change	80
2.2. Case-study	81
2.3. Methodology for sociotechnical analysis of change in farming practice	81
3. Results & Discussion	85

3.1. Two competing soil health management technologies in the Provençal sheltered vegetable sector	85
3.2. Barriers, resources and stakeholders of practices change towards agroecological management of soil health	88
3.2.1. Field level	88
3.2.2. Farm level.....	89
3.2.3. Sectoral and territorial agrifood system level	90
3.2.4. Sociotechnical landscape level	93
3.3. From lock-in to levers for driving the sociotechnical transition towards agroecology.....	95
3.4. Contributions to sociotechnical analysis of practices change	98
4. Conclusion	99
5. Compléments	101

Chapitre 2. Traquer des innovations couplées pour produire des connaissances décalées remobilisables en conception. 102

1. Introduction.....	104
2. Material and methods	105
2.1. Data collection.....	105
2.2. Data analysis.....	112
3. Results.....	114
3.1. Brief overview of the 40 case studies	115
3.2. Levers to overcome barriers to change in farming practices	115
3.3. Characterization of five clusters of coupled innovations	117
3.3.1. Cluster 1: Co-development of knowledge infrastructure partly coupled with input production and provision to foster the implementation of agroecological practices120	
3.3.2. Cluster 2: Facilitation of peer exchange among farmers around agroecological farming practices.....	123
3.3.3. Cluster 3: (Re)structuring of the food value chain to support the implementation of agroecological farming practices	124
3.3.4. Cluster 4: Pooling of material and cognitive resources by farmers to foster the implementation of agroecological practices.....	125
3.3.5. Cluster 5: Renting or exchanging fields to diversify crop rotation	126

4. Discussion	128
4.1. Tracking of coupled innovations for sustainable agrifood systems.....	128
4.2. High potential for coupled innovation co-design process and innovation niche management for the sustainability transition of agrifood systems.....	130
5. Conclusion	132
6. Compléments	133

Chapitre 3. Utiliser un jeu sérieux pour la coconception d'innovations couplées 134

1. Introduction.....	136
2. Materials and methods.....	138
2.1. <i>Soilh&co</i> , a serious game built to support coupled innovation design	138
2.1.1. <i>Soilh&co</i> : a simulation of root-knot nematode management in the Provençal sector of sheltered vegetable production	139
2.1.2. <i>Soilh&co</i> : a game designed to provide an experience of the lock-in around drastic soil disinfection	142
2.1.3. <i>Soilh&co</i> : a game designed to foster knowledge management, creativity and collaboration.....	148
2.2. Using the game <i>Soilh&co</i> in a multi-actor workshop.....	149
2.3. Data collection and analysis	150
3. Results.....	152
3.1. Sharing results of the sociotechnical analysis.....	152
3.2. Knowledge management	154
3.3. Creativity	157
3.4. Collaboration and immersion.....	159
4. Discussion.....	160
4.1. Strengths and limits of <i>Soilh&Co</i> to share sociotechnical analysis and foster the design of coupled innovations	160
4.1.1. Sharing the result of the analysis of a complex system and supporting knowledge management.....	161
4.1.2. Supporting creativity and ideation	162
4.1.3. Supporting collaboration and immersion	163
4.2. Specific features of <i>Soil&Co</i> to support the design of coupled innovations, compared to existing agricultural serious games	164

4.3. Generality potential and limits of <i>Soilh&co</i>	166
5. Conclusion	167
Chapitre 4. Coconception multi-échelle de solutions innovantes pour une gestion agroécologique des nématodes à galles en maraîchage provençal	168
1. Introduction.....	170
2. Material and methods	171
2.1. Global design process.....	172
2.1.1. Step 1: farm-centered exploration with two workshops	176
2.1.2. Step 2: STAFS-centered exploration with one workshop	179
2.1.3. Step 3: thematic workshop of coupled innovation design	181
2.2. Data collection.....	185
2.3. Data analyzes.....	185
2.3.1. Comprehensive analysis and typology of solutions.....	185
2.3.2. C-K analysis	185
2.3.3. Evaluation criteria from stakeholders	186
3. Results.....	186
3.1. Step 1: farmers' empowerment and first exploration of concepts with a focus on the farm level	186
3.1.1. Knowledge exchange on techniques, barriers and levers	187
3.1.2. Designed solutions	187
3.1.3. Concepts and knowledge spaces exploration.....	193
3.2. Step 2: codesigning of solutions based on the serious game experience with a focus on the STAFS level	194
3.2.1. Designed solutions.....	194
3.2.2. The exploration of concepts and knowledge spaces.....	202
3.2.3. Towards complex coupled innovation to unlock agroecological RKN management.....	202
3.3. Step 3: designing complex coupled innovations based on priority themes to unlock agroecological RKN management	205
3.3.1. Evaluation of the coupled innovations	206
3.3.2. Complex coupled innovation for poor or non RKN-host crop introduction.	206

3.3.3.	Complex coupled innovation for high-quality amendment spreading	208
3.3.4.	Complex coupled innovation to tackle the whole complex problem.....	210
3.4.	Workshops' evaluation by observers and participants.....	213
4.	Discussion	214
4.1.	Agronomic discussion of the solutions designed for agroecological management of RKN.....	214
4.2.	Discussion of the approach	220
Partie C -Discussion générale		225
Discussion générale		226
1.	Résultats principaux de la thèse.....	226
2.	Contributions à la gestion durable des bioagresseurs telluriques en maraîchage sous abris provençal	227
2.1.	Évolution des pratiques de gestion des BT en maraîchage sous abris entre 2017 et 2020	228
2.2.	Contributions au niveau du système de culture sous abris	228
2.3.	Contributions au niveau de l'exploitation maraîchère	229
2.4.	Contributions au niveau du système agri-alimentaire maraîcher provençal	230
2.4.1.	Favoriser la coopération dans le secteur maraîcher	230
2.4.2.	Des leviers inter-agriculteurs	230
2.4.3.	Des leviers impliquant agriculteurs et metteurs en marché	231
2.4.4.	Des leviers impliquant agriculteurs et fournisseurs d'intrants.....	231
2.4.5.	Des leviers impliquant l'ensemble des parties prenantes.....	232
2.4.6.	Rôle de la R&D publique	232
2.4.7.	Rôle des politiques publiques	232
3.	La reconception multi-échelle de systèmes agricoles pour accompagner le changement de pratiques : apports méthodologiques	233
3.1.	Articulation des dispositifs	233
3.1.1.	Apports de l'articulation des dispositifs	233
3.1.2.	Limites de l'articulation des dispositifs.....	235
3.2.	Dimension participative	238
3.2.1.	Apports.....	238
3.2.2.	Limites.....	239

3.3.	L'évaluation des solutions multi-échelles	240
3.4.	La génération de concepts et puis ?.....	241
3.5.	Et si c'était à refaire ? Proposition d'une démarche de coconception multi-échelle de solutions pour faciliter le changement de pratiques	242
4.	Apports théoriques à l'agronomie système.....	244
4.1.	Apports pour l'analyse des pratiques et leur évolution comme un problème agricole complexe	245
4.2.	Apports pour l'étude d'innovations à l'échelle du SAT permettant de dépasser les freins au changement de pratiques	246
4.3.	Apports pour l'accompagnement du changement de pratiques par la coconception.....	247
References.....		249
Annexes.....		268

Liste des Figures

Figure 1 - Imbrication des échelles spatiales et systémiques influençant le changement de pratiques.....	27
Figure 2 - Interactions entre les trois niveaux de la perspective multi-niveau menant à une transition sociotechnique	33
Figure 3 - a. Hétérogénéité des calibres de salade sur une parcelle infestée par des NàG	52
Figure 4 – a. Cycle de développement d'un nématode à galles <i>Meloïdogyne</i> spp.	53
Figure 5 - Systèmes de culture type en maraîchage conventionnel sous abris (C1 et C2) et bios (B1 et B2) sur 4 années (GONEM).	55
Figure 6 - Bassin maraîcher provençal produisant essentiellement sous abris autour d'Avignon	59
Figure 7 - Plan de thèse et articulation entre les différents chapitres	67
Figure 8 - Calendrier de thèse	68
Figure 9 - Place du chapitre 1 (encadré en rouge) dans le dispositif général de la thèse	71
Figure 10 – a. Lettuce sheltered crops infected by RKN	74
Figure 11 - Analytical framework of the determinants of farming practice.....	77
Figure 12 - RKN management techniques and technologies.....	87
Figure 13 – Sociotechnical analysis of change in RKN management practices within Provençal sheltered vegetable production systems	94
Figure 14 – Place du chapitre 2 (encadré en rouge) dans le dispositif général de la thèse	103
Figure 15 – Distribution and grouping of the 40 coupled innovations according to the levers used	119
Figure 16 - Ideotypes of coupled innovations to enable change in farming practices, towards agroecological practices	122
Figure 17 - Place du chapitre 3 (encadré en rouge) dans le dispositif général de la thèse	135
Figure 18 - Spatial configuration of the game and representation of the different levels whose determinants influence farming practices in the game	140
Figure 19 – Cards representing crops and techniques	141
Figure 20 - Farmer board with all the elements affecting RKN management.....	142
Figure 21 - Board of Regional market platform at the end of the first year.....	153
Figure 22 - Place du chapitre 4 (encadré en rouge) dans le dispositif général de la thèse	169
Figure 23 – Terminology of multi-level design of solutions.....	172
Figure 24- a. Co-design process based on three steps (four workshops) built on the former sociotechnical analysis, innovation tracking (for all workshops) and the serious game (for workshop 2).....	174
Figure 25- Intermediary objects configuration of workshops 1a and 1b	178

Figure 26 - Design board for solution design in step 2	180
Figure 27 - Two examples of solution cards	183
Figure 28 –Intermediary objects in step 3	184
Figure 29 - Step 3 multi-level complex coupled innovation on the introduction of poor or non RKN-host crops	208
Figure 30 - Step 3 multi-level complex coupled innovation on the spreading of high-quality amendment	210
Figure 31 – Workshop 3 multi-level complex coupled innovation on the integration of several practices to achieve agroecological RKN management	212
Figure 32 - Articulation entre les différents dispositifs de la thèse	235

Liste des Tables

Table 1 - Comparaison des démarches de conception de novo et pas-à-pas (Toffolini 2016) ..	38
Table 2 - Techniques de gestion des nématodes à galles.....	55
Table 3 – Detailed analytical framework of the multi-level determinants of farming practices.	78
Table 4 – Data sources for each analytical dimension and corresponding stakeholder groups .	84
Table 5 - Specific and generic levers for agroecological management of soil health	97
Table 6 - List of the 40 case studies of coupled innovations	108
Table 7 – Analytical framework of the way coupled innovations are implemented.....	110
Table 8 - Analytical framework of the farm-level and sectoral and territorial agrifood system-level determinants of farming practices	113
Table 9 – Sociotechnical levers mobilized by coupled innovations.....	117
Table 10 - Sociotechnical levers identified in this study could help overcoming barriers to change in practices characterized in literature	131
Table 11 – Representation of barriers to the change for agroecological RKN management in the serious game design.	145
Table 12 – Workshop participants, their group (organic or mixed) and their role in the game (OF=Open Field). The numbering corresponds to the global numbering for the whole Ph.D. manuscript (see Table 17, Chap. 4).	150
Table 13 - Analytical grid for assessing a serious game that aims to support the generation of coupled innovations	151
Table 14 - Analysis of Soilh&co ability to support Knowledge management.....	157
Table 15 - Analysis of Soilh&co ability to support creativity	159
Table 16 - Analysis of Soilh&co ability to support the collaboration and immersion	160
Table 17 - Workshop participants grouped by stakeholder categories for each step	175
Table 18 - Solutions and linked knowledge designed during workshop 1 by the diversified group	190
Table 19 –STAFS-level coupled innovations designed during Workshop 2	198
Table 20 – Field-level solutions designed during Workshop 2	201

Partie A.

Problématique

Introduction générale

L'agriculture est aujourd'hui face à un double défi : nourrir une population humaine mondiale en forte croissance et réduire les dommages causés à l'environnement. Ces dommages sont multiples et de grande ampleur, par exemple : chute vertigineuse de la biodiversité, eutrophisation, réchauffement climatique (Tilman and Clark 2015). Durant la première révolution verte (1960-1990), un modèle de production agricole dit « conventionnel » basé sur la spécialisation des productions et l'emploi massif d'intrants de synthèse a permis de fortes augmentations de rendement et contribué au doublement de la production alimentaire mondiale. L'emploi de pesticides pour la protection des cultures contre les ravageurs et les adventices fut un des piliers de cette révolution. Les réussites en terme de productivité ont fait passer sous silence le fait que ces pesticides sont responsables de dommages importants sur la santé humaine et l'environnement (ex : réduction de la biodiversité, pollution des eaux) (Tilman et al. 2002; Tilman and Clark 2015). Depuis les années 2000, les autorités françaises et européennes réduisent progressivement le nombre de molécules pesticides homologuées, tout en mettant en place des incitations à réduire leur usage (ex: en France, plan Ecophyto II -MAAF and MEDDE 2015) (Djian-Caporalino 2010). De leur côté, des acteurs de la grande distribution imposent l'interdiction de certains pesticides à travers des cahiers des charges de production contraignants (Lefèvre et al. 2020). L'agroécologie, comme application des concepts et principes de l'écologie à la conception et à la gestion de systèmes agri-alimentaires² durables (Gliessman 2007), propose un paradigme de production alternatif au paradigme « conventionnel » dont l'un des objectifs est le maintien du niveau de production tout en réduisant l'usage et les effets néfastes des pesticides. Ce paradigme se précise dans le concept de protection agroécologique des cultures (PAEC), dont la définition complète est donnée dans l'Encadré 1. La PAEC repose sur l'adoption d'une stratégie de mise en œuvre ordonnée de pratiques agroécologiques³, résultant d'une démarche systémique et participative, afin de favoriser le fonctionnement écologique des agroécosystèmes (Deguine et al. 2020). L'agriculture biologique propose un autre paradigme de production compatible avec le paradigme de l'agroécologie et visant à la protection de la santé globale⁴ (IFOAM n.d.), entre autres en interdisant totalement l'usage d'intrant.

Néanmoins, la recherche de l'accroissement des rendements et des économies d'échelles de la révolution verte a accru la dépendance aux pesticides pour maîtriser les bioagresseurs⁵ dans des systèmes spécialisés avec un faible nombre d'espèces et variétés à haut rendement et faible rusticité

² « un système alimentaire [aussi appelé système agri-alimentaire] rassemble tous les éléments (environnement, personnes, intrants, processus, infrastructures, institutions, etc.) et activités qui se rapportent à la production, la transformation, la distribution, la préparation et la consommation des aliments et aux résultats de ces activités, y compris les résultats socio-économiques et environnementaux » (HLPE (2014))

³ les pratiques agroécologiques sont définies comme « des pratiques agricoles visant à produire des quantités importantes de nourriture, qui valorisent au mieux les processus écologiques et les services écosystémiques en les intégrant comme éléments fondamentaux dans le développement des pratiques, et non en s'appuyant simplement sur des techniques ordinaires, telles que l'application d'engrais chimiques et de pesticides de synthèse ou des solutions technologiques, comme les organismes génétiquement modifiés » (Wezel et al., 2014)

⁴ « sol, plantes, animaux, humain et la planète comme une et indivisible » (IFOAM, n.d.)

⁵ maladies, ravageurs, adventices

(Lamine et al. 2011). Il en résulte encore aujourd'hui un verrouillage autour de systèmes intensifs et peu diversifiés, très sensibles aux bioagresseurs, verrouillage qui limite le développement et la diffusion de systèmes de production basés sur une protection agroécologique des cultures (Vanloqueren and Baret 2008; Lamine et al. 2011). Dépasser ce verrouillage demande d'innover, c'est-à-dire « *introduire une nouveauté dans une organisation économique et sociale* » (Faure et al. 2018). Ces innovations peuvent être techniques, organisationnelles et institutionnelles. Elles doivent avoir lieu au niveau des systèmes de culture voire des systèmes de production (e.g., rallonger et diversifier les rotations) (Wezel et al. 2009), demandant aux agriculteurs de changer de stratégie de production à l'échelle de l'exploitation (Aubry and Michel-Dounias 2006b). Elles doivent également être introduites à l'échelle du territoire, afin de lever les freins aux changements de pratiques tels que l'absence de filière structurée de commercialisation pour des cultures de diversification (Meynard et al. 2013; Magrini et al. 2016). Il se pose donc le problème suivant :

Comment accompagner le changement de pratiques vers une protection agroécologique des cultures dans les systèmes de culture et de production, tout en levant les freins à leur changement au niveau de la filière et du territoire ?

Mon travail de thèse, réalisé d'Octobre 2017 à Décembre 2020, vise à contribuer à répondre à cette question, en travaillant sur un cas d'étude précis : la gestion des bioagresseurs telluriques (i.e., du sol) dans la production maraîchère sous abris⁶ provençale. En effet dans une large partie de ce territoire, la désinfection chimique des sols est structurellement ancrée dans une production maraîchère spécialisée et intégrée dans des filières longues elles-mêmes spécialisées sur un faible nombre d'espèces cultivées. La réduction de la gamme des produits phytosanitaires de synthèse homologués et efficaces (Djian-Caporalino et al. 2009) s'est accompagnée d'une recrudescence des problèmes de santé des sols (ex : nématodes à galles - Djian-Caporalino 2010), en particulier dans les systèmes peu diversifiés et sous-abris conçus pour une commercialisation en circuit long. Les nématodes à galles (*Meloidogyne* spp.), par exemple, sont présents dans 40% des exploitations agricoles maraîchères de PACA, conduisant à d'importantes pertes de rendements (30%, pouvant aller jusqu'à 70% localement), forçant parfois les maraîchers touchés à changer de productions voire même à stopper l'exploitation de certaines parcelles (Djian-Caporalino 2010).

Des techniques alternatives agroécologiques ont été développées, telles que les engrais verts biofumigants, ou les cultures pièges. Mais l'efficacité d'une technique alternative n'est que partielle. Leur combinaison au sein de systèmes de culture innovants est donc nécessaire pour obtenir une efficacité satisfaisante. Sur cette base, plusieurs projets de reconception des systèmes de culture maraîchers sous abris ont été menés ces dernières années pour lutter efficacement contre ces bioagresseurs telluriques (BT) en réduisant l'emploi de pesticides (e.g., Sysbiotel⁷, Gedubat⁸,

⁶ Le terme abris renvoie à tout type de couverture des cultures, par des structures basses (ex : chenilles pour les fraises) et hautes (ex : tunnels plastiques, serres multi-chapelles en plastique et verre).

⁷ Gestion intégrée des bioagresseurs telluriques en systèmes de culture légumiers, projet ANR (2009-2012), <https://www.picleg.fr/Projets/Les-projets-acheves/Sysbiotel>

⁸ Innovations techniques et variétales pour une GEstion DUrable des BioAgresseurs Telluriques dans les systèmes maraîchers sous abris, projet Ecophyto (2012-2017), <https://www.picleg.fr/Projets/Les-projets-en-cours/Gedubat>

Gedunem⁹). Cependant leur développement à large échelle se confronte, entre autres, aux limites des ressources de l'exploitation agricole (e.g., manque de main d'œuvre, concurrence entre techniques alternatives et cultures commerciales pour l'occupation des parcelles) (Navarrete et al. 2016) ainsi qu'aux verrous liés à la commercialisation (Djian-Caporalino et al. 2009). La conception d'innovations à l'échelle de la parcelle et du système de culture n'est donc pas suffisante.

La **partie A** est consacrée à l'exposé de la problématique qui part de la question générale posée ci-dessus et s'appuie sur différents corpus de la littérature scientifique afin de la décliner en questions de recherche précises.

La **partie B** présente les résultats qui sont doubles : d'une part la démarche méthodologique employée et d'autre part les connaissances et innovations conçues pour faciliter le changement vers une gestion agroécologique des bioagresseurs du sol, et en particulier des nématodes à galles (NàG) en maraîchage sous abris.

La **partie C** sera celle de la discussion générale portant sur les apports théoriques et méthodologiques de cette thèse, à la fois sur le plan scientifique et opérationnel.

Encadré 1 - Définition de la Protection AgroEcologique des Cultures selon Deguine et al. (2020) (voir aussi Deguine et al. 2016)

La **Protection AgroEcologique des Cultures (PAEC)** est la déclinaison des principes de l'agroécologie à la protection des cultures. Elle repose sur un raisonnement des pratiques agricoles visant la durabilité des agroécosystèmes via la prise en compte de leur fonctionnement écologique.

Sur le principe, la PAEC vise à favoriser le fonctionnement écologique des agroécosystèmes, en optimisant directement ou indirectement les interactions entre les communautés vivantes (végétales, animales et microbiennes) aussi bien dans le sol qu'au-dessus du sol. La santé du sol et la biodiversité des agroécosystèmes sont les deux axes directeurs de la PAEC. Ils induisent un fonctionnement équilibré des peuplements cultivés et leur résilience vis-à-vis des stress biotiques et réduisent les risques et l'intensité des infestations, infections, pullulations, épidémies et invasions de bioagresseurs.

L'application de la PAEC sur le terrain implique l'adoption d'une stratégie de mise en œuvre ordonnée de pratiques agricoles, résultant d'une démarche systémique et participative, qui donne la priorité aux méthodes préventives pour assurer la gestion des populations de bioagresseurs (ravageurs, agents pathogènes et plantes adventices) et d'auxiliaires (prédateurs, parasitoïdes ou pathogènes de bioagresseurs, pollinisateurs, recycleurs de la matière organique). Les pratiques de la PAEC sont mises en œuvre de manière adaptée à chaque situation de production, selon une stratégie phytosanitaire générique, ordonnée, et immuable : respect des mesures réglementaires, priorité donnée aux mesures préventives non chimiques, observations in situ de la biocénose, mesures curatives si nécessaire, non chimiques de préférence.

⁹ Innovations techniques et variétales pour une GEstion DUrable et intégrée des NEMatodes à galles dans les systèmes maraîchers sous abris, projet INRA SMaCH (2012-2016), <https://www6.inra.fr/experimentations-systeme/Les-experimentations/Maraichage/GEDUNEM>

Problématique et contexte

Dans la partie suivante, je m'appuie sur la littérature scientifique existante pour montrer que le changement vers des pratiques agroécologiques dépend de multiples facteurs, de la parcelle au système agri-alimentaire et au-delà, impliquant une diversité de parties prenantes (1.). Je présente ensuite en quoi un processus de conception multi-échelle peut permettre d'accompagner efficacement le changement de pratiques aux multiples échelles concernées (2.). Puis, je montre ce que des théories et outils existants apportent au processus de conception d'innovations couplées (3.). Je poursuis en exposant le cas d'étude et sa pertinence vis-à-vis du problème traité (4.). Enfin, je conclus en présentant mes questions et ma démarche de recherche.

1. Le changement de pratiques, un problème agronomique complexe multi-échelle et multi-acteur

L'étude des pratiques agricoles est au cœur de l'agronomie moderne (Sebillotte and Papy 2010; Meynard 2014). En effet, ce sont les manières concrètes d'agir des agriculteurs dans le champ cultivé et plus largement au sein de l'exploitation qui déterminent les conséquences de l'activité agricole sur la production et l'environnement (ex : impact sur la biodiversité, la qualité du sol, la qualité de l'eau). Ainsi, étudier les pratiques permet de comprendre les mécanismes produisant les impacts observés (Meynard et al. 2001). Or les pratiques et leur évolution sont à la charnière entre deux mondes. Le premier est le monde biophysique qui à la fois conditionne les pratiques des agriculteurs, mais aussi que les agriculteurs transforment: le champ et son couvert végétal, le paysage cultivé. Le second est le monde socio-économique dans lequel le ou les agriculteur(s) est (sont) ancré(s) et qui influence lui aussi les pratiques : l'exploitation agricole et ses entités de gestion (ex : parcelle, sole), la filière, les interactions entre pairs, avec le conseil agricole, etc. (Belmin 2016). **Ainsi, pour accompagner le changement des pratiques agricoles vers des pratiques plus durables, il faut d'abord comprendre ces éléments qui déterminent les choix des pratiques (Meynard 2014).** Dans cette partie, je mobilise les travaux des agronomes système pour montrer que le changement de pratiques agricoles est un problème multi-échelle, multi-dimension et multi-acteur (1.1). Je montre ensuite que les changements de pratiques sont liés à l'évolution de ces déterminants, qui sont cadrés par des processus sociotechniques que la théorie des transitions nous permet de saisir (1.2). Je conclus enfin qu'un nouveau cadre conceptuel et analytique est nécessaire pour analyser l'évolution des pratiques agricoles en tant que problème complexe. Je spécifie les caractéristiques qu'il devrait avoir en prenant en compte explicitement les différentes échelles, acteurs et dimensions influençant le choix des pratiques et leurs interactions (1.3).

1.1. Des déterminants des pratiques de la parcelle au paysage sociotechnique dépendant des acteurs du système agri-alimentaire

Au sein de l'agronomie moderne, les agronomes système ont analysé comment les pratiques émergent d'interactions opérant au niveau de 3 échelles emboîtées : la parcelle (Sebillotte 1990b), l'exploitation agricole (Capillon 1993) et le territoire comme réseau d'acteurs (Le Bail 2012) ou comme paysage cultivé (Benoît et al. 2012) (Fig. 1). **On ne peut donc pas concevoir efficacement des innovations visant à modifier les pratiques agricoles sans étudier l'ensemble du système qui détermine leur choix, aux différentes échelles spatiales et organisationnelles (Le Bail 2008) et ainsi comprendre leur « logique » (Meynard 2014).** Ceci me conduit donc dans cette thèse à articuler les trois métiers des agronomes, selon M. Sebillotte (Sebillotte and Papy 2010) : l'agronome de la parcelle, l'agronome de l'agriculteur gestionnaire de son exploitation, et l'agronome du territoire.

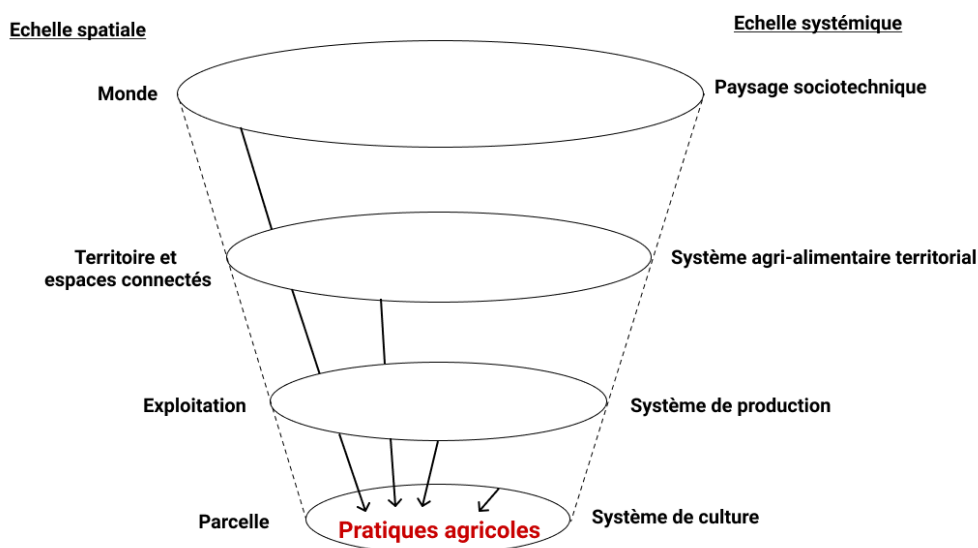


Figure 1 - Imbrication des échelles spatiales et systémiques influençant le changement de pratiques

1.1.1. À l'échelle parcellaire

Deux concepts fondent la base de l'agronomie de la parcelle cultivée : l'itinéraire technique¹⁰ (Sebillotte 1974) et le système de culture¹¹ (Sebillotte 1990a). Ces concepts permettent de décrire la façon dont les pratiques sont agencées entre elles en répondant à la « logique d'action » des agriculteurs (Sebillotte and Soler 1990), et donc d'analyser leurs effets sur le milieu cultivé, que ce soit

¹⁰ L'itinéraire technique est « une combinaison logique et ordonnée de techniques qui permettent de contrôler le milieu et d'en tirer une production donnée » Sebillotte (1974)

¹¹ Le système de culture est « l'ensemble des modalités techniques mises en œuvre sur des parcelles traitées de manière identique. Chaque système de culture se définit par la nature des cultures et leur ordre de succession, et par les itinéraires techniques appliqués à chacune de ces cultures » Sebillotte (1990a)

en termes environnemental ou de production (rendements, qualité), tout en tenant compte de l'interaction entre pratiques (Doré and Meynard 2006). **Ce qui m'intéresse ici principalement est comment cette « logique d'action » de l'agriculteur se construit, autrement dit, quels sont les déterminants de ses choix de pratiques agricoles, et ainsi de ses itinéraires techniques et systèmes de culture.**

Les déterminants parcellaires des pratiques agricoles se trouvent dans la relation entre pratiques agricoles, agriculteurs¹² et milieu cultivé, et plus précisément dans l'interaction entre facteurs biophysiques (le milieu cultivé), techniques (l'interaction entre pratiques), infrastructurels (ex : possibilité d'irriguer) et humains (la perception de la parcelle par le chef d'exploitation) (Doré et al. 2006; Meynard 2014). En effet, les choix des pratiques dépendent des conditions biologiques du milieu tel que la pression en bioagresseurs au sein de la parcelle (ex : nématodes phytoparasites) et d'auxiliaires de cultures (ex : vers de terre, mycorhizes). Ils dépendent également des conditions physiques (ex : texture et structure du sol, topographie, précipitations, rayonnement incident) et des conditions chimiques (ex: niveau de présence des nutriments dans le sol). Les pratiques interagissent fortement entre elles, au niveau de la parcelle par l'interaction entre cultures et au niveau d'une culture par l'interaction entre pratiques (Doré et al. 2006). La présence d'infrastructures est également clé car elle conditionne certaines pratiques comme l'irrigation (Aubry and Michel-Dounias 2006a). Enfin la perception par l'agriculteur de la parcelle peut être déterminante. Par exemple, une parcelle perçue comme « à haut potentiel » ou « sacrée » recevra un traitement différencié par rapport à une parcelle « à faible potentiel » et sans dimension sacrée.

L'étude des choix de pratiques à l'échelle parcellaire nous montre que l'agriculteur réalise ses choix en combinant ses objectifs, ses contraintes et ses ressources (Aubry and Michel-Dounias 2006a). Or ces trois facteurs dépendent d'éléments à l'échelle de l'exploitation.

1.1.2. À l'échelle de l'exploitation

L'agronomie de l'exploitation vise à comprendre comment les agriculteurs allouent leurs ressources au sein du système de production afin de produire des biens et des services (Brossier 1987). Ainsi les pratiques agricoles à l'échelle de l'exploitation sont déterminées par l'arbitrage entre les ressources productives disponibles (Brossier 1987; Aubry and Michel-Dounias 2006a; Duru and Therond 2014; Meynard 2014) : surface cultivée, main d'œuvre, capital, intrants, équipements, infrastructures (ex : bâtiments), auxiliaires de culture. La biodiversité (autre que les auxiliaires, ex : adventices de bord de champs) et les conditions physiques de l'exploitation (ex : micro-climats) influencent également le choix des pratiques à l'échelle de l'exploitation (Duru and Therond 2014). Enfin, d'autres travaux montrent que d'autres ressources matérielles de l'exploitation déterminent aussi le choix des pratiques : l'accès à des débouchés qui peut être matérialisé par un contrat, et l'accès à un réseau social qui peut venir en aide par un prêt de matériel ou l'apport de connaissances (Chantre and Cardona 2014; Mawois et al. 2019).

¹² Dans la suite de la thèse, le terme « agriculteur » ou « producteur » désigne un chef d'exploitation, alors que le terme « travailleur » ou « travailleur agricole » désignent un employé de l'agriculteur

Duru and Therond (2014) distinguent également les ressources cognitives des agriculteurs, qui influencent également les pratiques. Parmi ces ressources cognitives, je distingue les ressources cognitives stricto sensu des « règles cognitives » de l'agriculteur (Geels 2004). Les ressources cognitives stricto sensu sont les connaissances scientifiques et empiriques, savoir-faire et compétences, qui influent fortement le choix des pratiques qu'un chef d'exploitation va mettre en œuvre (Chantre and Cardona 2014; Mawois et al. 2019). Les règles cognitives d'un agriculteur font référence aux croyances, routines cognitives, éthiques personnelles, manière de voir la vie et conditionnent ses pratiques (Chantre and Cardona 2014; Mawois et al. 2019; Bouttes et al. 2020). Par exemple, une sensibilité à la protection de l'environnement peut amener un agriculteur à une écologisation de ses pratiques (Chantre and Cardona 2014). Les règles cognitives influencent donc fortement les objectifs des agriculteurs. Or leurs objectifs (ex : maximisation de la production, confort de travail) ainsi que leurs décisions stratégiques (ex : conversion au bio) cadrent également le choix des pratiques (Aubry and Michel-Dounias 2006a).

Il apparaît déjà évident que les déterminants interagissent entre eux à l'échelle de l'exploitation (ex : objectifs, décisions stratégiques, règles cognitives du chef d'exploitation). Mais les ressources à l'échelle de l'exploitation interagissent également à l'échelle du territoire, qui conditionne, par exemple, leur disponibilité.

1.1.3. À l'échelle du territoire et du système agri-alimentaire territorial

➤ Les déterminants des pratiques à l'échelle des territoires

Duru et al. (2015a) mettent en avant que les cadres d'analyse des systèmes agricoles à l'échelle de l'exploitation présentent deux limites principales pour traiter des questions de transition agroécologique : (i) les interactions entre les systèmes de production, le paysage et la gestion des ressources naturelles sont peu considérées et (ii) le système social considéré est la plupart du temps réduit à l'agriculteur et à ses conseillers directs. On retrouve ici les deux approches de l'agronomie des territoires : (i) le territoire comme un « paysage cultivé » où co-évoluent les pratiques agricoles, la structure du paysage (réseau de haies), et les ressources naturelles (eau, auxiliaires de culture) et (ii) le territoire comme un réseau d'acteurs qui influence les pratiques agricoles (Le Bail 2012). **Alors que la dimension paysagère dans la protection des cultures fait l'objet de nombreux travaux (ex : Steingröver et al. 2010; Della Rossa et al. 2020), peu d'agronomes ont étudié l'influence du système d'acteurs du territoire sur les pratiques agricoles. Or c'est cette dimension qui est primordiale pour la gestion des bioagresseurs telluriques (mon cas d'étude). Dans la suite de ma thèse je me concentrerai donc sur elle.**

Le réseau d'acteurs interagissant avec l'agriculteur au niveau du territoire influence ses pratiques de plusieurs manières (Aubry 2007; Le Bail 2012) :

- par la circulation des connaissances (Mawois et al. 2019), qui dépend de l'infrastructure de connaissances existantes (Schut et al. 2015a) (ex : réseau d'échange entre pairs), et des connaissances et savoir-faire de chacun (ex : conseiller, agriculteur, fournisseurs d'intrants) (Duru et al. 2015a)

- par la disponibilité en ressources matérielles à l'échelle du territoire (Duru et al. 2015a) (ex : disponibilité en intrants de la part des fournisseurs, en infrastructures de transport des marchandises)
- par les relations avec les acteurs de l'aval de la filière qui conditionnent par exemple la diversité des cultures par l'accessibilité des débouchés (Meynard et al. 2018; Mawois et al. 2019) et les calendriers de culture dans le cadre de la coordination d'un bassin d'approvisionnement (Navarrete et al. 2006; Navarrete and Le Bail 2007)
- par les relations avec les autres agriculteurs, comme la mutualisation de matériel qui facilite l'adoption de nouvelles pratiques comme le travail du sol réduit (Lucas 2019)
- par les règles formelles partagées (Geels 2004; Duru et al. 2015a) comme les standards de calibrage des fruits et légumes imposés par la réglementation européenne (Bernard de Raymond 2013), les cahiers des charges de production (ex : label agriculture biologique, chartes privées), les subventions conditionnées (ex : mesures agro-environnementales)
- par les règles cognitives partagées (définitions en 1.1.2), (ex : le souci de la protection de l'environnement - Chantre and Cardona 2014)
- par les règles normatives partagées (Geels 2004), telles que le partage de normes (ex : définition de ce qu'est une parcelle « propre », synonyme de parcelle sans adventices, quel que soit leur impact sur la culture, ce qui favorise l'utilisation d'herbicide)

On voit à partir de la liste des déterminants ci-dessus que les pratiques de l'agriculteur sont à l'intersection entre la dimension territoriale (ex : disponibilité en ressources matérielles, infrastructure de connaissance) et de la dimension filière (ex : relation avec les acteurs de l'aval) (Della Rossa 2020).

➤ De l'échelle territoriale à l'échelle du système agri-alimentaire territorial et sectoriel

La dimension filière dépasse les limites du territoire. Dans les systèmes agricoles modernes, une grande partie des intrants agricoles ne sont pas issus du territoire dans lequel ils sont produits (ex : engrais, semences). De même, une grande partie de la production agricole n'est pas consommée au sein même de son territoire de production. Il en est de même pour l'influence des politiques publiques qui peut aller de l'échelle locale à l'échelle internationale. **Ce constat m'amène à préférer le concept de système agri-alimentaire territorial (SAT) qui permet de prendre en compte à la fois les déterminants des acteurs du territoire et ceux extraterritoriaux de la filière (Lamine 2012).** Le SAT est défini comme suit : « À l'échelle territoriale, les différents niveaux du système sociotechnique¹³ peuvent être appréhendés concrètement, même si ce système n'est évidemment pas clos sur un territoire. Nous parlerons donc de système agri-alimentaire territorial, englobant non seulement les acteurs locaux des filières de production, de transformation, de distribution, mais aussi le conseil technique, les politiques publiques territoriales ou territorialisées, les consommateurs et la société civile. On peut dire que ce système englobe également, de fait, les différents dispositifs et réseaux mettant en relation production, commercialisation et consommation (qu'il s'agisse de circuits courts ou longs), ces deux définitions facilitant de fait le repérage des acteurs » (Lamine 2012). Le SAT inclut

¹³ Notons ici l'usage de cette notion de système sociotechnique que l'on peut simplement définir ici comme un système structuré autour d'une technologie où interagissent acteurs, règles et artefacts (Geels, 2002, 2004). Nous développons cette notion dans la partie suivante (1.2.)

ainsi le système d'innovation agricole¹⁴, une composante essentielle qui impacte fortement les pratiques agricoles et leur évolution (Hall et al. 2003; Pyburn and Woodhill 2014).

En conclusion, les pratiques sont déterminées par de multiples facteurs de la parcelle au SAT, dont il faudra tenir compte dans une perspective d'accompagnement au changement de pratiques de protection des cultures. L'analyse de l'influence du SAT sur les pratiques existe en sociologie, mais peu en agronomie, où les démarches sont encore à développer.

1.2. Les changements de pratiques : un processus sociotechnique dynamique

Dans cette section, je montre que les déterminants des pratiques multi-échelles précédemment décrits évoluent au cours du temps et que leur dynamique influence ainsi le changement de pratiques (1.2.1). Je montre aussi que l'évolution de ces déterminants est cadrée par des processus sociotechniques décrits par la théorie des transitions (1.2.2) et qui impliquent l'influence d'une échelle globale, supra-territoriale.

1.2.1. L'étude du changement de pratiques vue par l'agronomie et les sciences sociales

Des travaux d'agronomie (ex : Catalogna 2018; Mawois et al. 2019) ou interdisciplinaires agronomie-sciences sociales (ex : Chantre and Cardona 2014) étudient les trajectoires de changement de pratiques des agriculteurs vers des pratiques plus durables et leurs interactions avec les déterminants des pratiques explicités dans la partie précédente. Ils montrent ainsi que c'est la combinaison des déterminants qui permet d'induire un changement durable. Par exemple Chantre and Cardona (2014) et Mawois et al. (2019) soulignent ainsi que l'évolution de la situation réglementaire et/ou économique génèrent souvent un premier changement, mais n'est pas nécessairement suffisant pour le maintenir dans le temps. Les agriculteurs qui réalisent un changement par opportunisme économique ont tendance à ne pas le maintenir. En revanche le changement durable des pratiques s'installe lorsqu'il se combine avec d'autres facteurs comme l'ouverture d'un débouché stable dans le temps, l'acquisition de connaissances sur l'impact positif de la pratique à l'échelle de la rotation (ex : effet précédent). L'acquisition d'une bonne maîtrise technique est essentielle pour stabiliser l'adoption d'une nouvelle pratique et passe souvent par l'expérimentation sur l'exploitation (Catalogna 2018; Mawois et al. 2019). Elle peut être accélérée par la participation à des réseaux d'échanges entre pairs.

Chantre and Cardona (2014), Mawois et al. (2019) et Catalogna (2018) mettent en avant le fait que les changements de pratiques sont des processus longs, prenant plusieurs années et passant par des

¹⁴ Pyburn and Woodhill (2014) se réfèrent à la définition opérationnelle de la FAO des systèmes d'innovations agricoles : *“un réseau de personnes, d'organisations et d'entreprises dont l'objectif est de mettre en place de nouveaux produits, processus et formes d'organisation à usage social et économique, ainsi que les institutions et les politiques qui influent sur leur comportement et leurs performances, afin de parvenir à la sécurité alimentaire et nutritionnelle, au développement économique et à la gestion durable des ressources naturelles”*

adaptations pas à pas, plutôt que l'adoption directe de systèmes de culture radicalement nouveaux conçus par la R&D. Rares sont les changements radicaux « du jour au lendemain » et la robustesse de tels changements est questionnée (Chantre and Cardona 2014).

En conclusion, un ensemble de facteurs combinés tend à déterminer les changements de pratiques. Les connaissances et compétences y jouent un rôle clé. Pour accompagner le changement de pratiques, il faudra donc tenir compte du fait que c'est un processus généralement long et pas-à-pas. La théorie des transitions (Geels 2002, 2004) donne des éléments clés pour saisir les processus sous-jacents aux changements de pratique, en le replaçant au cœur de systèmes sociotechniques.

1.2.2. L'utilisation de la théorie des transitions pour penser le changement de pratiques

➤ **Le changement de pratiques à l'échelle d'un territoire : une évolution du système sociotechnique**

Un système sociotechnique est composé d'un collectif de parties prenantes, leurs réseaux, leurs pratiques, leurs connaissances, les techniques qu'elles utilisent, leurs représentations collectives, les standards et règles qu'elles adoptent (Rip and Kemp 1998). Le SAT (définition section 1.1.3) est donc un système sociotechnique centré sur l'agriculture et l'alimentation (Lamine 2012).

Geels (2002 ; 2004) propose un cadre conceptuel et analytique pour étudier l'évolution des technologies au sein des systèmes sociotechniques : la perspective multi-niveau (« multi-level perspective », MLP). Initialement utilisée pour étudier des transitions passées (ex : passage du bateau à voile au bateau à vapeur, Geels 2002), elle est depuis souvent employée pour décrire le changement de l'état actuel d'un système sociotechnique vers un état désiré, plus durable (ex : mobilité durable - Kemp and Rotmans 2004; pour des revues : Elzen et al. 2004; Geels 2011). Ce cadre analyse le système sociotechnique comme un ensemble de trois niveaux (Fig. 2) :

- Au centre : les régimes sociotechniques sont des configurations relativement stables associant des institutions, des techniques et des artefacts, ainsi que des règles, des pratiques et des réseaux d'acteurs. Ces artefacts et règles partagés structurent les relations entre acteurs et déterminent le choix des technologies.
- Au-dessus : le paysage sociotechnique désigne l'ensemble des facteurs externes aux régimes qui « cadrent » les interactions entre acteurs : valeurs culturelles, institutions politiques, problèmes environnementaux.
- Au-dessous : les niches technologiques sont des espaces protégés de la pression de sélection du régime sociotechnique qui agissent comme pépinière pour des innovations radicales. Ces niches sont aussi caractérisées par un réseau d'acteurs et d'organisations en interaction. Cependant ce réseau est peu structuré.

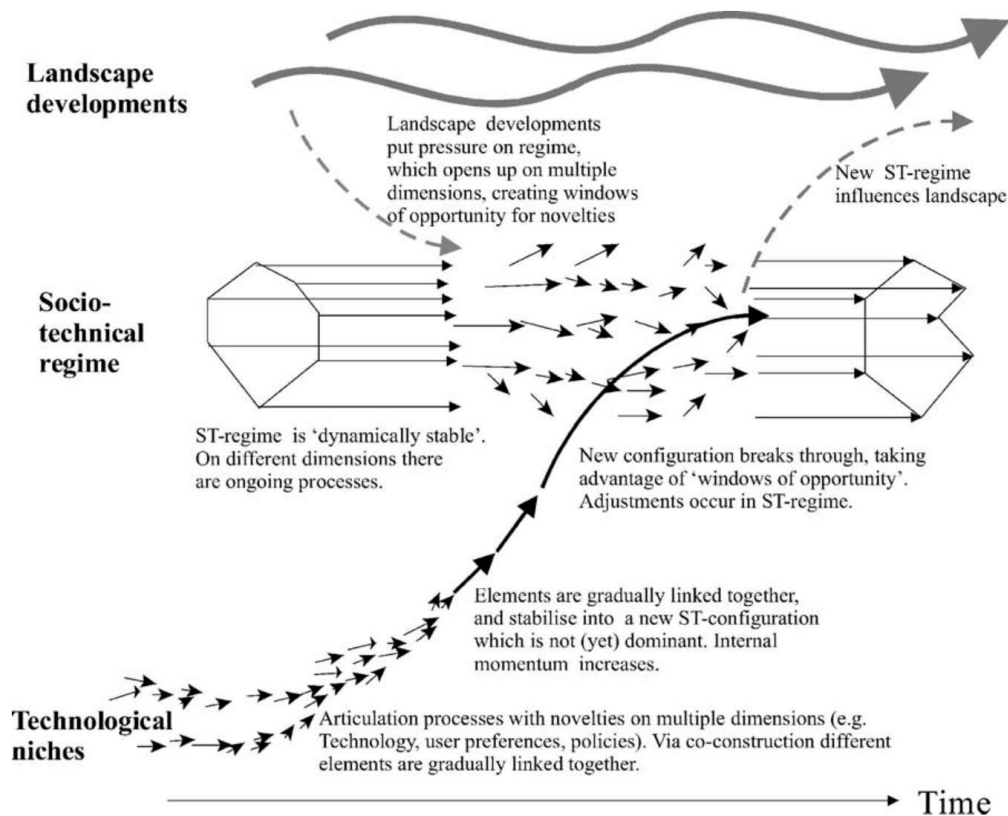


Figure 2 - Interactions entre les trois niveaux de la perspective multi-niveau menant à une transition sociotechnique (Geels 2004)

Le concept de « technologie », pourtant central, est souvent mal ou non défini dans la littérature que j'ai pu consulter. Je choisis de reprendre la définition de Rip and Kemp (1998), selon laquelle une technologie est une « configuration qui fonctionne », i.e., la combinaison d'outils matériels (ex : la dent d'une sous-soleuse et son châssis), d'infrastructures (ex : le bâtiment de stockage du matériel) et de compétences (ex : des utilisateurs de la sous-soleuse). **Ainsi, dans le cadre de la théorie des transitions, on peut analyser une configuration de techniques agricoles permettant d'atteindre les objectifs fixés (en termes de rendement, d'impact environnemental) comme une technologie, par exemple pour la désinfection chimique des sols en maraîchage sous abris.**

Le paysage sociotechnique, constitué de facteurs globaux (ex : changement de régimes politiques, évolution des prix mondiaux des denrées alimentaires ou du pétrole), influence le choix des pratiques (Fig. 2). **Bien qu'intégré au système sociotechnique selon Geels, je fais le choix de distinguer le paysage sociotechnique du SAT, car le faire évoluer pour accompagner le changement de pratiques est hors de portée des acteurs du SAT.** En effet les éléments du paysage sociotechnique sont déterminés à des échelles trop larges pour être fortement influencés par un ensemble d'acteurs du SAT. **Il constituera donc une importante échelle systémique à analyser dans la thèse comme contexte, mais ne pourra être une échelle d'accompagnement pour le changement.**

La théorie des transitions permet d'analyser le changement de pratiques vers des pratiques agroécologiques au niveau d'un territoire. En effet, on peut analyser le changement, à l'échelle d'un territoire, de pratiques dites « conventionnelles » vers des pratiques agroécologiques comme la

transition du SAT structuré autour d'une technologie « conventionnelle » vers une technologie alternative agroécologique. La théorie des transitions, au-delà du cadre conceptuel présenté ci-dessus, propose un cadre d'analyse dynamique des transitions.

➤ **Le verrouillage sociotechnique comme frein au changement de pratiques**

Un régime sociotechnique est dit dominant s'il regroupe la majorité des acteurs dans un réseau stable structuré autour d'une technologie elle aussi majoritaire, à travers la mobilisation d'artefacts et de règles bien établis. Appliqué au secteur agricole dans son ensemble, il correspond à l'agriculture « conventionnelle » ou « agri-industrielle et agri-chimique » (Magrini et al. 2019). Un régime dominant a alors une forte inertie au changement et exclut des technologies alternatives, mêmes si elles sont plus prometteuses, plus efficaces. On parle alors de « verrouillage sociotechnique » (« sociotechnical lock-in ») du régime autour d'une technologie dominante (David 1985; Arthur 1988). À mesure qu'une technologie est adoptée par un plus grand nombre d'utilisateurs, l'utilité pour chaque nouvel utilisateur est accrue pour la technologie dominante par rapport aux solutions alternatives, même si celles-ci sont « supérieures » (par exemple, plus efficaces ou plus respectueuses de l'environnement). C'est ce rendement croissant d'adoption qui conduit à l'auto-renforcement du verrouillage et ainsi à une dépendance au chemin parcouru (Arthur 1989), selon les termes de l'économie évolutionniste. Ces phénomènes sont très présents en agriculture et structurent l'évolution des déterminants des pratiques, ce qui rend difficile la transition vers des SAT agroécologiques plus durables (Magrini et al. 2019). Lamine et al. (2010) montrent ainsi que la réduction de l'utilisation des pesticides dépend d'un ensemble de déterminants qui coévoluent et ensemble verrouillent le choix variétal autour d'un petit nombre de variétés non rustiques cultivées en monovariété. Ceci freine l'adoption de variétés rustiques de blé requérant moins de pesticides : les coopératives offrent une diversité limitée de choix de semence et encouragent les agriculteurs à ne cultiver qu'un petit nombre de variétés afin de limiter le nombre de silos nécessaires pour le stockage et les difficultés de gestion. Ce choix dépend en particulier des variétés des meuniers, peu enclins au changement de variété et au mélange variétal de peur d'effets négatifs sur la qualité technologique de la farine. Ces acteurs interagissent et orientent le choix des sélectionneurs. Les conseillers agricoles mettent alors peu en avant les variétés rustiques et le mélange variétal malgré des résultats probants en termes de qualité technologique et de rendement.

Cependant, un système sociotechnique verrouillé peut se déverrouiller. Geels (Geels; 2004) et Geels and Schot (2007) explicitent la dynamique d'évolution des systèmes sociotechniques par l'interaction entre les trois niveaux : le régime, la niche et le paysage sociotechnique (Fig. 2). Le régime dominant subit des pressions du paysage et/ou des pressions internes qui le déstabilisent. Il peut ainsi soit se restructurer sans changement profond, soit s'hybrider avec une niche technologique, soit encore subir une substitution de technologie. Ces évolutions sont qualifiées de transition sociotechnique. L'évolution du SAT vers un système agroécologique est donc une transition sociotechnique. Elle est également qualifiée de « transition agroécologique » (Magrini et al. 2019), avec une acception de l'agroécologie comme *“la science appliquant des concepts et principes de l'écologie à la conception et à la gestion de systèmes alimentaires durables”* (Gliessman 2007). **Cette thèse qui s'intéresse à l'accompagnement du changement vers une protection agroécologique des**

sols, de la parcelle au SAT, s’ancre donc à la fois dans l’agronomie système mobilisant la théorie des transitions et dans l’agroécologie selon cette acception.

Ce cadre d’analyse a déjà été largement utilisé dans les domaines de recherche en agriculture et systèmes alimentaires (El Bilali 2019), en particulier pour identifier les processus à l’échelle du système agri-alimentaire limitant des changements vers des pratiques agroécologiques (ex : Belmin et al. 2018 sur l’étude des IGP en lien avec la qualité des clémentines ; Meynard et al. 2018 sur la diversification des cultures ; Gaitán-Cremaschi et al. 2020 sur l’intensification écologique de systèmes légumiers au Chili ; pour d’autres exemples : Vanloqueren and Baret 2009; Magrini et al. 2016; Della Rossa et al. 2020; Morel et al. 2020). **Cependant ces travaux n’ont pas donné lieu à un cadre analytique opérationnel et multi-échelle des changements de pratiques, qui permette son accompagnement à l’échelle du territoire.**

En conclusion, la théorie des transitions nous donne des concepts et une représentation analytique permettant de saisir les processus sous-jacents à l’évolution ou non des déterminants et des pratiques : verrouillage, interactions niches-régimes, dépendance au chemin, etc. Elle renforce l’idée de la nécessité d’une approche systémique à l’échelle du SAT pour l’accompagnement du changement de pratiques en tenant compte des facteurs globaux à l’échelle du paysage sociotechnique et de leur évolution.

1.3. Vers un cadre opérationnel pour l’analyse du changement de pratiques comme un problème agronomique complexe

Sur la base de l’analyse précédente, j’identifie les caractéristiques que devrait prendre un cadre opérationnel pour accompagner les changements de pratiques.

➤ **Besoins d’un cadre d’analyse intégrateur pour traiter un problème complexe**

Le changement de pratiques est un problème agronomique complexe au sens de « complex agricultural problem » (Schut et al. 2015a). Ces auteurs le définissent comme un problème multidimensionnel (biophysique, technologique, socioculturel, économique, institutionnel et politique), impliquant des interactions à différentes échelles et où une multiplicité d’acteurs est partie prenante. Or, nous avons vu dans la section 1.1.3 que le changement de pratiques agricoles combine les différentes dimensions citées. Il est au cœur d’interactions entre quatre échelles : la parcelle cultivée, l’exploitation, le SAT et le paysage sociotechnique. Enfin, il implique de multiples acteurs du territoire et de la filière (sections 1.1.3 et 1.2). **Les agronomes doivent ainsi développer des outils qui permettent d’analyser les problèmes de changement de pratiques, en prenant en compte la multiplicité de ces dimensions, de ces échelles et des parties prenantes**, car, citant Belmin (2016), il paraît difficile d’*«évaluer les pratiques des agriculteurs et de faire des préconisations pertinentes sans connaître l’ensemble du système qui les fait émerger, ainsi que les différentes échelles auxquelles les interactions se produisent»*. Or de tels outils semblent manquer. La grande majorité des travaux sur la construction des pratiques et en particulier sur la protection des cultures ne sont positionnés qu’à une seule échelle d’analyse (Schut et al. 2014; Belmin 2016). Ces auteurs montrent que les agriculteurs y sont encore très fréquemment considérés comme des utilisateurs finaux d’innovations développées

par la recherche et diffusées par le conseil. L'influence des acteurs des politiques publiques et des entreprises privées y est peu considérée (Schut et al. 2014). Certains cadres existent néanmoins d'ores et déjà.

➤ **Besoins d'un cadre d'analyse qui permette d'accompagner les changements de pratiques**

Le cadre de la perspective multi-niveau (Geels 2002, 2004) présente plusieurs limites pour saisir des processus à l'échelle du système agri-alimentaire. (i) Il ne tient pas compte de la dimension spatiale des interactions entre acteurs agricoles, pourtant essentielles pour penser l'évolution des systèmes et pratiques agricoles (Darnhofer et al. 2015; Ollivier et al. 2018; Della Rossa 2020), comme la proximité spatiale d'une communauté d'échange sur les pratiques. (ii) Il n'inclut pas le niveau d'analyse de l'exploitation, des systèmes de culture (Duru et al. 2015a) et les déterminants qui, à ce niveau, impactent le choix des pratiques. Aussi, Della Rossa et al. (2020) ont hybridé ce cadre avec un cadre d'analyse des territoires pour pallier au manque de spatialisation et y ont intégré des éléments de l'exploitation et du système de culture. Ces auteurs ont appliqué ce cadre à une analyse territoriale multi-filière pour traiter du changement de pratiques des agriculteurs du territoire par rapport à un problème de gestion d'une ressource naturelle, la pollution aux pesticides d'un bassin versant. Or ce cadre ne paraît pas adapté à l'étude d'un changement de pratiques spécifique à une filière et avec une dimension paysagère faible, qui est au cœur de cette thèse. De même, Duru and Therond (2014) proposent un cadre conceptuel adapté à l'analyse et l'accompagnement de la transition agroécologique du système agri-alimentaire dans son ensemble, mais il n'est pas centré sur un changement de pratiques en particulier.

Belmin (2016) et Schut et al. (2015a) proposent 2 cadres prometteurs pour l'analyse multi-échelle des pratiques qu'ils appliquent respectivement à la problématique de la gestion de la qualité de la clémentine corse et d'une plante parasite du riz en Tanzanie. Cependant, le cadre RAAIS (pour « Rapide Evaluation du Système d'Innovation Agricole ») utilisé par Schut et al. (2015a) n'analyse pas l'ensemble des déterminants et processus contraignant ou facilitant le changement de pratiques mais se concentre uniquement sur les contraintes empêchant l'innovation dans le système agricole. Le cadre de Belmin (2016) combine également des éléments d'agronomie système et de théorie des transitions. Néanmoins, il ne définit pas un cadre concis permettant d'analyser rapidement un problème spécifique de changement de pratiques et de le traduire de manière opérationnelle pour la conception de solutions. Je fais l'hypothèse qu'entrer par les déterminants des pratiques à de multiples échelles permet d'atteindre cet objectif, la typologie des déterminants constituant alors en eux-mêmes une grille d'analyse.

En conclusion, les pratiques agricoles (protection des cultures incluses) sont déterminées à 4 niveaux : la parcelle, l'exploitation, le SAT et le paysage sociotechnique, par les actions de multiples acteurs du SAT (production, filière, R&D, politique publique) dans les domaines techniques et socioéconomiques. Ces déterminants sont cadrés par des processus sociotechniques qui peuvent conduire au verrouillage du SAT autour d'un système de pratiques dominant. Ainsi, pour accompagner la transition agroécologique au niveau des pratiques agricoles, je considère qu'il convient de développer un cadre original prenant en compte l'ensemble de ce système et des processus en jeu.

2. Accompagner le changement de pratiques vers l'agroécologie : un processus de conception multi-échelle de solutions innovantes

2.1. L'accompagnement du changement de pratiques, un problème de conception

Pour répondre aux enjeux de durabilité de la protection des cultures, la reconception des systèmes de production est nécessaire (Hill and MacRae 1995; Meynard et al. 2006), l'adaptation à la marge des systèmes actuels se révélant largement insuffisante. Un nombre croissant d'agronomes s'orientent ainsi vers une activité d'aide à la reconception, comprise comme « *la conception de nouveaux systèmes à partir de systèmes existants, en orientant leur dynamique en faveur de la durabilité* » (Berthet 2013). Cette reconception vise donc à introduire des innovations (« *nouveaux systèmes* » dans la citation précédente) dans les systèmes de production. La conception renvoie à la nature ingénierique de la science agronomique et à son engagement dans l'action. En effet, l'activité de conception s'intéresse à la façon dont les choses devraient être, à l'élaboration d'artefacts¹⁵ pour atteindre des objectifs (Simon 1969). C'est un point clé du processus d'innovation durant lequel l'identité de l'objet conçu est défini : ce qu'il va être, ce qu'il va faire ou ce qu'il va rendre possible de faire (Meynard et al. 2017). Appliqué aux problèmes agricoles, il s'agit de concevoir une diversité d'objets agricoles à une diversité d'échelles : nouveaux intrants (variétés, équipements, agents de biocontrôle), nouveaux systèmes de culture ou de production, paysages agricoles et outils d'accompagnement au changement de pratiques (ex : outils d'aide à la décision) (Prost et al. 2016).

L'agronome peut contribuer de 4 manières au processus de conception : (i) en étant à l'origine de l'invention qui, une fois mise en œuvre, deviendra une innovation, (ii) en développant des outils et méthodes utilisables par les acteurs pour innover par eux-mêmes ou adapter des innovations existantes, (iii) en contribuant à identifier, analyser et promouvoir des innovations existantes, (iv) en contribuant à anticiper les effets économiques, sociaux et environnementaux de leur diffusion et les conséquences de celles-ci sur les performances de l'agriculture et de l'élevage, à différentes échelles (Meynard et al. 2006). Cependant l'agronome n'est pas le seul concepteur des systèmes agricoles. Par exemple, les agriculteurs conçoivent et reconçoivent en permanence leurs systèmes (Salembier 2019). On retrouve les activités de conception sus-citées dans les deux premiers items. L'item (iii) correspond à l'analyse d'innovations existantes (communément appelé « *traque aux innovations* ») pour produire des connaissances qui vont nourrir des processus de conception dans d'autres systèmes agricoles (Salembier 2019). L'item (iv) correspond à l'évaluation *ex-ante* de l'effet des artefacts conçus pour permettre d'adapter ces derniers avant de les implémenter sur le terrain. Ces contributions à la conception sont complémentaires. Les trois derniers items (ii, iii, iv) paraissent bien adaptés à

¹⁵ Artefact est à comprendre comme quelque chose, matériel ou immatériel élaboré par l'homme.

l'accompagnement du changement de pratiques en donnant les outils et les connaissances aux acteurs du territoire pour faire évoluer leurs systèmes.

Les agronomes distinguent deux manières principales de concevoir des systèmes innovants : la conception *de novo* et la conception pas-à-pas (Table 1) (Meynard et al. 2012; Prost et al. 2016; Toffolini 2016). La conception *de novo* vise à concevoir des systèmes en rupture avec l'existant et sans contrainte de réalisme. Elle vise à explorer une diversité d'alternatives sans brider la créativité des concepteurs. Elle s'appuie essentiellement sur des méthodes d'exploration, mobilisant principalement de nouvelles connaissances et peut conduire à une transformation en profondeur des systèmes (Berthet et al., 2015; Meynard et al., 2012). A contrario, la conception pas-à-pas vise à accompagner la transition progressive vers de nouveaux systèmes, dont on définit au préalable les fonctions en tenant compte des contraintes des acteurs. Elle s'appuie sur une conception itérative, alternant des phases de diagnostic des systèmes existants permettant d'identifier les points à améliorer, avec des phases de conception de l'amélioration, d'évaluation et d'implémentation des systèmes conçus. Elle permet un apprentissage et une amélioration continue ainsi que la conception de systèmes adaptés et valorisant les conditions locales. Toffolini (2016) résume et compare ces deux démarches dans la Table 1. Il montre ainsi que ces deux approches de la conception agronomiques ne sont pas antagonistes, mais peuvent être mobilisées conjointement : un processus de conception *de novo* pour concevoir des nouveaux systèmes comme cible à atteindre, inspirant un processus de conception pas-à-pas qui organise la transition du système actuel vers le système cible. La combinaison de ces deux approches est cohérente avec la nécessité, d'une part de concevoir des innovations de rupture pour que les nouvelles pratiques répondent aux défis de durabilité de l'agriculture (Meynard et al. 2012) et, d'autre part d'accompagner ce processus par nature lent et progressif qu'est le changement de pratiques des agriculteurs (Chantre and Cardona 2014; Mawois et al. 2019).

Table 1 - Comparaison des démarches de conception *de novo* et pas-à-pas (Toffolini 2016)

	Conception <i>de novo</i>	Conception pas-à-pas
Principe	Invention d'un système en rupture avec l'existant	Evolution progressive d'un système existant
Avantages	Exploration de solutions très innovantes ; Source d'inspiration pour le <i>pas-à-pas</i> ;	Apprentissage progressif des nouveaux systèmes ; Adaptation aux contraintes spécifiques des contextes d'application ;
Risques	Faible réalisme	Conservatisme

En conclusion, dans ma thèse et dans la lignée des travaux récents d'agronomes, accompagner le changement des pratiques agricoles vers des pratiques agroécologiques est un problème de conception. La contribution des agronomes à la conception se fait généralement d'une ou plusieurs des quatre manières suivantes : (i) concevoir eux-mêmes, (ii) développer des outils d'aide à la conception, (iii) identifier des innovations inspirantes et (iv) évaluer les conséquences des solutions conçues. Nous mobiliserons conjointement les trois derniers items dans cette thèse. De même, nous

combinerons les approches de conception *de novo* et pas-à-pas afin de répondre aux enjeux nouveaux de la protection agroécologique des cultures tout en accompagnant le changement de pratiques.

2.2. Apports et limites des approches de conception existantes pour l'accompagnement du changement de pratiques

Les agronomes ont développé des démarches de conception d'innovation aux mêmes échelles que celles qui leur ont permis de comprendre les déterminants des pratiques : des nouvelles techniques agricoles (ex : Navarrete et al. 2016) et des systèmes de culture à l'échelle de la parcelle (Reau and Doré 2008), des systèmes de production à l'échelle de l'exploitation (Le Gal et al. 2011; Richard 2018), des infrastructures paysagères (Steingröver et al. 2010; Berthet 2013) ou mosaïques de systèmes de culture à l'échelle d'un bassin versant (Hossard et al. 2013; Burger-Leenhardt et al. 2015; Chantre et al. 2016) donc d'un territoire vu comme paysage. **Cependant, rares et récents sont les travaux d'agronomes s'intéressant à la conception à l'échelle du territoire vu comme l'espace dans lequel se structure le réseau d'acteurs influençant le changement de pratique, i.e., le SAT (Audouin et al. 2018; Della Rossa 2020).** Un courant de recherche dans lequel des agronomes se sont fortement impliqués, la modélisation d'accompagnement (ComMod) a néanmoins fortement structuré une approche pour la conception prenant en compte l'échelle territoriale comme SAT et comme paysage cultivé pour résoudre des problèmes agricoles complexes (Souchère et al. 2010; Étienne 2013). Ce courant de recherche est néanmoins plus focalisé sur la résolution de problèmes de gestion des ressources naturelles partagées et il est peu centré sur l'étude et l'accompagnement au changement des pratiques agricoles (ComMod 2005).

Dans la gamme des méthodes de conception agronomique appliquées aux systèmes de production, Le Gal et al. (2011) identifient différentes catégories, qui sont applicables aux travaux de conception à l'échelle du système de culture (Reau et al. 2012) et aux travaux plus récents de conception à l'échelle du territoire (Steingröver et al. 2010; Burger-Leenhardt et al. 2015; Prost et al. 2018; Della Rossa 2020). Ces auteurs distinguent les méthodes selon qu'elles sont participatives ou non, et qu'elles sont basées sur la modélisation, l'expérimentation, et/ou sur le simple échange et accompagnement des acteurs (Le Gal et al. 2011). La principale limite des méthodes non participatives telles que le prototype¹⁶ (Vereijken 1997; Debaeke et al. 2009; Reau et al. 2012) et la conception par modélisation (Casagrande et al. 2010) **est que les innovations résultantes sont souvent déconnectées de la réalité des acteurs du terrain**, car le processus est trop long (prototype) ou parce qu'il ne mobilise pas les connaissances et conditions particulières des acteurs de terrain (Le Gal et al. 2011).

Parmi les démarches participatives, Le Gal et al. (2011) ont identifié trois types de démarche: (i) celles basées principalement sur l'accompagnement par des experts avec des échanges de connaissances et des expérimentations sans modèle partagé (« participation ») ; (ii) celles reposant sur un modèle partagé et co-construit visant à représenter et améliorer les règles de décision des

¹⁶ correspond à la conception d'un système de culture avec ses règles de décision sur la base d'objectifs d'indicateurs et de connaissances biotechniques et de l'expérimenter en champs Debaeke et al. (2009)

agriculteurs dans le contexte d'un accompagnement par un conseiller (« conseil ») ; et enfin (iii) celles basées sur la co-construction d'un modèle de compréhension commune du système à reconcevoir entre agriculteur et chercheur, permettant la coconception d'alternatives et leur évaluation (« accompagnement par la modélisation »). Construire une représentation partagée apparaît essentiel pour mobiliser les différents acteurs, concevoir des innovations pertinentes dans leur contexte et participer à un apprentissage conjoint des chercheurs, conseillers et agriculteurs et autres acteurs du système agri-alimentaire (Le Gal et al. 2011; Martin 2015; Navarrete et al. 2017). **Ainsi, les démarches de « conseil » et « d'accompagnement par la modélisation » semblent être les plus adaptées pour l'accompagnement au changement de pratiques.**

Ces différentes démarches participatives de conception me semblent partager une structure commune par itération des étapes suivantes : (i) identification du problème, (ii) diagnostic de la situation initiale, (iii) conception de nouveaux systèmes, (iv) évaluation *ex-ante* ou mise en œuvre suivie d'une évaluation *ex-post* de ces nouveaux systèmes, (v) retour au (ii) (Le Gal et al. 2011; Reau et al. 2012; Navarrete et al. 2017). Elles reposent le plus souvent sur l'animation d'ateliers de conception multi-acteurs (*a minima* chercheurs et agriculteurs) (Reau et al. 2012; Navarrete et al. 2017). Cette démarche itérative permet ainsi un apprentissage et une amélioration continue.

En conclusion, les démarches participatives d'accompagnement à la conception mobilisant la modélisation semblent être bien adaptées pour l'accompagnement au changement de pratiques. Néanmoins, à ma connaissance, rares sont les démarches de conception intégrant les différentes échelles, domaines et parties prenantes du problème complexe qu'est le changement de pratiques vers une protection agroécologique des cultures (Schut et al. 2014). Ainsi il y a un enjeu à développer de telles démarches.

2.3. La conception d'innovations couplées pour résoudre un problème complexe

Les démarches « classiques » de conception de systèmes agricoles présentés ci-dessus excluent pour la plupart l'échelle SAT du système à reconcevoir. De cette manière, elles tendent à concevoir des systèmes de culture ou de production sous contraintes des déterminants des pratiques qui sont à l'échelle du SAT (par exemple contraintes de l'aval de la filière - Meynard et al. 2017), sans chercher à les faire évoluer. Cette conception d'innovations techniques « sous contrainte » d'un SAT considéré comme figé constitue un frein au changement de pratiques vers des pratiques agroécologiques identifié dans la littérature (Meynard et al. 2017; Della Rossa et al. 2020; Lefèvre et al. 2020). Meynard et al. (2017) montrent par exemple que le refus des meuniers d'accepter des lots avec des mélanges de variétés de blé verrouille la possibilité d'implémenter à grande échelle cette pratique qui pourtant permet la réduction d'utilisation de fongicides. Il y a donc un fort enjeu à reconcevoir à l'échelle du SAT pour réduire l'usage des pesticides. Le concept d'**innovation couplée** vise à dépasser ce verrouillage en concevant « *dans la production, l'échange, la transformation et la consommation, tout en tenant compte des synergies ou des antagonismes entre l'amont et l'aval. Ainsi, les innovations ne sont pas seulement technologiques - par exemple en ce qui concerne les systèmes de culture ou la transformation - mais aussi organisationnelles et institutionnelles.* » (Meynard et al. 2017). La

conception d'innovations couplées vise donc à innover conjointement dans plusieurs maillons du système agri-alimentaire (transformation, consommation, échange, production), **pour pouvoir jouer sur les déterminants des pratiques agricoles qui résultent des stratégies des autres acteurs du SAT**. Ce concept apparaît donc prometteur pour accompagner le changement de pratiques vers des pratiques agroécologique et lever un potentiel verrouillage sociotechnique (Meynard et al. 2017, section 1.2). Néanmoins, des solutions non innovantes peuvent être intéressantes à combiner avec des solutions innovantes (=innovations) pour lever les freins et le verrouillage. Par exemple, l'utilisation de financements existants pour l'achat de matériel peut permettre d'acheter du matériel essentiel pour la mise en œuvre de pratiques innovantes (ex : semoir de semis direct, trieuse pour faire produire des cultures associées). Ainsi dans cette thèse, le processus de conception d'innovation couplée se caractérise par un processus de conception multi-échelle de solutions au problème complexe, produisant des innovations couplées qui couplent des solutions innovantes et non innovantes. **Je fais donc l'hypothèse que l'accompagnement au changement de pratiques doit se faire par un tel processus de conception, combinant de manière originale des solutions techniques, organisationnelles et institutionnelles (innovantes ou non) aux différentes échelles, avec les différentes parties prenantes. Dans la suite de la thèse, j'écrirai « conception multi-échelle de solutions » pour insister sur l'exploration coordonnée de solutions innovantes ou non à différentes échelles. J'écrirai « processus de conception d'innovations couplées » pour insister sur le couplage des différents éléments et faire référence à la littérature existante.**

Selon Meynard et al. (2017), un processus de conception d'innovations couplées vise à des **innovations radicales** en rupture avec le système dominant actuel, pour échapper au mécanisme de la dépendance du chemin (section 1.3) (Meynard et al. 2017). Ainsi c'est un processus qui doit favoriser la **circulation et l'hybridation des connaissances** entre **acteurs hétérogènes**, dans une logique **d'innovation ouverte** (Chesbrough et al. 2014; Prost et al. 2016; Meynard et al. 2017). Néanmoins les différents acteurs à impliquer (agriculteurs, transformateurs, chercheurs, consommateurs, etc.) peuvent être disséminés sur le territoire sans nécessairement se connaître, partager des objectifs communs ou un lien hiérarchique (Meynard et al. 2017). Cela pose un problème **d'organisation de la conception**, avec un tel collectif d'acteurs hétérogènes (Prost et al. 2016). J'ajouterais, en cohérence avec Le Gal et al. (2011), que la coconception doit être construite en partenariat avec des **acteurs du développement agricole**, pouvant par la suite remobiliser les démarches de coconception développées de manière totalement ou partiellement indépendante. Enfin, en cohérence avec la démarche ComMod (Étienne 2010) et les « **approches douces** » décrites par Martin (2015), les différentes parties prenantes doivent être impliquées, autant que faire se peut, dès la **construction du problème**, afin de garantir la légitimité et la pertinence de la démarche.

Un tel processus de conception innovante est déjà mis en œuvre par des acteurs de terrain, comme l'illustre le cas de la marque privée Bleu-Blanc-Cœur (Magrini and Duru 2014). Bleu-Blanc-Cœur a couplé des innovations technologiques (sélection variétale, introduction du lin dans les systèmes de culture actuels, procédé d'extrusion pour valoriser les graines de lin comme aliment d'élevage), une innovation institutionnelle (nouvelle filière basée sur l'allégation santé 'teneur en oméga3' appuyée par un label privé) et une innovation organisationnelle (association qui regroupe toutes les parties prenantes). **Néanmoins ce processus de conception d'innovations couplées est à ce jour peu connu**

et expérimenté par les agronomes. Il pose ainsi un certain nombre de questions constituant des fronts de recherche résumés en Encadré 2. Dans le cadre de ma thèse, je vais contribuer aux fronts de recherche suivants : le front n°1 *quelle méthode de diagnostic* (section 1.), le front n°2 *quels dispositifs multi-acteurs* (i.e., comment accompagner) et le front n°3 consubstantiel du n°2. *quels outils pour l'accompagnement ?* (Voir Encadré 2.).

Encadré 2 - Fronts de recherche ouverts par le concept d'innovation couplée (Meynard et al. 2017; Brun et al. 2019)

1. Quelle **méthode de diagnostic du système agri-alimentaire** pour identifier les causes des problèmes et les ressources à mobiliser pour les résoudre ?
2. Quels **dispositifs multi-acteurs** pour concevoir et évaluer les innovations couplées ?
 - Quels acteurs doivent être impliqués dans la conception et comment ?
 - Comment coordonner le processus de conception, avec des acteurs de maillons différents du secteur agri-alimentaire, sans relations hiérarchiques entre eux ?
 - Comment gérer les intérêts différents et parfois contradictoires des parties prenantes de la conception ?
 - Comment la gouvernance du processus de conception doit-elle être organisée ? Est-ce que l'un des acteurs impliqués doit prendre le rôle de conducteur du processus ? Comment définir les règles de collaborations ?
 - Comment favoriser la conception « d'innovations couplées ouvertes » (Piller and West 2014), c'est-à-dire favorisant l'échange d'objectifs, de concepts et de connaissances des acteurs développant leurs propres innovations ?
 - Comment coordonner le processus d'innovation pour éviter de concevoir des innovations incrémentales renforçant le système dominant (phénomène de dépendance au chemin) ?
3. Quels **outils** doivent être conçus et utilisés pour faciliter le processus de conception ?
4. Quelles **politiques publiques** pourraient favoriser les innovations couplées ?

En conclusion, le processus de conception d'innovations couplées semble nécessaire pour dépasser les verrouillages potentiels au changement de pratiques décrit en section 1.3. Il est donc clé dans le cadre d'une exploration multi-échelle de solutions pour dépasser les freins aux changements de pratiques. Cela suppose un processus participatif de conception, d'innovations de rupture, dans une démarche d'innovation ouverte, en embarquant le développement agricole et toutes les parties prenantes dans la définition du problème. Ce concept d'innovation couplée ouvre ainsi un certain nombre de fronts de recherche.

3. Apports des théories et outils existants pour la conception multi-échelle de solutions

Dans cette section, je présente différentes théories et outils mobilisés par les agronomes, adaptés à la conception de solutions aux différentes échelles, dans les différents maillons du système agri-alimentaire et en particulier la conception d'innovations couplées. Pour alléger la rédaction, j'écrirai par la suite « conception multi-échelle de solutions » pour désigner la conception d'innovations couplées et la conception et combinaison de solutions aux différentes échelles: parcelle, exploitation et SAT (Fig. 1). Dans un premier temps je présenterai les cadres théoriques et méthodologiques de la conception innovante développés par l'école des Mines de Paris, comme outils clés pour la démarche de conception *de novo* (3.1). Je présenterai ensuite l'étude des innovations existantes ou « traque aux innovations », permettant la production de connaissances « décalées » pour alimenter le processus de conception innovante (3.2). Dans un troisième temps je montrerai comment des objets intermédiaires et frontières (3.3) et en particulier des jeux sérieux (3.4) peuvent aider les parties prenantes du problème à concevoir des innovations couplées. Enfin je présenterai les différentes démarches pour évaluer les performances des solutions conçues (3.5).

3.1. Le cadre de la conception innovante : la théorie C-K et la démarche KCP pour aider les acteurs à concevoir des innovations en rupture

➤ La théorie de la conception (« *Design theory* »)

Accompagner la conception d'innovations en rupture (2.3) par rapport à une technologie dominante nécessite une approche de conception innovante. La conception innovante, contrairement à la conception réglée, conduit à redéfinir au cours du processus à la fois les objectifs de la conception (les propriétés que doivent atteindre les artefacts conçus), les moyens d'y parvenir (ex : connaissances, outils, méthodes, partenaires) et les critères d'évaluation de(s) l'objet(s) produit(s) (Meynard et al. 2012). Elle me semble ainsi bien adaptée aux problèmes agricoles complexes dont le processus de résolution est souvent difficile à prévoir en avance. Elle permet d'explorer un « inconnu désirable » (Hatchuel et al. 2017), c'est-à-dire une cible que l'on veut atteindre, sans savoir comment, sans connaître les contours précis de cette cible et donc les critères permettant d'évaluer si on l'a atteinte. La conception innovante est ainsi particulièrement adaptée à une approche de conception *de novo* (section 2.1). Elle se distingue de la conception réglée qui produit des innovations incrémentales et qui nécessite d'avoir une idée précise de l'artefact à concevoir, des moyens (outils, connaissances) pour le faire et des critères pour évaluer ses performances (Meynard et al., 2012). La conception réglée s'appuie sur les connaissances disponibles et vise essentiellement à améliorer les techniques existantes, mais avec le risque de suivre une dépendance au chemin (Meynard et al., 2017).

Hatchuel et al. (2017) proposent une nouvelle ontologie pour les sciences et l'ingénierie de la conception reposant sur trois piliers : (i) la générativité, (ii) l'indépendance dans la structure des connaissances et (iii) les espaces sociaux. Selon ces auteurs, ces trois piliers réunis permettent une

exploration maximale de l'espace des solutions possibles sur un problème donné par rapport à l'inconnu désirable recherché. La générativité est la capacité à conceptualiser et créer des alternatives qui sont faites de « briques » connues mais dont la combinaison n'existait pas jusque-là (Hatchuel et al. 2017). Elle diffère de la créativité, qui peut être définie comme la capacité à produire des idées dans l'espace des connaissances **connues**. A contrario la générativité inclut la création et l'inclusion de connaissances indépendantes **nouvelles** et la réorganisation de l'espace des connaissances associées à l'émergence de nouveaux concepts ou artefacts (Hatchuel et al. 2017). Ainsi la générativité nécessite un processus conjoint de gestion des connaissances et de création de nouveaux concepts et artefacts. En agronomie, cette gestion conjointe est recherchée dans les ateliers de conception où l'exploration d'artefacts innovants est couplée à la création et l'échange de connaissances scientifiques et empiriques ainsi que l'identification de trous de connaissances (ex : Prost et al. 2018 ; Berthet et al. 2015).

La générativité est intimement liée au deuxième pilier de la conception innovante : l'indépendance des connaissances. Une connaissance est indépendante par rapport à une base existante de connaissances quand elle ne peut pas être déduite de celle-ci et apporte une dimension nouvelle importante à l'artefact en cours de conception (Hatchuel et al. 2017). Réunir des bases de connaissances indépendantes stimule la générativité (Hatchuel et al. 2017). Ainsi, dans le cas de « Bleu-Blanc-Cœur », les connaissances sur le process d'extrusion du lin pour en faire une alimentation animale satisfaisante et sur l'intérêt pour la santé humaine des oméga 3 étaient deux bases de connaissances *a priori* indépendantes. Réunies, elles ont donné lieu à « Bleu-Blanc-Cœur », un artefact fortement innovant. Cette notion d'indépendance des connaissances donne un fondement théorique à l'hybridation des connaissances de différentes natures (scientifiques, empiriques, génériques, locales) et origines (agriculteur, transformateur, R&D), encouragées par de nombreux travaux sur la reconception des systèmes agricoles (Prost et al. 2016; Meynard et al. 2017).

Enfin, en lien avec ce dernier point, le troisième pilier de la conception innovante est la mobilisation de formes ouvertes d'espaces sociaux et des participations élargies d'acteurs pour rassembler des connaissances indépendantes et favoriser la générativité (Hatchuel et al. 2017). Elle recouvre une dimension collaborative de la conception entre différents espaces sociaux. Une attention particulière doit être donnée aux freins psycho-sociaux à la créativité au sein de ces espaces, ex : la dispersion de l'attention, l'auto-censure par pression sociale, le sentiment d'illégitimité (Hatchuel et al. 2009).

➤ **Théorie C-K et méthode KCP**

Cette ontologie sous-tend la théorie C-K développée par le groupe de recherche en conception innovante de l'école "MINES ParisTech" (Hatchuel and Weil 2009, Encadré 3). D'après Agogué et al. (2014a), la théorie C-K a deux applications principales : (i) générer des concepts d'innovations, première étape d'un processus de conception, (ii) interpréter un processus de conception et le représenter. Elle a déjà été utilisée en agriculture, aussi bien pour générer des concepts (Berthet 2013; Ravier et al. 2017; Della Rossa 2020) que pour interpréter et représenter le processus de conception (Salembier et al. 2020).

Encadré 3 - Théorie C-K. Les exemples donnés sont issus de Ravier et al. (2017) sur la conception d'une « méthode de calcul de la dose d'azote sans rendement cible » (C0)

La théorie C-K consiste à distinguer deux espaces en interaction : celui des concepts (C) et celui des connaissances (K). L'espace C est initié à partir de la formulation de l'inconnu désirable (C0) et l'espace K à partir des connaissances existantes liées à cet inconnu désirable (K0). A partir de cette base, l'exploration dans les deux espaces est réalisée conjointement (Agogué et al. 2014a). Une nouvelle connaissance peut être mobilisée pour définir de nouvelles propriétés à un concept existant faisant émerger un ou plusieurs nouveaux concepts (Opération K->C). Par exemple la disponibilité d'un outil permettant d'estimer précisément l'indice de nutrition azotée des cultures permet d'aller du C0 vers une méthode estimant en temps réel le besoin d'azote des cultures. Inversement, un nouveau concept peut faire émerger de nouvelles connaissances (Opération C->K). Par exemple le concept d'une méthode « permettant des périodes de déficience en azote » a permis d'ouvrir un ensemble de connaissances sur l'effet des périodes de déficience en azote du blé sur le rendement et la qualité et de découvrir qu'à certaines périodes, la déficience n'est pas préjudiciable. De nouvelles connaissances peuvent également être générées sur la base des connaissances existantes par la logique et la recherche (Opération K->K). Enfin l'étude de nouveaux concepts peut être générée à partir de concepts existants et de leurs propriétés connues (Opération C->C).

La méthode des ateliers KCP (Hatchuel et al. 2009; Berthet et al. 2019) est basée sur la théorie C-K. Elle vise à accompagner la conception en favorisant la générativité par la création d'un espace social favorable, la combinaison de bases de connaissances indépendantes et l'exploration des trous de connaissances (Berthet et al. 2015). L'objectif est de mobiliser la théorie C-K afin de dépasser les effets de fixation des participants, biais cognitifs conduisant les participants à mobiliser des idées communes cadrées par le système dominant existant ou proche d'un exemple préalablement donné par d'autres participants (Agogué et al. 2014b). Cet effet renforce la dépendance au chemin, et en conséquence, le régime sociotechnique dominant. La première étape, phase K (K pour « Knowledge »), consiste en l'explicitation de connaissances qui doivent être partagées par l'ensemble des acteurs pour traiter le problème (ex : origine du problème, freins au changement de pratiques) et à l'apport de connaissances originales « défixantes » (ex : explicitation de processus biophysiques peu connus, présentation d'innovations couplées existantes dans un autre contexte). Un objectif central de l'apport de ces connaissances « originales » est de défixer les personnes de leurs cadres habituels de réflexion par des connaissances dites « expansives ». L'étape suivante, phase C (C pour « Concepts »), consiste en la formulation de concepts d'innovations (C) par les acteurs en petits groupes, à partir de « l'inconnu désirable » (C0) et des « concepts projecteurs ». Les concepts projecteurs (ex : pour la conception d'organisation facilitant la sélection participative de variétés de blé : « Transmettre des connaissances plutôt que des semences »), sont déterminés avant l'atelier par le groupe d'animateurs à l'aide de la construction d'un arbre C-K (voir Hatchuel and Weil 2009). Ils visent à défixer les participants. Enfin la dernière étape, phase P pour « Project », consiste à organiser une stratégie de conception structurée, i.e., identifier et organiser les pistes futures d'exploration à partir de la diversité des concepts conçus et préparer les parties prenantes de cette exploration à la suite du travail (Hatchuel et al. 2009).

Cette méthodologie présente néanmoins des limites : (i) l'absence de représentation partagée du système à reconcevoir pouvant servir à faciliter la pensée et les interactions, (ii) la dépendance plus forte aux compétences du facilitateur et en particulier à ses propres effets de fixation, (iii) l'absence

d'éléments embarqués permettant de gérer les relations de pouvoir jouant un rôle dans l'inhibition de la créativité (Berthet et al. 2015).

En conclusion, la théorie de la conception et en particulier la théorie C-K constituent des bases théoriques pour mener l'activité de conception multi-échelle de solutions permettant une protection agroécologique des cultures au sein des exploitations. Elles reposent sur une vision de la conception s'appuyant sur : (i) l'exploration conjointe des connaissances et concepts, (ii) la mobilisation de connaissances indépendantes, (iii) des espaces sociaux ouverts favorables à la conception. Ainsi, elles permettent de dépasser les effets de fixation renforçant le verrouillage existant au sein du système dominant en place. Faisant l'hypothèse qu'un tel verrouillage empêche le changement vers une gestion agroécologique des bioagresseurs telluriques en maraîchage sous abris provençal, mobiliser cette théorie sur mon cas d'étude me paraît pertinent. La méthodologie KCP est un exemple intéressant d'application de la théorie C-K, dans son organisation et dans son attention particulière à lever les effets de fixation. Néanmoins l'absence de représentation des systèmes agricoles rend *a priori* difficile d'instaurer un échange entre des acteurs très hétérogènes et ne se connaissant pas *a priori*.

NB : Pour faciliter la lecture dans la suite de la thèse, j'écris « innovation » pour « concept d'innovations », sauf quand le contraire est spécifié.

3.2. La traque aux innovations pour nourrir l'activité de conception avec des connaissances originales

L'étude des pratiques innovantes des agriculteurs s'est développée dans la recherche agronomique française dans les 10 dernières années (Salembier et al. 2016; Salembier 2019; Verret et al. 2019) et fait écho à des travaux internationaux tels que Feike et al. (2010). Elle consiste à repérer et analyser des innovations que des agriculteurs ont développées et mises en œuvre, afin de formaliser les connaissances correspondantes et de les remobiliser dans d'autres situations. C'est cette étape de formalisation qui distingue cette activité de celle de l'échange de pratiques entre agriculteurs. Elle est nommée « traque aux innovations¹⁷ » par les principaux auteurs des travaux sus-cités. Elle permet ainsi de produire des connaissances de différentes natures (témoignages de pratiques, gammes de techniques, règles de décisions, connaissances génériques associées à des contenus contextualisés, Salembier 2019), qui peuvent ensuite nourrir la conception de nouvelles innovations.

Jusqu'à présent, l'essentiel des traques aux innovations a été réalisé à l'échelle du système de culture et de l'exploitation, mais pas à ma connaissance sur des innovations à l'échelle du SAT couplées ou pouvant utilement être couplées avec des pratiques afin de dépasser les freins à leur mise en œuvre. Aussi, sur cette composante, les démarches de « traque » restent à développer.

¹⁷ Ce nom, loin de faire référence à une quelconque « chasse » aux agriculteurs, illustre le fait que ces innovations souvent se « cachent », car les agriculteurs n'ont pas toujours conscience que ce qu'ils font est innovant et pourrait intéresser les autres (com. pers. JM Meynard).

En conclusion, je fais l'hypothèse que l'étude des innovations déjà existantes sur le terrain aux différentes échelles, et en particulier à l'échelle du SAT, peuvent servir de base à la conception d'innovations situées dans d'autres contextes. Ainsi cette étude pourrait se faire sur le territoire de mon cas d'étude ou sur d'autres territoires, pour la gestion de BT ou plus généralement de la protection agroécologique des cultures. Elle pourrait apporter des connaissances indépendantes nourrissant le processus de conception innovante sur mon cas d'étude (3.1).

3.3. Les objets intermédiaires et objets frontières pour faciliter la collaboration dans des ateliers multi-acteurs

Nous avons vu dans la section 2.2 un certain nombre d'approches et outils de conception précédemment mobilisés en agronomie. J'ai conclu qu'une approche d'accompagnement à la conception mobilisant la modélisation me paraissait la plus pertinente pour mon sujet.

Différents types de modèles sont utilisés par les agronomes pour accompagner le processus de conception des acteurs de terrain. Le Gal et al. (2011) présente des modélisations informatiques basées sur des données scientifiques, de trois natures : modèle mathématique des processus biophysique, modèle d'optimisation et modèle basé sur des règles de décisions. Ces approches dites « dures » (Martin 2015) d'accompagnement par la modélisation informatique permettent de synthétiser les connaissances sur un système et son fonctionnement, d'explorer une large gamme de solutions possibles, de les choisir et de les classer selon leurs performances vis-à-vis d'objectifs fixés (Martin 2015). Néanmoins, dans une perspective de reconception participative d'un système agricole complexe, ces modèles présentent aussi plusieurs inconvénients : (i) ils nécessitent de disposer d'une quantité importante de données scientifiques formalisées sur le problème traité (Le Gal et al. 2011). (ii) Ils forment des « boîtes noires » peu accessibles aux acteurs, qui peuvent ainsi douter voire rejeter les résultats par manque de compréhension de ce qui les a produits (Duru et al. 2015b; Martin 2015). (iii) Les prototypes issus de ces modèles (Dogliotti et al. 2004; Dogliotti et al. 2005) tendent à être éloignés de la situation réelle des acteurs (Dogliotti et al. 2010 cité par Le Gal et al. 2011). (iv) La modélisation implique une forte réduction de la complexité faute de parvenir à représenter finement les interactions complexes au sein du système (Martin 2015), qui sont pourtant clé pour la gestion de problème de durabilité (Prost et al. 2016). (v) Les modèles informatiques sont peu adaptables à de nouvelles idées de solutions émergeant lors d'un atelier de conception, qui n'ont pas été anticipées lors de la conception du modèle. Ils limitent ainsi l'exploration (Meynard et al. 2012; Berthet et al. 2015) du fait d'un manque de plasticité ou des limites de leur domaine de validité.

Une autre approche possible, moins mobilisée par les agronomes jusqu'à récemment, est la représentation du système étudié et de ses composantes par des objets intermédiaires matériels que peuvent être des cartes, des tableaux (ex : Rami Fourrager - Martin et al. 2011 ; exploitation agricole avec des systèmes de culture « manipulables » - Richard et al. 2020), des maquettes (ex : ferme de poules pondeuses Rondeel, Klerkx et al. 2012). Ces objets matériels sont accessibles par les acteurs qui les comprennent, mobilisent et discutent plus facilement et sont ainsi plus transparents que les modèles informatiques sus-cités (Martin et al. 2011). Ils fonctionnent comme des objets intermédiaires permettant de représenter les connaissances, de les traduire de manière compréhensible par des

acteurs hétérogènes et ainsi de réaliser une médiation entre ces acteurs (Vinck 2009). Ces objets « *supporte[nt], par exemple, la confrontation de leurs points de vue en leur offrant des prises, en facilitant le surgissement de solutions et de rapprochement entre des aspects autrement dissociés* » (Vinck 2009). Ils fonctionnent également comme des objets frontières entre acteurs de différents mondes sociaux grâce à leur capacité de « parler » à cette diversité d'acteurs. Par exemple, la carte fourrage du Rami Fourrager peut être comprise par le chercheur comme une synthèse de connaissances scientifiques valides sous certaines conditions, et comprise par l'agriculteur comme un résumé de l'espérance de production au cours du temps. Dans la suite de la thèse, je ne parlerai que d'objets intermédiaires qui jouent également le rôle d'objets frontières. **NB** : Ainsi pour faciliter la lecture, j'écrirai « objet intermédiaire » pour « objet intermédiaire et frontière ». Ces objets intermédiaires matériels peuvent donc être efficacement utilisés pour favoriser la conception participative de systèmes agricoles innovants et l'apprentissage au cours d'ateliers de coconception, en favorisant l'interaction entre les participants et l'échange de connaissances (Martin et al. 2011; Klerkx et al. 2012). Ces approches de modélisation dites « douces » (Martin 2015) sont donc bien adaptées pour intégrer une diversité de connaissances (scientifiques génériques et empiriques locales) et de points de vue (Prost et al. 2016). Ils permettent également de représenter, lors de l'atelier participatif, toute la complexité du système, grâce à leur caractère évolutif et manipulable par toutes les parties prenantes et d'explorer des solutions avec moins de contraintes.

En conclusion, pour accompagner la conception, avec les acteurs, de solutions multi-échelles sur mon cas d'étude, l'utilisation d'objets intermédiaires matériels apparaît mieux adaptée que les modèles informatiques « durs ». En effet le problème que je traite dans cette thèse est complexe (multi-échelle, multi-dimension, multi-acteur). De plus, à ma connaissance, aucun modèle des effets des pratiques de protection des cultures sur les BT n'existe sur le cas d'étude et trop peu de données scientifiques sont récoltées et formalisées pour réaliser un tel modèle dans le cours de la thèse.

3.4. Le jeu sérieux, un outil de partage de connaissances et d'exploration de l'inconnu

Le jeu sérieux est un outil qui combine objet intermédiaire physique et/ou informatique et activité ludique (Becu 2020). L'utilisation du jeu sérieux, phénomène sociétal en pleine expansion dans de multiples domaines (ex : entreprise, éducation), a également trouvé sa place dans le domaine agricole. Il se définit comme une « *activité dont l'intention initiale, de ceux qui la mettent en place, est de combiner du jeu proposant règles et objectifs, avec une visée utilitaire (sérieux), destinée de manière non exhaustive et non exclusive à former, renseigner, communiquer, entraîner, soigner* » (Alvarez et al. 2014). Dans le domaine de l'utilisation des jeux sérieux en entreprise, des travaux montrent la capacité des jeux à **conjointement faciliter la gestion des connaissances, stimuler la créativité et favoriser la collaboration** (Agogué et al. 2015; Patrício et al. 2018), permettant ainsi de mobiliser les trois piliers de la conception innovante (3.1).

Les jeux sérieux mis au point par des agronomes pour accompagner le changement de pratiques prennent le plus souvent la forme d'un jeu de plateau représentant les éléments à reconcevoir, couplé

ou non avec un modèle informatique permettant d'évaluer les solutions conçues (Martin et al. 2011; Ryschawy et al. 2018; Rouault et al. 2020). Ils présentent les caractéristiques d'un objet intermédiaire (Becu 2020) et frontière (Martin 2015; Becu 2020) et constituent un outil prometteur pour concevoir des systèmes de production agroécologiques (Duru et al. (2015b)). **Cependant les agronomes jusqu'à présent, en dehors de la communauté ComMod, ont développé des jeux pour accompagner la conception de systèmes agricoles essentiellement à l'échelle du système de culture (ex : Marguerye et al. 2018; Rouault et al. 2020) ou du système de production animale ou végétale (ex : Martin et al. 2011) et ils mobilisent principalement des agriculteurs, chercheurs et conseillers. De plus, les objets intermédiaires conçus, et en particulier les modèles d'évaluation, limitent l'exploration des solutions par leur manque de flexibilité au cours de l'atelier (Berthet et al. 2015).**

Il existe néanmoins quelques exceptions. Récemment, le jeu Dynamix a été conçu et employé pour explorer **des changements originaux de systèmes de culture couplés à la conception d'organisations territoriales** permettant l'échange de ressources entre céréaliers et éleveurs (Ryschawy et al. 2018), ce qui relève de la conception d'innovations couplées à l'échelle du SAT. Della Rossa (2020) a également conçu un jeu dédié à affiner **la conception d'innovations couplées, en mobilisant un acteur non agriculteur, un gestionnaire du territoire**. La communauté ComMod mobilise fortement des jeux de rôle sérieux, afin d'accompagner la résolution de problèmes autour de biens communs, mettant en jeu des ressources naturelles. Leurs jeux prennent en compte **l'ensemble des éléments de l'agroécosystème et du SAT** jouant un rôle clé dans le problème étudié, et visent à accompagner la conception de solutions, avec (ex : *CauxOpération* - Souchère et al. 2010) ou sans modèle d'évaluation (*OilPalm* - Kamto et al. 2019). Les agronomes impliqués dans la communauté ComMod ont ainsi mobilisé des jeux pour accompagner le changement de pratiques dans un cadre multi-échelle (Souchère et al. 2010). Enfin, des jeux « ComMod » comme *OilPalm* permettent explicitement d'explorer des solutions innovantes en sortant du cadre initial du jeu.

En conclusion, les jeux sérieux sont des objets intermédiaires qui apparaissent particulièrement adaptés à la coconception multi-échelles d'innovations. Cependant les caractéristiques précises d'un tel jeu sont encore à définir, car pas ou peu d'exemples existent actuellement dans la littérature agronomique.

3.5. Les méthodes d'évaluation d'innovations couplées et leurs limites

La reconception des systèmes agricoles passe le plus souvent par une boucle conception-évaluation-reconception (2.2). Les agronomes mobilisent généralement les mêmes modèles informatiques « durs » pour la conception et l'évaluation, présentant les mêmes inconvénients décrits dans la section 3.3, et donc la même difficulté à en mobiliser un au cours de la thèse. Je souligne en particulier la difficulté d'évaluer avec ces approches des innovations couplées du système de culture au SAT, pour plusieurs motifs : (i) manque d'outils d'évaluation à l'échelle du SAT, (ii) difficulté à intégrer à l'échelle du SAT l'évaluation de changements différents dans plusieurs exploitations (ex : effet sur les BT de l'échange de culture entre deux agriculteurs). Les objets intermédiaires matériels permettent un échange de connaissances sur les objets conçus, leur efficacité anticipée et leurs

conditions de mise en œuvre. Cet échange de points de vue constitue, en soit, une première forme d'évaluation. Des approches d'évaluation qualitative à dire d'experts sont aussi couramment mobilisées en agronomie (Le Gal et al. 2011; Reau et al. 2012; Craheix et al. 2015), pour pallier le manque de connaissances formalisées quantitatives utilisables en évaluation, que ce soit des connaissances scientifiques génériques ou expérientielles locales. **Je fais l'hypothèse que ce type d'évaluation, plus adaptable par nature et moins longue à développer, peut mieux s'adapter à la conception d'innovations radicales et permet de mieux intégrer la complexité du système à reconcevoir dans ma thèse.** Néanmoins une approche d'évaluation à dire d'experts pose deux questions : (i) la fiabilité de l'évaluation et (ii) la question de la fixation des acteurs impliqués (com. pers., J.M. Meynard). En effet, pour le second point, si un acteur du régime sociotechnique dominant qui participe au verrouillage actuel est présent lors de la conception et de l'évaluation des innovations, ne risque-t-il pas de rejeter les innovations proposées par conservatisme, en lien avec ses effets de fixation ? Comment s'en prémunir ?

Par ailleurs, quel que soit le choix de l'approche d'évaluation, la question du choix des critères d'évaluation se pose. Ces critères doivent permettre d'évaluer si les objectifs du processus de conception ont été atteints. Dans le cadre d'une activité de coconception entre chercheurs et acteurs, il faudrait intégrer à la fois des critères des acteurs du système reconçu (qualité des conditions de travail, coût, réduction des dégâts) et des chercheurs (réduction de l'inoculum dans le sol). Cette manière de choisir les critères est d'autant plus pertinente quand les innovations impliquent plusieurs parties prenantes et échelles, rendant difficile pour le chercheur de connaître tous les critères d'évaluation pertinent pour les acteurs, sans les consulter directement.

En conclusion, une démarche d'évaluation qualitative à dire d'expert basée sur une hybridation des critères des acteurs et des chercheurs, me paraît adaptée à l'évaluation d'innovations conçues du système de culture au SAT. Cette approche me paraît également plus rapidement mobilisable dans le cadre de mon cas d'étude où les données manquent pour l'élaboration d'un modèle informatique « dur ». Néanmoins cette approche présente deux limites : sa fiabilité et le risque posé par le biais de fixation.

4. Présentation du cas d'étude

J'ai fait le choix de traiter ma problématique de thèse avec le cas de la gestion des bioagresseurs telluriques (BT) en maraîchage provençal¹⁸ sous abris, dans une démarche de recherche engagée dans l'action. Travailler ainsi présente l'avantage de produire et tester des cadres théoriques, analytiques et des méthodes pour répondre aux questions soulevées dans les parties précédentes (voir en particulier 1.3 et 2.3), sur une situation réelle, tout en aidant les acteurs de cette situation à avancer sur le problème traité.

Le choix de mon cas d'étude se justifie de plusieurs manières. Les BT en maraîchage sous abris sont un problème d'importance en Provence, en particulier les nématodes à galles (NàG) (4.1). Les systèmes de culture sous abris sont majoritairement intensifs en intrants de synthèse afin de rentabiliser les

¹⁸ J'entends Provence dans un sens assez large, recouvrant également le Gard provençal (voir Fig. 6)

infrastructures, et spécialisés sur quelques espèces dans une logique d'économie d'échelle. Cela pose un double problème : de pollution liée à l'usage des intrants, de vulnérabilité aux BT, en particulier en Provence (4.2). Le système agri-alimentaire maraîcher provençal est un bassin de production maraîcher d'envergure nationale et internationale, principalement structuré autour des circuits longs. Ceci conduit à une intégration forte des systèmes de production dans les filières et un accompagnement fort par la R&D et les politiques publiques, tous influençant les pratiques agricoles (4.3). Je détaille ces différents aspects dans les sections suivantes.

4.1. Les bioagresseurs telluriques, un problème d'importance en maraîchage sous abris provençal

Les systèmes maraîchers sous abris font face principalement à deux familles de BT : les champignons pathogènes telluriques (ex : *Rhizoctonia spp.*, *Fusarium spp.*, *Verticillium spp.*, *Sclerotinia spp.* et *Botrytis cinerea*) et les nématodes à galles (*Meloidogyne spp.*, NàG) (Gamliel and van Bruggen 2016). Ils causent des « fatigues de sol », ce qui regroupe un ensemble de symptômes pouvant provenir d'un BT ou d'un cortège de BT : fonte des semis ou des plants, plantes chétives et peu productives, jaunissement et flétrissement des feuilles, défauts visuels sur les fruits (Fig. 3). La difficulté de gestion tient au fait que le développement des populations est peu observable, puisque sous terre. Au moment où les dégâts deviennent visibles, les dommages peuvent représenter des pertes de rendement atteignant régulièrement 50% (Torres 2010 ; com. pers., C. Goillon, APREL¹⁹, 22/11/17).

Parmi les BT, j'ai choisi de centrer mon travail sur la gestion des nématodes à galles (NàG,) pour plusieurs raisons : (i) les NàG constituent le problème de sol le plus prégnant en Provence, (ii) les méthodes de lutte conventionnelles, essentiellement chimiques, présentent des risques de dommages sur la santé humaine et environnementale et sont peu durables (apparition de populations résistantes aux molécules nématicides, dés-homologation de la plupart des nématicides chimiques), (iii) la gestion des NàG mobilise essentiellement les mêmes leviers techniques que la gestion des champignons telluriques. Ce dernier point me permettra de développer des connaissances et des solutions sur la gestion des BT à l'échelle de l'exploitation et du SAT en travaillant spécifiquement sur le cas des NàG comme archétype. En utilisant la terminologie de la conception innovante, cela correspond à passer d'un inconnu désirable difficilement explorable (C0) à un sous ensemble de ce dernier plus facilement explorable (C0*). Cette "réduction" permet de produire indirectement des concepts et connaissances pour C0 en explorant C0* (voir Potier et al. 2015 pour un exemple de cette démarche). Cependant comme la correspondance des techniques de gestion des RKN et des champignons telluriques n'est pas totale, il conviendra de garder une vigilance sur la validité des résultats pour les autres BT.

Les nématodes à galles sont de petits vers de 0.4 à 1mm de long qui sont d'abord libres dans le sol puis se reproduisent en infectant les racines des plantes (Djian-Caporalino et al. 2009) (Fig. 4, Encadré 4). La virulence des nématodes à galles est rapportée aussi bien localement (Djian-Caporalino 2010)

¹⁹ Association Provençale de Recherche et d'Expérimentation Légumière, <https://aprel.fr/>

qu'internationalement (Gamliel and van Bruggen 2016). Principalement deux espèces²⁰ *Meloidogyne incognita* et *M. arenaria* touchent 30-40% des exploitations maraîchères en PACA (Djian-Caporalino 2010). Ils causent des pertes de rendement allant régulièrement de 10 à 50% selon la pression des nématodes et la vulnérabilité de la culture (ITAB 2015) et rendent parfois la parcelle non récoltable (ex : irrégularité trop forte des salades, Fig. 3a). Ils nécessitent parfois l'exclusion de certaines cultures (e.g., cucurbitacées) sur les parcelles infestées, voire de l'exploitation de certaines parcelles en été (Djian-Caporalino 2010). Plusieurs raisons expliquent leur développement très important sous abris en Provence (Djian-Caporalino et al. 2009) :

- Ils sont extrêmement polyphages, touchant principalement les *Asteracea* (salades), *Cucurbitacea* (melon, concombre, courgette), *Solanacea* (tomate, aubergine) et de nombreuses adventices
- Les formes de résistance ont une longue durée de vie (œufs)
- Des souches résistantes aux nématicides se développent
- Les conditions climatiques en Provence, et plus particulièrement sous abris, sont optimales pour leur développement : températures douces et humidité du sol souvent élevée. Le réchauffement climatique accélère le développement des populations de NàG qui désormais peuvent se multiplier y compris en période hivernale (Collange et al. 2011)



Figure 3 - a. Hétérogénéité des calibres de salade sur une parcelle infestée par des NàG (@Henri Ernout), **b.** Atteinte du melon par la fusariose réduisant sa qualité visuelle (@Blancard D. INRA).

²⁰ Sauf précision, dans la suite de la thèse, « nématodes à galles » fera référence à ces deux espèces

Encadré 4 - Cycle de développement des NàG

Après éclosion des œufs, en surface de la racine, plusieurs stades larvaires se succèdent. La larve de type L2 pénètre dans la racine et absorbe la sève de la plante hôte dans ses canaux de circulation. La larve se développe ainsi en adulte femelle qui grossit et provoque l'hypertrophie des cellules alentour, provoquant la formation de galles perturbant l'absorption racinaire et le fonctionnement de la plante. Elle se nourrit et grossit jusqu'au développement complet des œufs qu'elle porte. Elle les relâche ensuite en surface des racines, dans le sol. Les œufs sont une forme de résistance et peuvent survivre au froid et à la sécheresse jusqu'à 5-6 ans ; ils n'éclosent qu'en présence d'un environnement favorable (température, humidité, présence de racines de plantes hôtes). Le cycle complet dure de 3 à 8 semaines en fonction de la température. Les nématodes à galles se développent mieux sur les sols légers que sur les sols argileux ou riches en matière organique. Ils sont peu actifs durant la période hivernale quand les températures sont faibles (ITAB 2015). Enfin les nématodes à galles sont mobiles dans le sol de quelques centimètres horizontalement et sur environ un mètre verticalement (com. pers. C. Djian-Caporalino, 08/02/18). Ils ne sont déplacés de parcelle en parcelle que par la terre collée sur les bottes ou les outils de travail de sol, et éventuellement par les plantules si le terreau n'a pas été auparavant stérilisé.

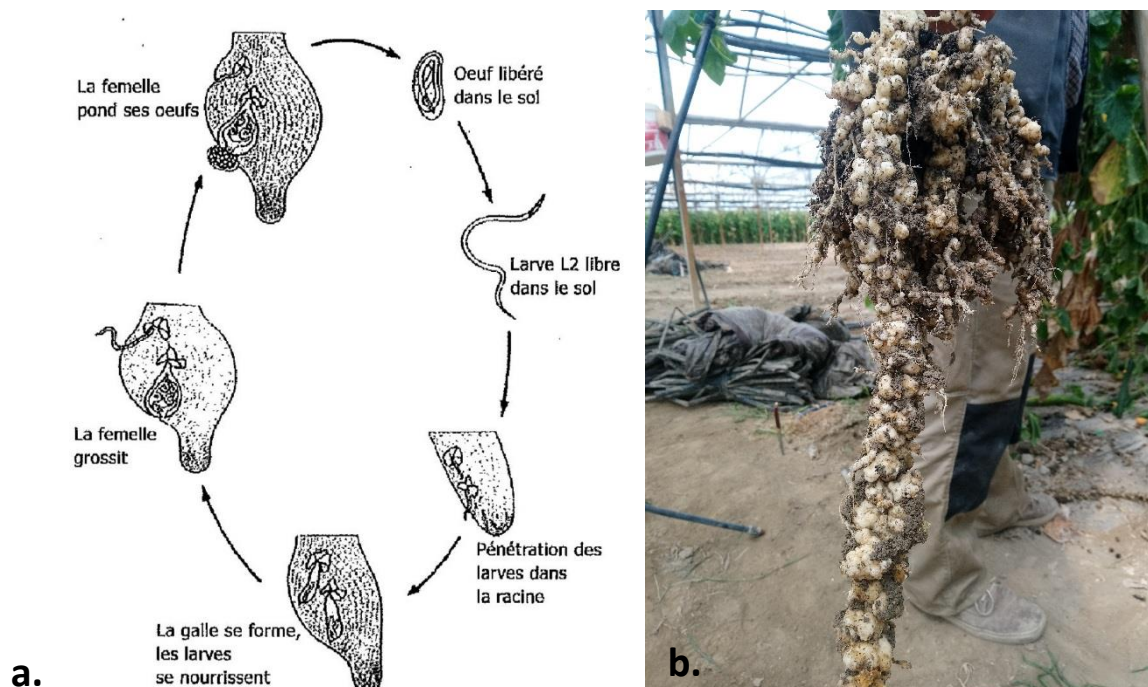


Figure 4 – a. Cycle de développement d'un nématode à galles *Meloidogyne* spp. (© C. Bertrand, GRAB 2001 cited in Torres 2010) **b.** Galles sur racines de concombre, ©Jean-Marc Llorens.

4.2. Systèmes de production maraîchers provençaux et modes de gestion des NàG

Les systèmes de culture sous abris maraîchers sont généralement constitués de rotations courtes avec, à l'échelle de l'année, de longues périodes de culture et des périodes d'interculture très courtes, rendant très difficile la gestion des NàG (Gamliel and van Bruggen 2016). En Provence, ces systèmes sont essentiellement composés de familles de culture sensibles aux NàG : *Solanaceae* (tomates, aubergine, poivrons) et/ou *Cucurbitaceae* (concombre, melon, courgette) en été, et *Asteraceae* en

hiver parfois avec deux cultures successives (Gauvrit 2008) (voir exemples Fig. 5). Les rotations en bio, bien que plus diversifiées, restent assez spécialisées sur les mêmes familles botaniques en culture d'été, et sont de ce fait également vulnérables aux NàG (Gamliel and van Bruggen 2016), (Fig. 5). Elles sont plus diversifiées en hiver (Fig. 5), y compris avec la possibilité d'intégrer des cultures mauvaises ou non hôtes des NàG lors des périodes d'activités de ces derniers.

Cette vulnérabilité des systèmes de culture aux NàG est corrigée en agriculture conventionnelle par l'utilisation de techniques de désinfection chimique ou physique des sols (Table 2) (Djian-Caporalino et al. 2009; Hoefflerlin et al. 2018). Des alternatives existent (Table 2), mais restent peu utilisées par rapport aux techniques conventionnelles. Elles sont en progression dans les systèmes de culture des exploitations pratiquant une agriculture « raisonnée » et fortement présentes dans les exploitations en agriculture biologique. La Table 2 résume ces différentes options techniques et la Figure 5 montre leur application dans certains systèmes de culture existants.

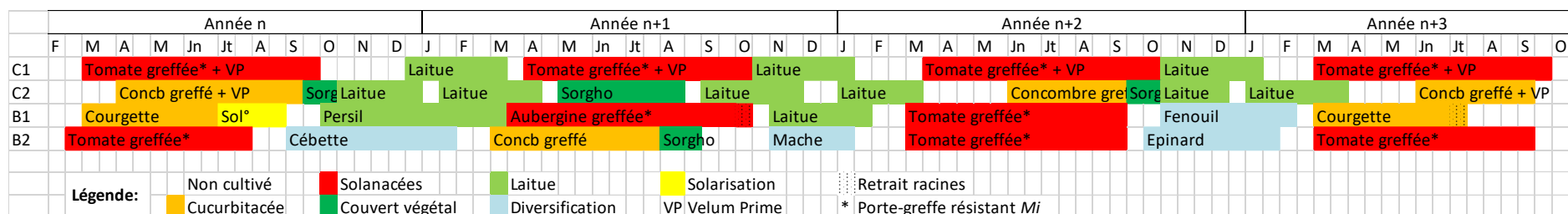


Figure 5 - Systèmes de culture type en maraîchage conventionnel sous abris (C1 et C2) et bios (B1 et B2) sur 4 années (GONEM).

Table 2 - Techniques de gestion des nématodes à galles utilisées ou en voie de développement en maraîchage sous abris provençal. L'étoile * indique qu'un temps d'attente significatif (de quelques semaines à 1 mois selon les cultures) doit être respecté avant l'implantation d'une nouvelle culture. Le niveau de spécificité est qualifié par rapport aux auxiliaires de culture, en fonction du mécanisme d'action de la technique. Il est qualifié de non spécifique quand la technique tue toute forme de vie sans résistance particulière, peu spécifique quand elle tue une diversité importante d'organismes, spécifique quand elle cible spécifiquement les NàG (*Meloidogyne arenaria* et *incognita*).

Leviers techniques	Techniques	Spécificité aux NàG	Autorisé en bio
Traitements nématicides	La fumigation chimique * consiste à injecter dans le sol recouvert d'un film plastique une substance de synthèse y produisant un gaz biocide. Les produits encore homologués en 2017 sont le Metam-Sodium et le Dazomet (Hoefferlin et al. 2018).	Non-spécifique	Non
	Le fluopyram est une substance biocide inhibant la chaîne respiratoire cellulaire, dont l'efficacité a été démontrée sur les nématodes et champignons telluriques. Il s'applique par mélange dans l'eau d'irrigation du goutte-à-goutte. Le produit encore homologué en 2017 est le Velum® Prime. (Heiken 2017; Hoefferlin et al. 2018).		
Désinfection thermique	La désinfection vapeur consiste à provoquer l'augmentation de la température du sol (30 premiers cm) au-delà de 80°C pendant 3 à 8h, par l'injection de vapeur d'eau dans le sol (Djian-Caporalino et al. 2009).	Peu spécifique	Oui
	La solarisation consiste à provoquer l'augmentation de la température des 25 premiers cm du sol par capture du rayonnement solaire à l'aide d'une bâche plastique, pasteurisant ainsi le sol. Ce procédé vise le maintien d'une température d'environ 40°C pendant 45j. Elle nécessite un travail du sol et un arrosage à saturation,		

	avant l'application de la bâche, la période idéale se situant entre mi-juin et juillet en Provence (Gamliel and van Bruggen 2016; Hoefflerlin et al. 2018).		
Désinfection biologique	La biofumigation* consiste à produire et enfouir des couverts qui vont relâcher des composés nématocides après enfouissement. Les plus utilisés sont le sorgho, les espèces de la famille des alliacées et des brassicacées (Djian-Caporalino et al. 2009; Hoefflerlin et al. 2018).	Peu spécifique	
		Peu spécifique	
	Les biopesticides* tels que l'extrait d'ail sont des substances extraites de produits « naturels » (par opposition à « synthétique ») qui ont des actions biocides sur les NàG et d'autres organismes (Hoefflerlin et al. 2018).	Peu spécifique	
Casser le cycle de développement	La résistance variétale²¹ sur les espèces commerciales permet d'empêcher la multiplication des NàG pendant leur période de production. Les espèces réputées mauvaises ou non-hôtes des NàG sont la mâche, les alliacées, les brassicacées. Les gènes de résistance pour les espèces sensibles sont rares : gène <i>Mi</i> (tomate, porte-greffe aubergine; inactivé à 32°C), gène <i>Me1</i> et <i>Me3</i> (poivron), <i>Solanum Torvum</i> (porte-greffe aubergine). (Djian-Caporalino et al. 2009; Villeneuve et al. 2013).	Spécifique	
	Le couvert végétal intercalaire résistant fonctionne de la même manière, avec des cultures non commerciales. Peu d'espèces et variétés adaptées à la culture sous serre ont été identifiées. Un exemple est le Sorgho <i>Jumbo Star</i> (Djian-Caporalino 2018).	Spécifique	
Entretien de la fertilité des sols	L'apport (massif) d' amendements organiques* permet de stimuler les antagonistes des NàG dans le sol (ex : champignons prédateurs, compétiteurs pour les ressources). En grande quantité, un effet direct nématocide dû à l'émission de composés volatils peut avoir lieu (Djian-Caporalino et al. 2009; Djian-Caporalino 2018).	Peu spécifique	
	Les produits de biocontrôle permettent d'introduire des antagonistes connus des nématodes dans le sol (Djian-Caporalino et al. 2009).	Spécifique	

²¹ Cette résistance est rarement totale pour les NàG, ce qui nous conduit à utiliser la précaution langagière : mauvais ou non-hôte.

Piégeage des nématodes	Les plantes pièges sensibles sont cultivées en couverts végétaux intercalaires. Etant sensibles, elles attirent les nématodes et doivent ensuite être détruites avant la fin du cycle de développement des NàG (Hoefferlin et al. 2018).	Spécifique	
	Les plantes pièges résistantes vont laisser les larves des NàG pénétrer dans la racine mais vont les empêcher de terminer leur cycle (ex : en relâchant des composés toxiques) (ex: piment résistant - Navarrete et al. 2016).	Spécifique	
Prophylaxie	Le nettoyage des outils et bottes permet de limiter la propagation des nématodes d'une parcelle à l'autre (Djian-Caporalino et al. 2009).	/	
	L' arrachage des racines des plantes infectées pourrait permettre d'empêcher la fin du cycle des nématodes dans les racines (Hoefferlin et al. 2018).	/	
	Le décalage du calendrier de culture consiste à décaler l'implantation des cultures d'hiver sensibles après mi-October pour éviter la période d'activité des NàG et donc leur multiplication (Hoefferlin et al. 2018).	/	
	Le désherbage permet d'éviter la reproduction des nématodes sur les adventices qui sont souvent hôtes des NàG (Djian-Caporalino et al. 2009)	/	

À l'échelle de l'exploitation maraîchère, la multiplicité des cultures et des opérations culturales et la production de légumes toute l'année grâce aux abris sont à l'origine d'une charge de travail et d'une charge mentale importante pour l'exploitant (Dupré et al. 2017). Elles génèrent un grand besoin de main d'œuvre ainsi qu'un besoin de formation pour l'agriculteur et ses employés (Gauvrit 2008; Navarrete et al. 2015). En particulier, la culture sous abris requiert un niveau de technicité élevé (Gauvrit 2008). Enfin le niveau d'investissement nécessaire pour installer des abris hauts fait que les surfaces sous abris sont souvent un facteur limitant sur les exploitations. Dans ce contexte, l'introduction de techniques de gestion des NàG alternatives à la solution chimique génère une complexité organisationnelle au niveau de l'exploitation *a priori* difficile à gérer (Lefèvre et al. 2020).

En conclusion, les systèmes de culture maraîchers provençaux sont particulièrement vulnérables aux nématodes. Un panel de solutions techniques permet de les contrôler pour pallier cette vulnérabilité (Table 2). Néanmoins, l'utilisation des techniques basées sur des intrants chimiques non spécifiques aux NàG est encore massive en Provence. Des éléments au niveau de l'exploitation rendent *a priori* difficile l'introduction de techniques alternatives. Je fais l'hypothèse que la forte intégration des systèmes de production maraîchers sous abris dans le système agri-alimentaire provençal et en particulier la filière participent également à ce choix de pratique.

4.3. Le système agri-alimentaire maraîcher provençal

➤ Importance économique du bassin maraîcher provençal

Le Sud-Est de la France constitue l'un des 4 grands bassins de production maraîchère français (Jeannequin 2017) avec 18% des exploitations légumières (5620 exploitations) et 9% de la SAU légumière (18 910ha) de France en PACA et Languedoc Roussillon (Agreste, 2010). 23% des surfaces de maraîchage français plein air ou sous abris bas (5820ha) et 40% de surfaces sous serre ou abris haut (3010ha) se situent dans ces deux régions (Agreste, 2010). Pour le Languedoc Roussillon, l'essentiel de cette production est réparti essentiellement entre le Gard Provençal (partie Est) et la région de Perpignan (Fig. 6). En PACA, 65% des exploitations en OTEX²² maraîchage cultivent sous abris (Agreste, 2010). La Provence constitue **donc un bassin économique maraîcher important avec une spécialisation forte en culture sous abris (Fig. 6), ce qui en fait un cas d'étude intéressant.**

➤ Intégration des systèmes de production maraîcher sous abris dans le système agri-alimentaire provençal

Le bassin maraîcher provençal est historiquement majoritairement tourné vers l'expédition vers les grands bassins de consommation du Nord de la France et vers l'Europe, donc vers les circuits longs. La commercialisation des légumes frais en circuit long pose des contraintes importantes en matière de qualité visuelle, sanitaire (ex : résidus de pesticides), calendrier de culture, logistique (ex : risque de choc) et de conservation, en lien avec les acteurs de l'aval de la filière (Navarrete et al. 2006; Bernard de Raymond 2013; Lefèvre et al. 2020). Les cultures étant plantées et non semées pour réduire les cycles de culture, l'achat de plants peut également poser des contraintes en matière d'accessibilité en choix d'espèces et de variétés, en fonction de la stratégie de production des pépiniéristes. Les systèmes

²² Classification des systèmes de production de l'INSEE

de production maraîchers provençaux en circuit long sont donc fortement intégrés dans la filière. Enfin la production tout au long de l'année rend les maraîchers et les acteurs de leur environnement sociotechnique peu disponibles, **constituant un défi pour la co-conception** (Navarrete et al. 2017). Le réseau R&D accompagnant le maraîchage sous abris est important en Provence, grâce à la présence et l'engagement de multiples acteurs sur le territoire : conseillers de chambres d'agriculture départementales, conseillers de groupes techniques (CETA, CIVAM), conseillers privés, centre technique (CTIFL), plateformes d'expérimentation (APREL, GRAB), centre de recherche (INRAE).

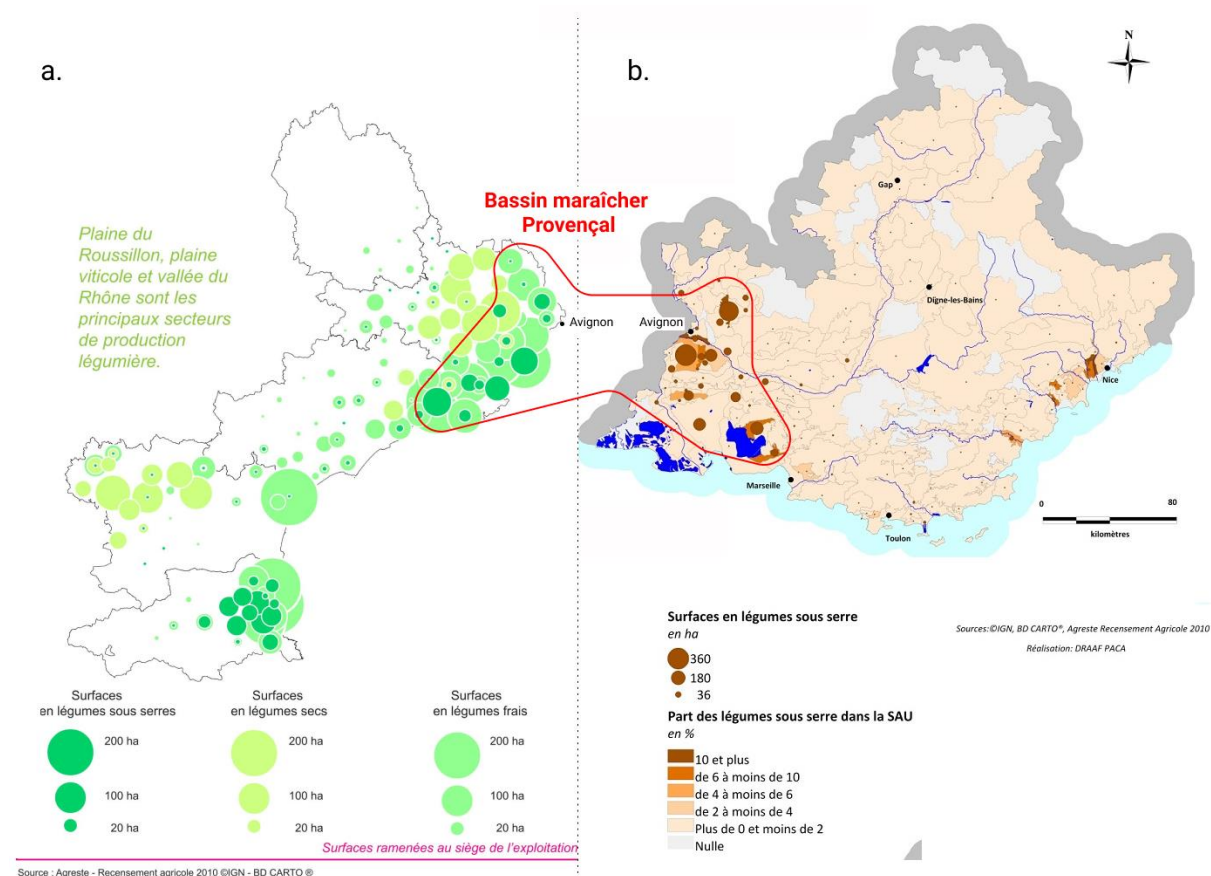


Figure 6 - Bassin maraîcher provençal produisant essentiellement sous abris autour d'Avignon, **a.** côté Languedoc Roussillon (Agreste 2012), **b.** côté PACA (RGA 2010). L'essentiel du bassin sous abris est situé dans l'espace « Rhône-Durance-Vaucluse » (AURAV 2015)

Je fais le choix de travailler spécifiquement sur les exploitations en circuit long, en faisant l'hypothèse que ce sont celles subissant le plus les déterminants du SAT sur leur choix de production, du fait de leur importance économique et leur intégration dans la filière. Les exploitations commercialisant en circuit court ont *a priori* plus de marges de manœuvre pour mettre en œuvre des techniques agroécologiques de gestion des nématodes à galles, telles que la diversification des cultures (Lefèvre et al. 2020)

➤ **Le maraîchage sous abris Provençal, une diversité de systèmes de production et de circuits de commercialisation**

Le modèle de production et de commercialisation dominant décrit ci-dessus n'a pas empêché la genèse d'une diversité de systèmes de production et de modes de commercialisation au sein de l'espace « Rhône-Durance-Vaucluse » (Fig. 6).

De nombreuses exploitations combinent deux ateliers de production maraîchère : (i) un en plein champ et (ii) un sous abris (Ctifl 2013). Un petit nombre d'entre elles, essentiellement en production Bio, associent d'autres ateliers de production, e.g., élevage, grandes cultures, viticulture (Marguerie 2011; Bio de Provence 2012). Cette diversité de systèmes de production s'accompagne d'une diversité de circuits de commercialisation et d'opérateurs commerciaux : (i) circuit long via grossistes, expéditeurs, Marché d'Intérêt National (MIN), centrales d'achat de grandes et moyennes surfaces (GMS), coopératives, (ii) circuit court (zéro ou un intermédiaire) via AMAP, magasins à la ferme, magasins spécialisés et GMS (Marguerie 2011; Bio de Provence 2012; Bernard de Raymond 2013). Les exploitations agricoles commercialisent le plus souvent leur production sur un seul des deux circuits, via plusieurs opérateurs. Une part moins importante commercialise à la fois en circuit court et en circuit long. Les relations commerciales entre maraîchers et metteurs en marché sont variées : au cas par cas (ex : via le MIN), en contractualisation longue durée sur une partie de la production (ex : avec certaines GMS ou des usines de quatrième gamme) ou sur la quasi-totalité de la production (ex : avec certaines coopératives). Les attentes des acheteurs en termes de quantité et de qualité sont également diverses : les GMS ont des exigences importantes sur la qualité visuelle, demandent des volumes importants de qualité homogène, avec des variétés standards. À l'opposé, la commercialisation en AMAP permet de vendre des volumes plus restreints par légume et avec une qualité visuelle plus hétérogène.

De plus, le territoire comporte une proportion d'exploitations agricoles bio maraîchères de 12,8% de la Surface Agricole Utile en PACA en 2015 (Bio de Provence 2016) et en constante augmentation depuis. Les maraîchers bio tendent à développer des systèmes de culture plus innovants, par exemple avec une plus grande diversité culturale ou mobilisant des techniques alternatives nouvelles (cultures pièges sensibles) (Djian-Caporalino 2010; Furnion 2014; Rahmann et al. 2016). À l'échelle du SAT, les secteurs bio et conventionnel sont en partie indépendants, au niveau de la production, mais aussi de l'aval de la filière avec des acteurs spécifiques. Les acteurs traditionnels de la R&D (chambres d'agriculture, INRAE, CTIFL) travaillent à la fois sur la production bio et conventionnelle. Il existe un réseau de R&D spécialisé en bio : les groupements d'agriculteurs biologiques et le groupe de recherche en agriculture biologique (GRAB), qui est basé à Avignon. Le secteur bio tend à développer des organisations multi-acteurs innovantes par rapport au système dominant conventionnel (Rahmann et al. 2016). Par exemple, le réseau Biocoop a développé une organisation de la commercialisation et de sa gouvernance originale, prenant directement en compte les contraintes et intérêts des agriculteurs (Lamine 2014).

Ces éléments m'ont conduit à mener l'étude sur une diversité de systèmes de production et de commercialisation et en particulier sur le secteur bio et le secteur conventionnel. En effet, cela constitue un atout pour rapprocher des éléments variés de connaissance de la parcelle au SAT, et

ainsi favoriser la générativité lors de l'exploration de solutions. Ainsi, on peut faire l'hypothèse que les innovations du secteur bio peuvent inspirer l'innovation dans le secteur conventionnel. Inversement, une partie du secteur maraîcher biologique évolue vers une structuration proche du secteur conventionnel (Navarrete 2009). Cette « conventionnalisation » du secteur bio, observée à l'international (Buck et al. 1997; Ramos García et al. 2017), fait que l'étude du maraîchage conventionnel est intéressante pour saisir les problématiques auxquelles le secteur bio risque de se trouver confronté.

En conclusion le cas d'étude de la gestion des nématodes à galles en maraîchage provençal, en production biologique et conventionnelle, est un problème d'importance en termes de développement durable (importance économique, sociale et écologique). De plus ce cas d'étude permet (i) de traiter la question de l'accompagnement au changement de pratiques dans un contexte où les échelles de la parcelle, de l'exploitation et du SAT ont chacune et collectivement un rôle prépondérant dans le choix des pratiques, (ii) d'explorer les solutions pour la gestion agroécologique de la santé des sols en maraîchage sous abris à travers un cas d'étude représentatif des problématiques de gestion des BT et en particulier des NàG.

5. Positionnement de la thèse

Reprenons le problème scientifique initial : comment accompagner le changement de pratiques vers une protection agroécologique des cultures dans les systèmes de culture et de production tout en levant les freins à leur changement au niveau de la filière et du territoire ? Je traite ce problème en étudiant le cas de la gestion des bioagresseurs telluriques, et plus particulièrement des nématodes à galles, en maraîchage sous abris provençal bio et conventionnel orienté vers les circuits longs. Dans les sections précédentes, à partir de la littérature existante, j'ai identifié les enjeux théoriques et méthodologiques clés auxquels il me faut répondre afin de traiter ce problème. C'est sur cette base que je définis mes questions de recherche dans les sections suivantes. Le premier enjeu est de développer un cadre d'analyse opérationnel et une méthode permettant de caractériser les déterminants des pratiques de gestion des NàG aux différentes échelles (5.1). Le second enjeu est de rassembler et formaliser la connaissance sur les innovations existantes pour nourrir le processus de conception (5.2). Le troisième enjeu est de rendre accessible les connaissances acquises aux parties prenantes du problème pour initier la conception des solutions (5.3). Le quatrième et dernier enjeu que je traiterai dans cette thèse est d'organiser le processus de conception et d'évaluation multi-échelle de solutions (5.4).

5.1. Analyse sociotechnique multi-échelle des déterminants des pratiques pour initier la conception

L'étude de la littérature agronomique nous a montré que les pratiques agricoles dépendent de **déterminants** à 3 échelles emboîtées : la parcelle, l'exploitation et le système agri-alimentaire

territorial (SAT) (1.1). De plus, une quatrième échelle globale peut avoir une influence déterminante sur les pratiques : le paysage sociotechnique (1.2). Ces déterminants peuvent freiner le changement de pratiques (**freins**) ou le favoriser (**leviers**). Pour chacune des trois échelles, des **ressources** peuvent également être mobilisées pour agir sur les déterminants. Ces déterminants, leurs interactions et évolutions sont cadrés par des processus sociotechniques. L'analyse sociotechnique multi-échelle de ces déterminants est donc nécessaire, afin d'identifier les freins au changement de pratiques, les ressources et leviers permettant de les dépasser, ainsi que les parties prenantes du problème et leur rôle. En effet, une telle analyse permettrait l'identification des innovations existantes (traques aux innovations, 3.2., 5.2). D'autre part, elle permettrait d'initier la conception de telles innovations pour faciliter le changement vers des pratiques de gestion durable des nématodes (2.1, 5.3, 5.4) (Fig. 7). Or, une telle analyse n'a pas encore été réalisée sur des questions de protection des cultures, ni spécifiquement en maraîchage. **De plus, à ma connaissance, il n'existe pas de méthode décrite précisément pour analyser de manière multi-échelle les freins, leviers et ressources jouant un rôle dans le changement de pratiques, en rentrant par les déterminants et les processus sociotechniques cadrant leur évolution (1.3). Enfin, à ce jour, très peu d'analyses sociotechniques ont été menées pour préparer une traque aux innovations et une démarche de conception de système agricole innovant**, ce qui débouche sur ma première question de recherche.

→ **Question de recherche N°1: Quels déterminants et processus sociotechniques sous-jacents empêchent ou favorisent le changement vers des pratiques agroécologiques de gestion des nématodes à galles en maraîchage provençal sous abris, et comment les analyser ?**

Cette question générale appelle plusieurs sous-questions :

- Quelles sont les parties prenantes de ce changement de pratiques et quels sont leurs rôles respectifs ?
- Quelles différences entre la diversité de profils d'exploitation et entre secteur bio et conventionnel ?
- Quels sont les leviers sociotechniques pour lever les freins et le verrouillage bloquant le changement de pratiques ?
- Quels sont les apports de l'analyse sociotechnique pour la réalisation d'une traque aux innovations et d'un processus de co-conception multi-échelle de solutions et d'innovations couplées ?

Afin de répondre à ces questions, j'ai réalisé une analyse sociotechnique sur le fonctionnement du système agri-alimentaire maraîcher provençal et sa gestion des nématodes à galles. Le corpus de données collectées consiste en l'étude de la littérature scientifique et technique, une série d'enquêtes des parties prenantes de la gestion des NàG, l'observation participante de réunions organisées par ces parties prenantes, l'animation d'ateliers multi-acteurs centrés sur la gestion des NàG (Fig. 7). J'ai développé un cadre d'analyse multi-échelle des déterminants des pratiques agricoles et des processus sociotechniques sous-jacents, sur la base de la littérature agronomique et de la littérature sur la théorie des transitions. J'ai ensuite appliqué ce cadre d'analyse au corpus de données collectées.

La question de recherche N°1 est traitée dans le chapitre 1 de la partie Résultats (Partie B) et prend la forme d'un article accepté sous réserve de modifications à *Agronomy for Sustainable Development*.

5.2. Traque aux innovations multi-échelles pour collecter et mettre en forme des connaissances utiles à la conception

L'étude des pratiques innovantes des agriculteurs est une source pertinente de connaissances pour la conception à l'échelle de la parcelle et de l'exploitation agricole (3.2, 5.3, 5.4). Jusqu'à présent, l'essentiel des traques aux innovations ont été réalisées à l'échelle du système de culture et de l'exploitation. A ma connaissance, elles n'ont pas été réalisées sur des innovations à l'échelle du SAT couplées ou pouvant utilement être couplées avec des pratiques alternatives afin de dépasser les freins à leur mise en œuvre. Je fais ainsi l'hypothèse que l'étude d'innovations existantes à l'échelle de l'exploitation et du SAT, liées aux pratiques de protection des cultures, permettra d'inspirer la conception multi-échelle d'innovations adaptées à mon cas d'étude (Fig. 7). Cette « traque aux innovations » peut en effet apporter des éléments de connaissances « indépendants » sur lesquels la conception d'innovation radicales peut s'appuyer (3.1). **Cependant, à ma connaissance, aucun travail d'agronome ne porte sur l'étude d'innovations couplées existantes pour faciliter le changement de pratiques.** Il est donc nécessaire d'adapter les méthodes existantes de traque aux innovations, ce qui débouche sur ma deuxième question de recherche.

→ **Question de recherche N°2: Quelles sont les innovations existantes à l'échelle du SAT pouvant faciliter la mise en œuvre des pratiques de gestion agroécologiques des NàG en maraîchage sous abris Provençal et comment les caractériser ?**

Cette deuxième question soulève plusieurs sous-questions :

- Quels sont les leviers sociotechniques mobilisés dans les innovations techniques, organisationnelles et institutionnelles permettant la mise en œuvre de pratiques de la protection agroécologique des cultures légumières ?
- Comment sont-ils concrètement mis en œuvre ?
- Est-ce que les connaissances produites sont suffisamment génériques pour être réutilisées pour la conception dans d'autres contextes ?

J'ai traité la question N°2 grâce aux données issues d'un travail d'enquête à l'échelle nationale et d'analyse de la littérature. Ce travail fut réalisé par Claire-Lise Peyras dont j'ai co-encadré le stage. Il a permis d'identifier quarante cas d'innovation couplées dans des systèmes agri-alimentaires légumiers territoriaux permettant directement ou indirectement la mise en œuvre de pratiques de protection agroécologique des cultures. Une analyse compréhensive a permis d'identifier les leviers sociotechniques mobilisés dans les innovations.

La question de recherche N°2 est traitée dans le chapitre 2 de la partie Résultats (Partie B) et prend la forme d'un article à soumis à la revue *Agricultural systems*.

5.3. Opérationnalisation de l'analyse sociotechnique et de la traque aux innovations par un jeu sérieux pour initier la conception

Pour mener à bien la conception participative des innovations couplées avec les parties prenantes du problème étudié, il est essentiel de partager avec eux les connaissances acquises lors de l'analyse sociotechnique (5.1) et de la traque aux innovations (5.2) (Fig. 7). Ces parties prenantes sont peu disponibles (4.3). De plus, le collectif de conception doit partager des objectifs, des attentes, des connaissances (2.3) et une représentation commune du problème alors que les membres n'ont *a priori* pas de relation hiérarchique et des intérêts différents voire divergents. Un dispositif est donc nécessaire pour faciliter le partage des connaissances acquises lors de l'analyse sociotechnique et de la traque, tout en constituant un groupe de conception avec des caractéristiques hétérogènes.

L'analyse de la littérature dans les parties précédentes montre que le jeu sérieux (3.4.) est un outil permettant de partager efficacement des connaissances, de construire une représentation commune d'un problème complexe et de faciliter l'échange et la compréhension des différents points de vues des parties prenantes du problème. Le jeu sérieux permet aussi de faire sortir les participants de leur cadre de pensée habituelle, favorisant ainsi la « défixation », et d'explorer, en jouant, des alternatives au modèle dominant actuel. Je fais donc l'hypothèse qu'un jeu sérieux pourrait permettre de conjointement : (i) partager et discuter la représentation du problème construite lors de l'analyse sociotechnique, (ii) former un collectif de travail avec les parties prenantes, (iii) initier l'exploration d'innovations couplées telles que celles identifiées lors de la traque aux innovations. **À ma connaissance, aucune étude agronomique à ce jour ne mobilise de jeu sérieux permettant de remplir conjointement ces trois objectifs.** Cela m'amène donc à formuler ma troisième question de recherche.

→ **Question de recherche N°3: Quelle forme de jeu sérieux et quelle utilisation permettent-elles de partager les résultats d'une analyse sociotechnique et initier l'exploration multi-échelle de solutions avec les parties prenantes du problème agricole complexe étudié ?**

Pour répondre à cette question, j'ai conçu et développé le jeu de rôle sérieux *Soilh&co* modélisant la gestion des NàG dans le secteur agri-alimentaire maraîcher Provençal actuel, en conventionnel et en bio, et facilitant l'exploration d'alternatives au modèle de gestion dominant (Fig. 7). Avec de nombreux collègues, nous avons organisé un atelier de travail avec un collectif de 17 parties prenantes de mon cas d'étude au cours duquel nous avons testé le jeu et conçu collectivement des solutions. Les résultats ont été analysés de manière compréhensive et à l'aide d'une grille d'analyse *ad hoc* afin d'évaluer la capacité du jeu à partager les résultats de l'analyse sociotechnique et d'initier la conception.

La question de recherche N°3 est étudiée dans le chapitre 3 de la partie Résultats (Partie B) et prend la forme d'un article à soumettre.

5.4. Chapitre 4 : Co-conception multi-échelle de solutions pour faciliter le changement vers des pratiques agroécologiques de gestion des nématodes à galles

L'accompagnement du changement vers une gestion agroécologique des NàG est un problème de conception (2) qui doit être réalisé du système de culture au SAT et de manière participative (2.3). Ce dispositif de conception multi-échelle doit permettre d'accompagner simultanément la collaboration entre les parties prenantes, la gestion des connaissances et l'exploration créative de nouvelles solutions (3.1). Il s'appuie sur les résultats des démarches mobilisées précédemment (5.1, 5.2, 5.3 ; Fig. 7). La littérature analysée précédemment identifie des éléments méthodologiques : mobiliser la théorie de la conception innovante pour faciliter la conception d'innovations radicales (3.1), s'inspirer des méthodes de conceptions participatives existantes (2.2, 3.4, 3.4), favoriser l'échange de connaissances entre acteurs, chercheurs et non-chercheurs, pour une démarche d'innovation ouverte (2.3). **À notre connaissance, ces éléments n'ont encore été que rarement combinés dans un processus de conception d'innovations couplées visant à accompagner le changement vers des pratiques agroécologiques de la parcelle au SAT.** De plus, le cas de la gestion des nématodes à galles en maraîchage provençal apporte des questions spécifiques. La faible disponibilité des acteurs y est accrue du fait d'un travail au champ toute l'année (4.3). L'interaction entre les acteurs de la filière est renforcée du fait de l'utilisation de plants et la commercialisation de produits frais (4.3). Enfin, la diversité des systèmes de production y est grande, avec une présence relativement forte de l'agriculture biologique (4.3). Aussi je formule ma quatrième et dernière question de recherche :

→ Question de recherche N°4 : Quelles solutions pour une gestion agroécologique des NàG étendue à la majorité du secteur maraîcher provençal et comment les concevoir et les évaluer à de multiples échelles?

Cette quatrième question soulève plusieurs sous-questions :

- Comment mener conjointement l'acquisition et la circulation de connaissances entre concepteurs et l'exploration de concepts d'innovations couplées ?
- Quelles parties prenantes mobiliser ?
- Comment organiser la conception avec des parties prenantes diverses, sans liens hiérarchiques, avec des intérêts différents ?
- Quels outils mobiliser pour accompagner la conception et comment les utiliser ?
- Quels effets potentiels de ces concepts d'innovations pour la gestion agroécologique des RKN ? Quels autres effets sur le SATS ? Comment les évaluer ?

Pour répondre à ces questions, j'ai développé une démarche originale de co-conception basée sur trois types d'ateliers réalisés successivement pendant un an et demi. J'ai tout d'abord mobilisé une diversité de maraîchers dans deux ateliers (de type 1), puis des représentants de l'ensemble des parties prenantes dans les deux ateliers suivants (de type 2 et 3, Fig. 8). L'organisation de ces ateliers a été inspirée par la théorie C-K et la démarche KCP. J'ai conçu les dispositifs pour favoriser la collaboration entre acteurs, la gestion des connaissances et l'exploration créative de solutions alternatives grâce à plusieurs objets intermédiaires dont le jeu sérieux évoqué ci-dessus (5.3.). Sur la base des données

collectées au cours de l'analyse sociotechnique, j'ai identifié les critères d'évaluation d'innovations couplées pertinents pour les différentes parties prenantes, puis je les ai organisés en grille d'évaluation et mobilisés lors des ateliers. Enfin la démarche a été évaluée sur la base des retours des participants.

La question de recherche N°4 est étudiée dans le chapitre 4 de la partie Résultats (Partie B).

5.5. Plan et déroulé de la thèse

Le plan de thèse décrit ci-dessus, ainsi que l'articulation entre les différents chapitres, est résumé dans la Figure 7 ci-dessous. La démarche méthodologique sera détaillée dans chaque chapitre. Le déroulé chronologique des différentes étapes de ma thèse est décrit dans la Figure 8.

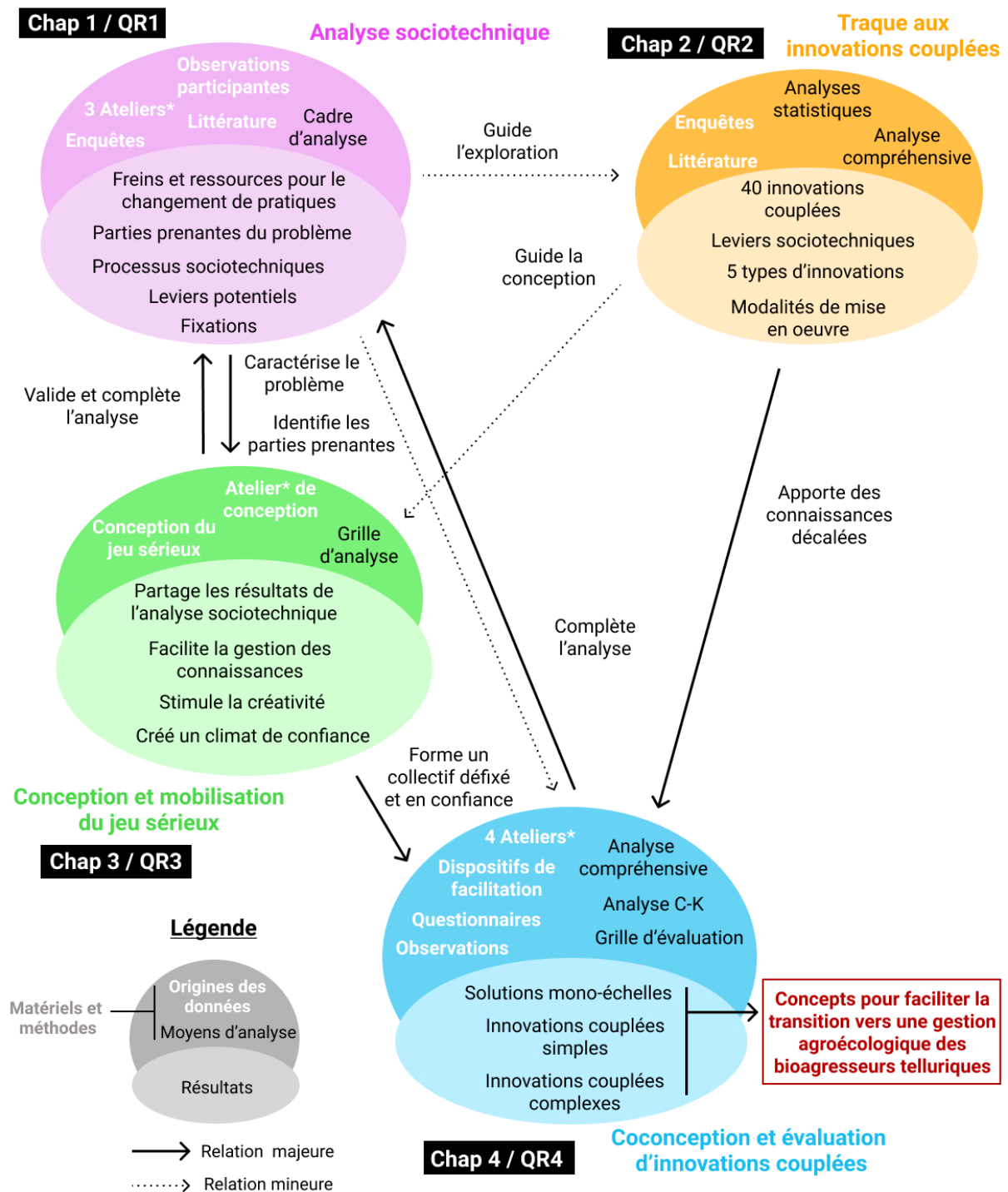


Figure 7 - Plan de thèse et articulation entre les différents chapitres. L'astérisque * après la mention des ateliers signifie que ces ateliers sont les mêmes : l'atelier où le jeu sérieux a été utilisé est un de ceux qui ont alimenté l'analyse sociotechnique, qui sont également les ateliers de conception.

		2017			2018												2019												2020													
Tâches principales		10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
Analyse sociotechnique	Enquêtes préliminaires																																									
	Enquêtes ciblées																																									
	Observations participantes																																									
	Ateliers* (détail ci-dessous)																																									
	Analyse des données																																									
Traque aux innovations	Traque initiale																																									
	Stage de Claire-Lise (récolte des données et première analyse)																																									
	Analyse approfondie																																									
Jeu de rôle sérieux	Conception																																									
	Tests 1 avec collègues																																									
	Atelier avec parties prenantes ^{JS}																																									
	Analyse des données																																									
Coconception	Préparation At1G1*																																									
	Analyse des données																																									
	At1G1+Prep At1G2*																																									
	Analyse des données																																									
	At1G2+Prep At2* ^{JS}																																									
	Analyse des données																																									
	At2+PrepAt3																																									
	Analyse des données At3																																									

Figure 8 - Calendrier de thèse. Les périodes de travail correspondant à la tâche sont en couleur. Ils représentent des intervalles. Ainsi je n'ai pas fait des observations participantes chacun des mois indiqués mais régulièrement tout au long de cette période. L'étoile * désigne les ateliers mobilisés dans l'analyse sociotechnique. JS signifie la présence du jeu sérieux dans l'atelier. AtX=Atelier n°X, GY=Groupe Y.

Partie B. Chapitres de résultat

Chapitre 1. Analyse sociotechnique des pratiques de gestion des nématodes à galles en entrant par leurs déterminants de la parcelle au paysage sociotechnique

Accompagner le changement de pratiques vers une gestion agroécologique des nématodes à galles nécessite de comprendre : (i) quels sont les freins que rencontrent les maraîchers pour changer leurs pratiques, (ii) quelles sont les ressources existant sur le territoire pour les aider à surmonter ces freins, (iii) quels sont les processus sous-jacents expliquant ces freins, ressources et leurs interactions, (iv) quelles sont les parties prenantes jouant un rôle dans le choix de ces pratiques et (v) quels sont les leviers potentiels à mobiliser pour lever les freins. Pour ce faire, dans ce chapitre, je propose un cadre d'analyse opérationnel des déterminants des pratiques agricoles et je l'applique sur mon cas d'étude (Fig. 9). Ce travail permet de préparer d'une part le travail de traque aux innovations (Chap. 2) et d'autre part celui de conception multi-échelle de solutions (Chap. 3 et 4) (Fig. 9).

Ce chapitre est sous la forme d'un article en anglais accepté avec modifications par le journal *Agronomy for Sustainable Development*.

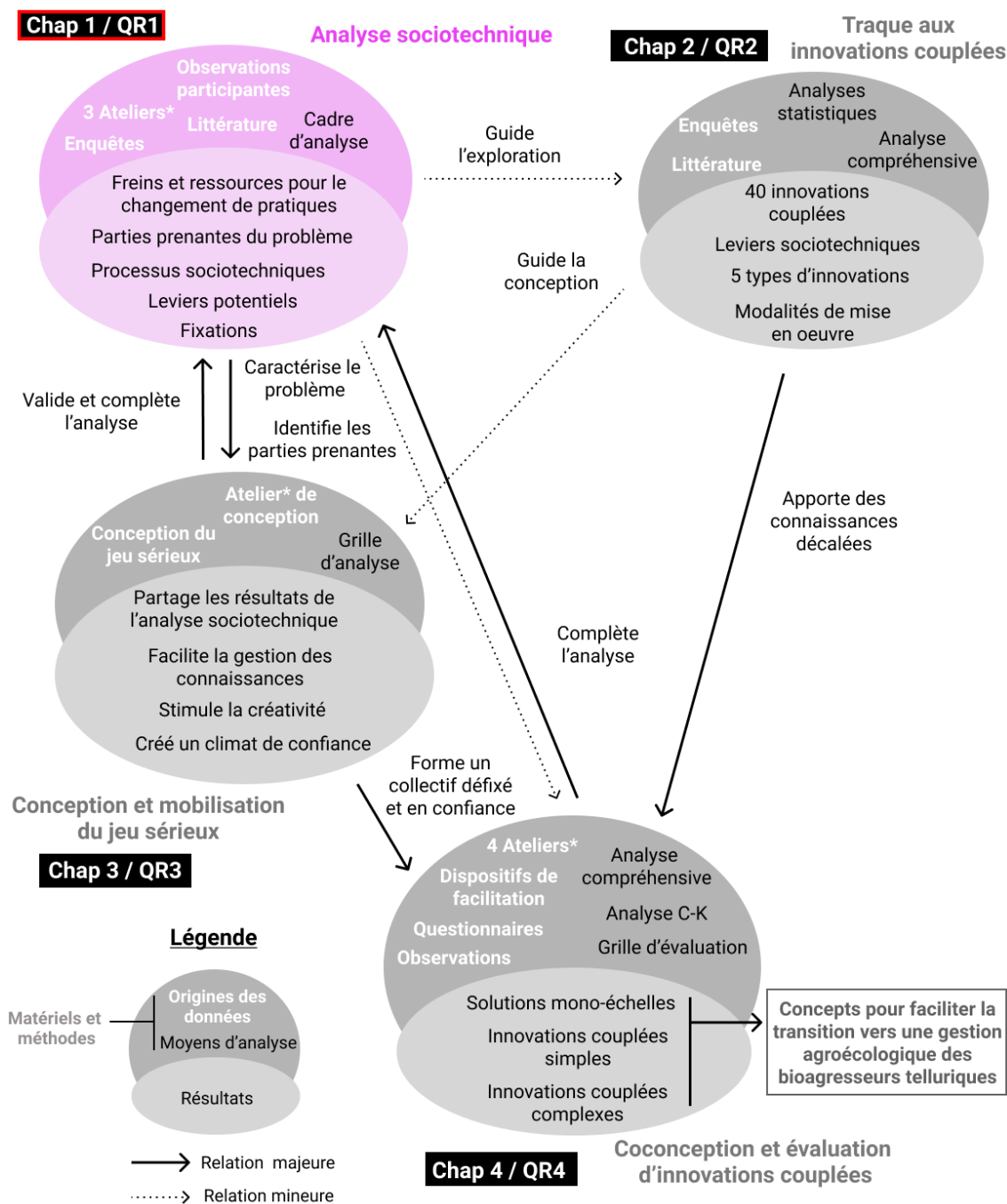


Figure 9 - Place du chapitre 1 (encadré en rouge) dans le dispositif général de la thèse. L'astérisque * après la mention des ateliers signifie que ces ateliers sont les mêmes : l'atelier de conception où le jeu sérieux a été utilisé est un de ceux qui ont alimenté l'analyse sociotechnique.

Analyzing barriers and levers for practice change: a new framework applied to vegetables' soil pest management

Yann Boulestreau^{a,b,*}, Marion Casagrande^{a,c}, Mireille Navarrete^a

^a ECODEVLOPPEMENT, INRAE, 84000, Avignon, France

^b ADEME, French Environment and Energy Management Agency 20, avenue du Grésillé- BP 90406 49004 Angers Cedex 01 France.

^c ITAB (Institut de l'Agriculture et de l'Alimentation Biologiques), 525 route de Gotheron, 26320 Saint Marcel les Valence, France

* corresponding author, yannboulestreau@hotmail.fr

Keywords : crop protection; soil health; organic farming; sociotechnical system; farming practice; sociotechnical analysis; value chain; wicked problem; *Meloïdogyne* spp; vegetable production

Abstract

Western agricultural practices for crop protection are still heavily dependent on pesticides, even though they cause major human health and environmental hazards. In France, public incentives for pesticide reduction have failed to achieve their goal, and agroecological practices are still seldom implemented. In this study, we hypothesized that a systemic analysis of the determinants of current farming practices could serve to characterize: (i) the barriers to change in farming practices; (ii) the resources supporting the change; (iii) the underpinning sociotechnical processes; (iv) the stakeholders' involvement; and (v) levers to facilitate agroecological transition.

We therefore designed the first analytical framework that supports a systemic, multi-level (field, farm, territorial, and supra-territorial), multi-actor (including private actors and policy-makers), and transformation-oriented analysis of the determinants of farming practices. We applied this analytical framework to the management of root-knot nematodes in sheltered vegetable systems in south-eastern France, jointly analyzing conventional and organic systems. We conducted this comprehensive analysis based on complementary data collection methods: interviews with stakeholders, analysis of written material, participant observation, and participatory workshops.

We show that strongly interconnected determinants of farming practices fostered drastic soil disinfection and locked out agroecological soil health technology (e.g., product quality and economic constraints from marketing firms and from regulations; lack of knowledge; unavailability of agroecological inputs). This sociotechnical lock-in was however being undermined by societal pressures and an increasing structuration of the actors around the agroecology paradigm. On the other hand, the conventionalization process of the organic regime was simultaneously threatening further development of agroecological practices. Finally, this analysis revealed levers that could be used to support innovation design and enable changes in farming practices towards agroecology (e.g., facilitate access to agroecological inputs, develop

multi-stakeholder platforms). The framework, successfully applied to the Provençal vegetable sector, could be used in other production and territorial contexts.

1. Introduction

Widespread conventional agricultural practices that developed in Western countries after the Second World War relied on the high use of synthetic inputs to ensure high production and product quality levels. Yet they can cause major environmental and human health issues such as biodiversity loss, water quality degradation, and pesticide residues in food and water (Tilman et al. 2002; Plumecocq et al. 2018). Consequently, there is now a pressing demand for a transition towards more sustainable agriculture. Agroecological practices, farming practices based on ecological processes instead of synthetic inputs, are currently not implemented on a large scale even though they are central to sustainable agriculture (Wezel et al. 2014). They have the potential to combine environmental benefits with a good economical balance (e.g., biological pest control, direct seeding in cover crops). This high level of inertia of conventional agriculture can be explained by the technological transition theory (e.g., Geels 2002, 2004): a stable structuring of agriculture and food actors' relations through common rules and artifacts causes a lock-in effect, where self-reinforcing mechanisms hinder the implementation of alternative systems even if they are promising (Arthur 1989; Cowan and Gunby 1996). In French agriculture, sociotechnical analyses have revealed that the lock-in around conventional practices has limited the implementation of agroecological practices (e.g., Meynard et al. 2018; Della Rossa et al. 2020), despite numerous incentives from public policy over the last ten years. The wished agroecological transition, from farming systems relying on high pesticide use to farming systems based on agroecological practices, didn't occur. Such change can be defined as a complex agricultural problem (Schut et al. 2015a): a specific type of wicked problem with multiple dimensions (e.g., political, economic, technological), embedded in interactions across multiple levels from production to consumption of agricultural products, and where multiple stakeholders are involved (Fig. 10). It therefore requires a systemic analysis.

Schut et al. (2014) report that system analysis of complex agricultural problems, especially those related to crop protection, is understudied and that methodological frameworks to achieve such analysis are rare. According to them, the existing literature pays insufficient attention to multi-level interactions and to multi-actor interactions, especially those that involve private actors and policymakers. Very few papers propose a transformation-oriented analysis that puts forward structural transformation improving crop protection. Few recent studies have proposed multi-level, multi-actor or transformation-oriented analysis (Schut et al. 2015a; Meynard et al. 2018; Della Rossa et al. 2020), but none have proposed and tested a comprehensive analytical framework of the determinants of farming practice, that take simultaneously field, farm, territory and supra-territorial levels into consideration, as a means to understand the barriers to change in farming practice and to foster the design of solutions to overcome those barriers. Therefore, in this article, we propose an original analytical framework that aims to characterize: (i) the determinants hindering or facilitating change towards agroecological practices, and their evolution; (ii) the underpinning sociotechnical processes; (iii)

the stakeholders involved and their interactions; and (iv) the levers that can be used to facilitate change and unlock the agroecological transition.

Most studies on transition to agroecological systems were carried out on arable systems (Meynard et al., 2018; Mawois et al., 2019). The sheltered vegetable sector presents some particularities that must be understood from a transition perspective: high degree of specialization of farms and farming systems, intensity of soil occupation, fresh products, and close attention to zero default visual quality (Bernard de Raymond 2013; Gamliel and van Bruggen 2016). We therefore applied the framework in a comprehensive analysis on the ongoing agroecological transition of vegetable production systems in the South of France, with a focus on the management of root-knot nematodes (RKN), *Meloidogyne* spp., the current most problematic soil-borne pest in the area (Fig. 10). We analyzed jointly organic and conventional systems, both strongly present on the territory, to deepen our understanding of the barriers and levers to farming practice change. The outcomes of the study are therefore twofold: a generic analytical framework, and a deep understanding of the lock-in process and levers for vegetable production in a specific context.

We first present the analytical framework and how we implemented it in the organic-conventional case study (Section 2). In Section 3, we describe the dominant and alternative farming practices, the barriers to change in farming practices, the resources supporting the change, the underpinning sociotechnical structure and processes, the stakeholders involved, and the possible levers for steering the agroecological transition. We end this section with a discussion on the methodological contribution of our study. Finally, in Section 4 we open new research perspectives.



Figure 10 – a. Lettuce sheltered crops infected by RKN (©Henri Ernout). RKN root infection reduces lettuce growth. When there is too much heterogeneity among plants, farmers destroy the crop. **b.** Fruits and vegetables section in a supermarket. The requirements of marketing firms, distributors and consumers regarding product quality are decisive in farming practice choices.

2. Materials and methods

2.1. A framework to analyze changes in farming practices

Farming practices are implemented in the field by farmers and farm workers, and are influenced by multiple stakeholders through a web of interactions. They are at the intersection between the biophysical world and the socio-economic world. As such, a set of farming practices can be seen as a technology, when it is consistent with an agricultural paradigm and serves a specific purpose in the farming system (Rip and Kemp 1998). In this section, we present our analytical framework that aims to support the characterization of (i) the determinants of farming practices and their evolution, impacting farmers' decisions directly, hence barriers and resources for change in farming practice (2.1.1.); (ii) the sociotechnical organizations and processes that underlie the evolution of the determinants and their interactions (2.1.2); and (iii) the levers for the transition towards agroecological practices (2.1.2).

2.1.1. Determinants of farming practices

This framework is based on studies from two broad sets of disciplines: (i) systemic agronomy explaining changes in farming practices; and (ii) social sciences, including technological and sustainability transition studies, and agricultural innovation studies. We assume that a multi-level analytical framework, consisting of a classification of the determinants of farming practices at each level (Fig. 11, Table 3), will enable an understanding of what hinders or favors change in current farming practices towards an agroecological model. Four levels are considered: field, farm, sectoral and territorial agrifood system, and sociotechnical landscape.

The systemic agronomy literature shows that farming practices result from processes at three interacting levels: field, farm, and territory (Belmin 2016). At the field level, farming practice choices depend on the interactions between human (farmer), biophysical, technical factors (at crop and rotation levels), and the presence of specific infrastructures for production (e.g., irrigation system, plastic shelters that enable the production of specific crops) (Meynard 2014) (Fig. 11, Table 3). At the farm level, farming practices depend on available material resources in farming systems, for instance, crop diversity depends partly on infrastructure and equipment availability at farm level such as a specific seeder, the share of land equipped with irrigation (Aubry et al. 2006; Mawois et al. 2019). At the farm level, farming practices also depend on farmers' cognitive resources (Mawois et al. 2019), strategic decisions (Aubry et al. 2006), and their personality, preferences and objectives that frame them (Mawois et al. 2019). Biophysical factors at the farm level (e.g., natural enemies hosted in hedges) also play a role (Duru et al. 2015a) (Fig. 11, Table 3.).

The third level refers to the agrifood system, the "system [that] gathers all the elements (environment, people, inputs, processes, infrastructures, institutions, etc.) and activities that relate to the production, processing, distribution, preparation and consumption of food and the outputs of these activities, including socio-economic and environmental outcomes" (HLPE 2014

cited by Meynard et al. 2017). As agriculture is embedded in physical areas, a large part of these elements, activities and interactions are located in a territory (Lamine et al. 2019). From an agronomic point of view, the territory is defined both as the place where actors' networks are built and interact, influencing farming practices, and as a cultivated and natural landscape with biophysical and ecological dimensions, both elements interacting with farming practices (Caron 2005). Lamine et al. (2019) then define the concept of territorial agrifood system as a sociotechnical system anchored within a territory but also embedding elements of the global scale with which it interacts (e.g., food distribution in long value chains goes beyond the local territory). A sociotechnical system is a relatively stable configuration of stakeholder collectives, their networks, their knowledge and practices, the artifacts and technologies they use, and the rules that frame their interactions (Rip and Kemp 1998). Other authors have moreover noted that complex agricultural problems related to changes in farming practices are often sector specific (e.g., parasitic weed management in rice farming - Schut et al. 2015a). Therefore, we propose the concept of a sectoral and territorial agrifood system (STAFS) and define it as all stakeholders from the agrifood system influencing food production, processing, distribution, preparation and consumption within the territory, and the food production sector(s) in which the farming practices are embedded, and the interaction between these stakeholders. Compared to the concept "territorial agrifood system", STAFS excludes the stakeholders that are not part of the specific food sector under study or in strong interaction with it.

STAFS is the third level on which farming practices are built (Fig. 11, Table 3). The technological transition literature defines three kinds of rules underlying stakeholders' actions and interactions within a STAFS, all of which impact practices change: (i) regulatory rules such as food quality standards; (ii) normative rules such as shared social norms (e.g., the idea that a well cultivated field has to be weed-free); and (iii) cognitive rules such as shared paradigms (e.g., only the conventional agricultural model could feed the world) (Fig. 11, Table 3) (Geels 2004). The agricultural innovation support system is a central part of STAFS and provides structural conditions that can facilitate change (when such conditions are present) or hinder it (when they are absent or malfunctioning). These structural conditions are: (i) the three above-mentioned rule types; (ii) STAFS stakeholder cognitive resources; (iii) the quality of knowledge infrastructure; and (iv) multi-stakeholder interactions (Fig. 11, Table 3). The crucial role of interactions between multi-stakeholders in farmers' capacity to change has also been highlighted by agronomists (Chantre and Cardona 2014; Meynard et al. 2018; Mawois et al. 2019). Finally, available material resources, human factors and biophysical factors are also important determinants at the STAFS level (Duru et al. 2015a) (Fig. 11, Table 3). The last level with a strong influence on farming practices is what Geels (2002) called the sociotechnical landscape in the multi-level perspective. It is defined as all factors external to the STAFS "framing" the interaction between the stakeholders: global sociopolitical factors, market dynamics, and environmental dynamics.

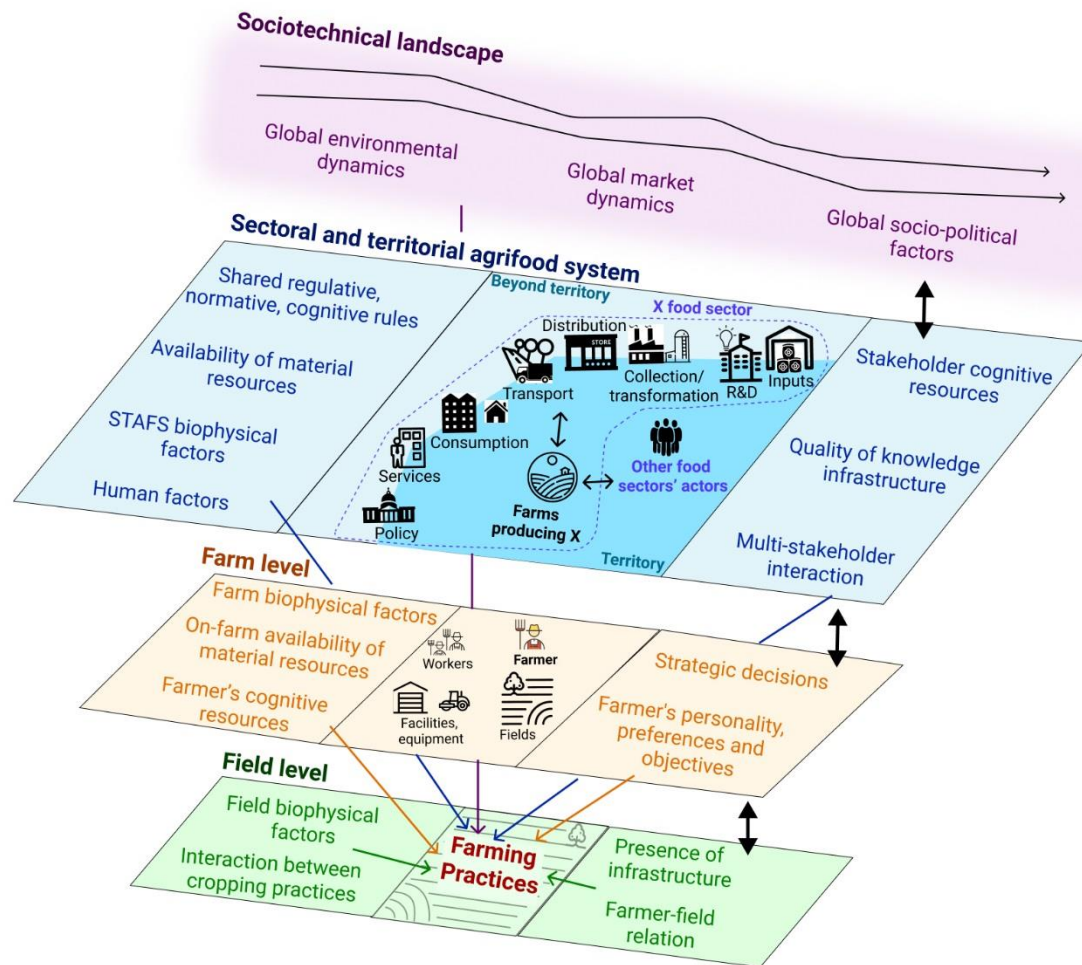


Figure 11 - Analytical framework of the determinants of farming practices, showing interactions between four levels: (i) field level, (ii) farm level, (iii) sectoral and territorial agrifood system (STAFS), and (iv) sociotechnical landscape. The colored arrows show how all determinants influence farming practices, whereas the double black arrows between two levels illustrate that all the levels interact with one another. The STAFS level gathers stakeholders from the components of the food sector (e.g., vegetable, fruit, cereal sector) under study and of the territory influencing the farming practice of farmers that are part of this food sector. The darker blue area represents the territory. Actors who are represented at the frontier of the darker blue area can be part of the territory or beyond.

Table 3 – Detailed analytical framework of the multi-level determinants of farming practices.

Level	Types of practice determinants	Examples of practice determinants
Field level	Field biophysical factors	Biological communities (pests, diseases, weeds, beneficial organisms) in the field, soil type and their evolution
	Interaction between cropping practices	At crop level: interaction between technical interventions for the same crop; at rotation level: interactions between previous and following practices
	Presence of infrastructure	Irrigation systems, shelters
	Farmer-field relation	Performance expectations, field value perception
Farm level	Farm biophysical factors	Biological communities within the farm, agroecological infrastructures (hedgerows, fallows and grass strips, topology), pedoclimatic conditions
	On-farm availability of material resources	Productive resources (land, capital, workforce, agricultural inputs, equipment such as tractors and tools), infrastructures such as greenhouse and irrigations, buildings, social networks belonging (e.g., knowledge exchange networks, mutual assistance), outlet
	Farmer's cognitive resources	Empirical and scientific knowledge, know-how, skills
	Strategic decisions	Choices of agricultural production, marketing channel, certification, long-term productive resources (e.g., infrastructure)
	Farmer's personality, preferences and objectives	Risk-aversion, ethics, beliefs, way of life, workload management, personal satisfaction, priorities and goals (e.g., maximization of economic profit, environmental care)
Sectoral and territorial agrifood system (STAFS)	Shared regulative (formal) rules	Laws, norms and industrial standards, contracts, specifications, public policies (e.g., subsidies), specifically: agriculture and food regulatory framework and their proper implementation and enforcement
	Shared normative rules	Values, norms, role expectations, customs, responsibilities, duties, authority systems
	Shared cognitive rules	Beliefs, cognitive routines, paradigms
	Availability of material resources	Storage and processing equipment, infrastructures (e.g., roads), inputs, capital, skilled workforce, functional communication and financial infrastructures, time

	STAFS biophysical factors	Landscape support for biodiversity, pest communities, topology, erosion risk, watershed characteristics
	Human factors	Individual personalities and preferences expressed in actors' relations (e.g., friendliness)
	Stakeholder cognitive resources	Empirical and scientific knowledge (e.g., on agroecological practices), know-how, skills
	Quality of knowledge infrastructure	Research, education, extension and development infrastructure (e.g., experimental networks involving farmers)
	Multi-stakeholder interactions	(Co)development and sharing of knowledge and information; project collaborations (e.g., agricultural tool sharing system); public-private partnerships; networks; representative bodies (e.g., farmers' union); power dynamics; purchase and sale of goods (incl. food commodities)
Sociotechnical landscape	Global environmental dynamics	Climate change, biodiversity losses
	Global market dynamics	Global oil price, global commodity prices, trade agreements
	Global socio-political factors	Change of political regime, economic growth, cultural values

2.1.2. The sociotechnical processes underpinning practices change

Chantre and Cardona (2014) and Mawois et al. (2019) have demonstrated that farming practices evolve under the influence of interacting changing determinants. The interaction between determinants at the STAFS level and their evolution are structured by sociotechnical organizations and processes. For instance, the structuration of the organic value chain provided a better paid outlet (*On-farm availability of material resources*, Table 3) and combined it with specific extension services (*Quality of knowledge infrastructure*), which facilitated the change towards alternative practices without the use of synthetic pesticides. In this section, we present the concepts from the theory of technological transition that support the understanding of these sociotechnical organizations and processes, and complement the framework presented above (2.1.1).

In the multi-level perspective framework (Geels 2002, 2004), three levels interact: the sociotechnical landscape (2.1.1), the sociotechnical regime, and the technological niches. The sociotechnical regime is a stable sociotechnical system where actors, rules and artifacts are aligned and well structured around a specific technology (i.e., for us, a consistent set of practices – see 2.1.). The interdependence between sociotechnical regime actors, rules, artifacts and technology, and their coevolution, lead to the lock-in of the regime around technology and lock out any possible alternatives. So-called “dominant” regimes represent the predominant actor-networks in a specific sector or market. In agriculture, conventional farming is often considered as the dominant regime, locked around conventional farming practices (Meynard et al. 2018; Plumecocq et al. 2018; Della Rossa et al. 2020). A locked regime allows alternative practices only if they are compatible with the current system. This phenomenon is called path dependency (David 1985). By contrast, a technological niche is a protected sociotechnical system where new configurations of actors, shared rules, artifacts and techniques can emerge and develop around an alternative technology. The three levels coevolve in interaction. For instance, disruption from the sociotechnical landscape can destabilize the regime and open up opportunities for radical innovations from niches, thus provoking a restructuring of the regime around a new technology. This evolution from one sociotechnical regime to another is a “sociotechnical transition”. According to the multi-level perspective framework, such transition is necessary for alternative technologies, incompatible with the current dominant regime, to be massively implemented.

To conclude, this original analytical framework mobilizes the analysis of multi-level determinants of farming practice to understand the logic behind the current practices implementation, identify the main STAFS stakeholders, the barriers to their change, resources to favor it and levers to overcome barriers. It then relies on technological transition’s concepts to understand the interactions and evolution of the practices’ determinants at STAFS, hence of the barriers and resources to practices’ change. In that way, it provides material to clarify levers for overcoming the barriers and the resulting lock-in. Barriers to change are considered as practices’ determinants blocking the change. Resources are seen as practices’ determinant favoring the change. Finally, levers are seen as actions that modify the determinants of farming

practices and contribute to overcoming the barriers to their change. We tested this analytical framework on the analysis of the change of root-knot nematode management practices in Provençal sheltered vegetable farming systems.

2.2. Case-study

At the time of the study (2017-2020), the Provençal territory (located in the south of France, around Avignon) was a major French fresh vegetable production basin. It was mainly composed of numerous small farms (3.2ha in average), specialized in a very limited number of crop species cropped under plastic shelters (65% of the farms), and involved in long food value chains (at national and international levels) (RGA agricultural census 2010: <http://www.agreste.agriculture.gouv.fr>). Organic farming accounted for more than 10% of the market-gardening Utilized Agricultural Area in Provence (RGA agricultural census 2010), with a well-structured value chain involving specific and mixed actors (organic and non-organic). In 2009, RKN was identified as the largest soil health issue in Provence, with 40% of the farms bearing losses of up to 100% of the yield, depending on the conditions (crop, infestation level) (Djian-Caporalino 2010). Two species are present on the territory: *M. arenaria* and *incognita*. RKN contamination was particularly high under plastic shelters, due to the intensity of cropping and favorable climate for RKN (Gamliel and van Bruggen 2016) and concerned both organic and conventional farming.. Major crops cropped under shelters are vulnerable to RKN damage: tomato, eggplant, bell pepper, cucumber, melon, lettuce.

Despite a progressive ban of synthetic nematicides resulting in increasing RKN issues, Provençal farmers sparsely implemented the available agroecological alternatives. Previous studies showed that their implementation for RKN control was impeded by numerous factors, for example competition between commercial and cover crops at field level, availability of the workforce at farm level, and lack of outlets for diversification crops at value chain levels (Navarrete et al. 2015; Navarrete et al. 2016). Yet, no comprehensive analysis of these factors and their interactions was available. Therefore, we hypothesized that the application of our multi-level analytical framework would be relevant to understand this apparent lock-in of RKN management practices in Provençal market gardening systems, and identify levers to overcome it.

2.3. Methodology for sociotechnical analysis of change in farming practice

We built a methodological approach to collect data and test our analytical framework on our case study. We considered eight analytical dimensions, explored in parallel, using six data collection methods (A-F in Table 4).

First, we analyzed the problem context (1) to obtain a global picture of the sheltered vegetable production systems in the territory, which was necessary to lead a comprehensive analysis and start to identify relevant stakeholders. Second, we identified agroecological and

non-agroecological RKN management practices (2), according to scientific evidence and farmers' or agronomists' empirical knowledge, and characterized their degree of implementation by Provençal farmers. Third, using the analytical framework developed (2.1), we characterized jointly the stakeholders of the STAFS (3), barriers to practices change towards agroecological ones and resources supporting the change (4), STAFS configuration (5), processes underlying barriers (6) and levers to overcome them (7). Levers could be divided into two categories using the distinction proposed by (Schut et al. 2015a). Specific levers concerned innovations devoted to change of RKN management practices towards more sustainable ones. Generic levers addressed innovations tackling structural problems, likely to have spillover effects on issues other than soil-borne pests and diseases within the STAFS. Finally, we checked the analysis resulting from these data with the STAFS stakeholders (8).

The 8 dimensions were analyzed using 6 data collection methods involving all stakeholder categories we identified: farmers, upstream value chain and downstream value chain actors, policy makers, researchers, extension agents, and NGO and food sector animation structures (Table 4).

We led three types of semi-structured interviews. First, we conducted exploratory interviews with 10 stakeholders within the researcher team's network (end 2017- early 2018) (A). We then conducted 11 stakeholder interviews with new stakeholders (2018-2019) based on a topic list adapted to each interviewed stakeholder, in order to collect complementary information (C). Finally, we held 12 comprehensive interviews of farmers (end 2018 - early 2019) (E) to establish an in-depth farm analysis, with a focus on the RKN management implemented and the barriers encountered in implementing agroecological practices (Table 4). We used the same guide for organic and conventional farmers. All the stakeholders interviewed were selected on a purposive basis and completed with snowball sampling, where interviewees made suggestions for who else should be included in the sample.

Additionally, we conducted a literature review of 18 documents (scientific, technical documents and statistic reports) (B) (end 2017-2020) and carried out participant observations of 22 scientific and professional meetings (2017-2019) (D) (Table 4). This provided us with complementary data on RKN management techniques, determinants of farming practices, the STAFS' structure, and stakeholder interactions. Participant observation consisted in retrieving information with detailed notes to inform elements of the analytical framework (Fig. 11, Table 3).

Finally, 5 workshops with key STAFS stakeholders were held (F, Table 4, (Boulestreau et al. 2019) to check if the analysis was consistent with their points of view, to complete data, and to co-design innovative solutions capable of fostering the implementation of agroecological RKN management in our case study. Note that the results from the co-design activities are not detailed in this article as it exceeds its scope. As the workshops took place between December 2018 and February 2020, it enabled us to progressively refine and stabilize the analysis. Detailed notes were taken by observers for 4 of the workshops, and all of them were recorded.

Combining these different data collection methods provided us with the different stakeholders' individual and collective representations of problems and solutions. This enabled us to compare insiders' (stakeholders') and outsiders' (researchers') analyses. They provided sufficient detail and allowed us to triangulate and validate data, enhancing the credibility, validity and quality of the analysis, even though the total sample of stakeholders directly involved in the study cannot be considered as representative. As such, they satisfied most of the selection criteria proposed by Schut et al. (2015a).

The data collection and analysis were conducted jointly in organic and conventional agriculture. Some organic farmers are seen as "agroecology pioneers", while other organic farmers are seen to be following a conventionalization path (e.g., Ramos García et al. 2017). We therefore assume that analyzing organic and conventional systems jointly could facilitate the identification of levers in conventional systems, and of arising barriers for organic systems regarding the agroecological transition.

Table 4 – Data sources for each analytical dimension and corresponding stakeholder groups. The numbers correspond to the number of stakeholders interviewed and “O” indicates how many were specialized in the organic sector.

		Analytical dimensions								Stakeholder group					
		(1) Problem context analysis	(2) RKN management practices characterization	(3) Stakeholders identification	(4) Barriers and resources analyses	(5) STAFS configuration analysis	(6) Processes analysis	(7) Lever identifications	(8) Analysis check with stakeholders	Farmers	Upstream value chain	Downstream value chain	Policy makers	Research & extension services	NGO and Food sector facilitators
Data collection methods	(A) Exploratory interviews	X	X	X	X	X	X			4 (2 O)	1	1 O		4	
	(B) Literature review	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X
	(C) Stakeholder interviews		X	X	X	X	X	X			1	2 (1 O)		6	2
	(D) Stakeholder meeting participant observation	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X
	(E) Farmers’ specific interviews		X	X	X	X	X	X		12 (9 O)					
	(F) Stakeholder workshops			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

3. Results & Discussion

In this section, we focus on the results of the problem analysis. The context analysis (Dimension 1, Table 4) is not presented as such. We first describe two RKN management technologies coexisting in Provençal sheltered vegetable production systems (3.1.). On this basis, we explore the barriers and resources for farmers to adopt agroecological RKN management, for each level (field, farm, STAFS and sociotechnical landscape), as well as the stakeholders and their roles (3.2.). We then highlight the main underpinning sociotechnical processes explaining the barriers and resources and the levers to overcome them (3.3.). Finally, we discuss the contribution of our study to sociotechnical analysis of complex agricultural problems (3.4.). Data sources are indicated in brackets with the letters referring to Table 4.

3.1. Two competing soil health management technologies in the Provençal sheltered vegetable sector

In this section we first present two technologies: “drastic soil disinfection” or “agroecological management of soil health” (B,C). We then present how the two sets of practices were used in Provençal sheltered vegetable systems (C,D,E) (Dimension 2, Table 4).

The RKN management techniques are based on three interacting mechanisms (Hoefferlin et al. 2018) (Fig. 12): (1) directly killing RKN larvae present in the soil, (2) preventing their reproduction and spreading, and (3) enhancing in-soil competition. Based on the above mechanisms that the techniques involve, we identified two consistent sets of techniques: those relating to drastic soil disinfection, and those relating to soil health management with agroecological techniques. The former mobilizes only the first mechanism (1), whereas the latter synergistically mobilizes all three mechanisms.

The “drastic soil disinfection” technology consists of the implementation of the following consistent set of techniques: synthetic nematicides application, acting by fumigation or drip-irrigation, and soil disinfection by steam. It is hereafter referred to as “disinfection technology”. Disinfection technology drastically reduces soil-borne pests and diseases inoculum and occupies shelter space for a short time (<1 month). However, as it is unspecific, it also drastically reduces neutral and beneficial organism populations (e.g., arbuscular mycorrhizal fungi, parasitic bacteria - see Djian-Caporalino et al. 2009), which seriously jeopardizes the natural regulation of pests and diseases (Gamliel and van Bruggen 2016), and therefore agroecological management of soil health. This technology is unsustainable, as it requires expensive applications that are repeated each year with a decreasing efficiency on RKN, due to resistances. It moreover causes direct or indirect human health (Pruett et al. 2001) or environmental damage (Hoefferlin et al. 2018). It is focused on short-term control. This set of techniques thus appears consistent with the conventional farming paradigm characterized by the preventive use of synthetic inputs to drastically reduce any risk of crop damages (Plumecocq et al. 2018).

The agroecological management of soil health technology consists of the synergistic implementation of several techniques, each of which is insufficiently effective in RKN management when applied separately. It is hereafter referred to as “agroecological soil health technology”. This technology stems from a more holistic definition of soil health, where “the soil’s continued capacity to function as a vital living system, within ecosystem and land-use boundaries” is promoted (Gamliel and van Bruggen 2016). It is focused on long-term control. For example, the agroecological techniques involved are the use of resistant cultivars, organic amendment and biofumigation (Fig. 12, Collange et al. 2011; Gamliel and van Bruggen 2016; Hoefflerlin et al. 2018). They are based on ecological processes instead of synthetic inputs, for example the application of organic amendment stimulates biological activity and in-soil competition. Unlike disinfection technology, they do not drastically reduce the natural enemies’ population in the soil (Gamliel and van Bruggen 2016). Effects on crop yield of agroecological soil health technology compared to drastic soil disinfection varied tremendously depending on the practices implemented and the context (e.g., soil temperature increase during solarization is generally insufficient when cloudy weather, decreasing the total effectiveness of the combination of agroecological techniques).

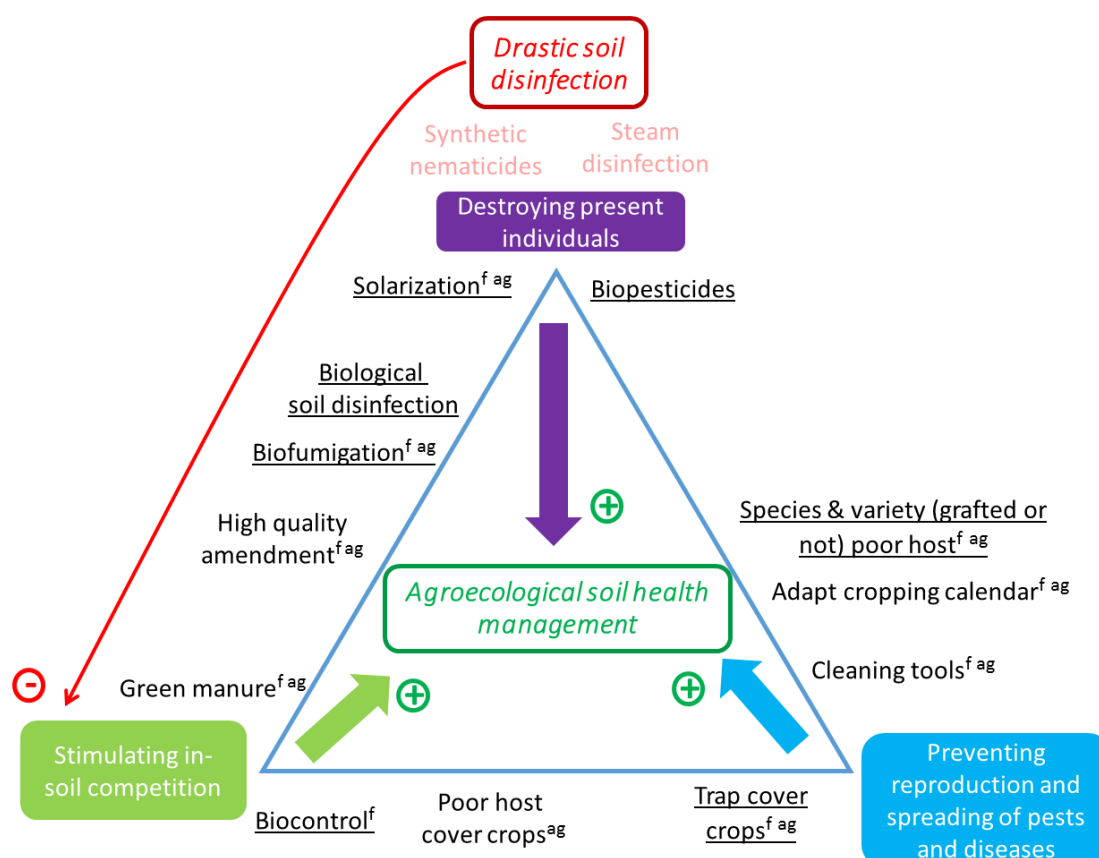


Figure 12 - RKN management techniques and technologies. The techniques (in black) are sorted along the sides of the triangle, depending on the mechanisms they rely on. When underlined, techniques were identified in the scientific literature. [f] as exponent means that the technique was identified thanks to farmers' empirical knowledge. [ag] as exponent means that the technique was identified thanks to agronomist empirical knowledge (in unpublished experiments or on-farm observations). Techniques were identified based on a combination of sources. Red and green frames represent respectively the drastic soil disinfection and agroecological management of soil health technologies. The red arrow highlights the incompatibility at field-level between the techniques of drastic soil disinfection technology and the stimulation of in-soil competition. Adapted from Hoefflerlin et al. (2018).

The two technologies (Fig. 12), which are incompatible at the field level, coexisted within the Provençal sheltered vegetable STAFS. In 2018, two synthetic fumigants (Dazomet, Metam-sodium) before plantation and another synthetic nematicide (Fluopyram) applied through drip-irrigation maximum twice during cultivation were still allowed for non-organic farming (Hoefflerlin et al. 2018). Metam-sodium and Fluopyram were used extensively. Conversely, soil disinfection by steam and Dazomet were seldom used, mainly because of their high cost. After the banning of Metam-sodium (end 2018), non-organic farmers went mostly for techniques that were compatible with their systems: techniques from disinfection technology (synthetic nematicides, ozonated water) but also from agroecological soil health technology (e.g., solarization for short spring crops' producers, short trap cropping, biopesticides, resistant varieties). Organic farmers were using mainly agroecological techniques. For instance, non-organic farmers typically grew 3 species vulnerable to RKN (tomatoes, melon, lettuce), whereas

organic farmers grew 5 to 8 species, including poor host crops (e.g., scallion, lamb's lettuce). Agroecological techniques had been experimented in Provence for more than 10 years (Hoefferlin et al. 2018). However, at the time of the study, only a few farmers had successfully implemented a synergistic combination of agroecological techniques (Fig. 12), such as the combination of a diversified crop sequence and solarization. Therefore, in 2019, in Provençal market gardening systems, disinfection technology was predominant, and many farmers were still heavily impacted by RKN.

The following sections identify the factors and processes explaining why Provençal vegetable farmers did not massively shift to agroecological soil health technology, as recommended by policymakers and public R&D actors.

3.2. Barriers, resources and stakeholders of practices change towards agroecological management of soil health

In the following sections, we present how the practice determinants constrained or enabled the change of RKN management practice, and the role of the stakeholders involved. These results are summarized in Figure 13. The phrases below in italics refer to the farming practice determinants presented in Figure 11 and Table 3. When it is not specified, the results presented hold for both conventional and organic farming.

3.2.1. Field level

At field level, *interaction between cropping practices* was the main determinant for the practices change towards agroecological soil health technology. The principal corresponding barrier identified was a time-space incompatibility between major commercial crop production and agroecological techniques. Diversification with service crops²³ or poor RKN-host commercial crops (e.g., *allium* sp.), soil solarization, biological soil disinfection all competed with the main commercial crop production, and among them, for land and workforce (B,C,D,E,F). The substitution of long summer crops (tomato, pepper) for short spring crops (melon, cucumber or zucchini) was a way of overcoming this issue. It freed up space in summer to use the previous agroecological techniques. *Presence of infrastructure* played a role mainly through the shelter type used for the plot; for example, double walls were said to be incompatible with solarization (E). A still poorly understood resource related to *field's biophysical factors* was "suppressive" soils (Gamliel and van Bruggen 2016), showing very limited RKN pressure. This was likely due to the higher clay percentage and biological activity within RKN suppressive soils (A,C,E; Mateille et al. 2008; Gamliel and van Bruggen 2016).

²³ Service crops are crops that are not cultivated to produce marketable goods but to provide services to other crops, e.g., protection against pests, nutriment.

3.2.2. Farm level

On-farm availability of material resources and *farmer's cognitive resources* were the main determinants, at farm level, for the change of farming practices towards agroecological soil health technology.

Regarding *on-farm availability of material resources*, the capital was very limiting. A large proportion of Provençal sheltered vegetable farms were under intense economic pressure: high debt levels and low income, especially in conventional farming compared to organic. This drove farmers towards specialization on the few cash crops that allowed them to recoup their investments (shelter installation, plastic cover replacement) but prevented them from using agroecological practices that compete for shelter space (see 3.2.1.). The high economic pressure furthermore reinforced risk aversion regarding alternative practices that required extra investments (e.g., service crop seeds) but could lower their sales (e.g., uncertain vegetable quality of a new resistant variety) (A,B,C,D,E,F). Limited time and mental load reduced farmers' ability to acquire new knowledge on agroecological techniques, stand back from the situation, and organize new forms of production (e.g., sanitation measures) and commercialization (e.g., for crop diversification) (A,B,C,D,E,F). Lack of local outlets was the main issue raised with regard to commercial crop diversification (B,C,E,F). Specific equipment was moreover often lacking to implement agroecological practices, such as a specific seeder for poor RKN-host radish, or a manure spreader (A,C,D,E,F). The seasonal unskilled workforce made it difficult to implement new agroecological practices, as it would require time to train workers (A,C,D,F). Finally, the cultivation area was also a determining factor, as farms with small cultivation areas under shelter (typically under 1 ha) had limited leeway to free up space for alternative soil occupation to cash crops (C,D,F).

The main limitation to change due to *farmer's cognitive resources* was farmers' poor knowledge of agroecological soil health technology (D,E,F). This main barrier was reinforced by a low risk-awareness of production losses due to soil-borne pests and diseases, as the damage is less visible than on the above-ground part of plants (A,C). Farmers moreover did not think in a systemic way, which caused them to reject "expensive techniques" without comparing them with their current practices at the cropping system level (C). Such knowledge limitation was revealed both for organic and for conventional farming systems, but was stronger in the latter (D,E,F).

Farmer's personality, preferences and objectives were important factors influencing practices change, according to our interviews with farmers and extension agents (A,C,E) and from our observation of meetings (D) and workshops (F). The farmers least motivated to implement the agroecological soil health technology were those mainly convinced of the need to produce cheap food in large quantities to feed the maximum number of people (conventional paradigm) or with the objective to maximize short term economic outcome. They were conventional or mixed farmers. Conversely, farmers strongly motivated to implement agroecological soil health technology considered the soil as a living organism (agroecological paradigm) and set

environmental and human health care as one of their farming goals. One interesting outcome is that these farmers were not all organic, some were conventional or mixed farmers.

Farming strategic choices clearly set back change in farming practices towards agroecology, for instance by limiting commercial crop diversification (focus on specialized outlets, investment in specialized tools) (D,E,F).

To conclude, these results show that farmers, and secondarily their workers, are key stakeholders in change in farming practice. This is consistent with the findings of Navarrete et al. (2016) on the same case study, which showed that the main factors influencing the implementation of a RKN-trap crop on farms were the compatibility of the cropping calendar, the cost, the working time required and the interest of farmers in agroecological techniques and innovations. Mawois et al. (2019) showed on arable systems that thinking in a systemic way was key if farmers were to introduce legumes. Della Rossa et al. (2020) and Belmin (2016) have shown on the cases of Galion watershed farmers (French West Indies) and Corsican clementine producers, that aversion to risk when it comes to production losses, and farmers' conventional agricultural paradigm both hinder practices change towards more sustainable choices.

3.2.3. Sectoral and territorial agrifood system level

The analysis of determinants of farming practice at STAFS level revealed that STAFS stakeholders other than farmers and workers were playing an important role, mostly impeding the change of farmers towards agroecological practices.

Regarding *multi-stakeholder interactions*, we distinguished the downstream and upstream value chain actors. Most wholesalers and retailers had many restrictive demands regarding products quality, which hindered the change of soil management practices towards agroecology. They offered low and fluctuating prices, required large volumes of a few species, refused any visual defect on vegetables, required high organoleptic value, technological quality (transport, conservation) and a precise crop production calendar (A,B,C,D,E,F). Marketing firms and especially supermarkets' purchasing claimed that all these requirements reflect consumer demands, and could force farmers to meet their demands due to higher bargaining power. Low and fluctuating prices reinforced economic pressure, limiting leeway for farm change. Additionally, the other requirements greatly constrained the development of resistant varieties for commercial crops; for example, an eggplant variety was refused because of red spots, and a promising rootstock (*S. Torvum*) because it delayed the start of harvesting (C,D). Low constancy and dialogues between farmers and marketing companies made it difficult for both to initiate change in their commercial and farming practices (E,C,F). At the time of our study, marketing firms specialized in organic generally left more leeway to their suppliers compared to the conventional ones (A,B,D,F). This has been reported in other case studies as well (e.g., Belmin 2016 on the Corsican clementine). It could be partially explained by alternative governance of the value chain organized by organic marketing firms, as shown by Lamine (2014) for the French commercial network Biocoop. They offered higher prices, as well as outlets for a wider diversity of crops, lower visual quality specifications, and better communication. On the other hand, as

large conventional farmers and marketing companies entering the organic market were fostering the evolution of the organic sector towards stricter requirements and the prevalence of short-term economic issues over long-term agronomic ones (A,F,D). This was driving the sector towards what was described as a “conventionalization” process (Ramos García et al. 2017).

As regards the upstream value chain, farmers and extension service agents criticized input suppliers for giving little information on the inputs available for agroecological practices; for example RKN-resistant traits of commercial and service crops for seeds, rootstocks and plantlets, despite tests being run (D,F). They were also criticized for offering low-quality plantlets or seeds for minor crops and service plants, or ones that differed from what the farmer had ordered (D,E). Regarding the interaction between farmers and extensions services, two thirds of Provençal vegetable farmers were relying only on free recommendations provided by input suppliers, who had little knowledge on RKN management techniques. Only one third were using independent, better trained but paid public services (A,C,D,E,F). This result echoes others on arable crops; for example, Chantre and Cardona (2014) highlighted the fact that the diversification of knowledge sources helped farmers in their transition to highly sustainable farming practices. Many stakeholders highlighted that farmers were poorly organized on the territory and that the lack of an equipment cooperative or a marketing cooperative was limiting the access to specific equipment and new outlets (A,B,C,D,E,F). However, despite being rare, they were not completely absent. For instance, two collective initiatives to value production resulting from agroecological management of soil (including soil health) were being developed during the period under study, and could become resources for practice change in the future (C,D). The first was an NGO founded at national level between marketing firms and agroecology pioneer farmers or extension agents. In Provence they were fostering the structuring of a value chain offering better prices to vegetable farmers, which produce with conservation agriculture techniques, based on a certification process. They organized technical support on agroecological management of the soil with public and private extension services, and raised awareness of marketing firm on the enabling conditions to allow farmers to change their practices towards agroecology. The second initiative was led by the regional market platform cluster (a public institution), which involved a group of vegetable farmers in the adaptation of a national certification standard to certify soil management practices favorable to the environment.

The multi-stakeholder interaction issues mentioned above arose partly from *limited stakeholder cognitive resources* concerning the problem under study. Upstream and downstream value chain actors were lacking awareness on the issues encountered by vegetable farmers, and especially their responsibilities with regard to them. This resulted in miscommunications (F). Moreover, all the stakeholders lacked knowledge on agroecological techniques for soil health management (C,D,E,F). Researchers, extension services and farmers lacked actionable knowledge on the origin of RKN contamination, on how to implement agroecological techniques with the available inputs (e.g., how to apply biocontrol effectively), and how to combine them. Input suppliers likewise lacked basic knowledge on RKN-plant

interactions that would enable them to develop specific input for agroecological practices (F). The *quality of knowledge infrastructure* was both an barrier and a resource in our case study (A,C,D,E,F). At national level, low investment by public and private research in vegetable production, focused only on a few major species, limited varietal development and knowledge on RKN-crop interactions. On the other hand, in the Provençal territory a tight network of research, organic and mixed extension services, and experimentation platforms, directly involving some farmers, was a strong resource to speed up the development and implementation of *agroecological management of soil health*. This network was already engaged in several research projects in that direction.

As highlighted by Geels (2004), *shared regulatory, normative and cognitive rules* structured multi-stakeholder interactions, and as such, played an essential role in impeding or fostering practice change towards agroecological soil health technology. Regarding *regulatory rules*, the requirements of marketing firms regarding standard vegetable quality (visual aspect, caliber) were enforced by EU regulations (A,B). Input-supply firms had difficulties to obtain a marketing authorization for agroecological inputs (e.g., biocontrol agent), or to communicate on their effect on RKN inoculum, because of their partial effects and EU regulations on the efficiency evaluation protocol (C,D,F). On the other hand, organic certification was a resource to foster crop diversification by requiring that the cropping sequence should have at least three different consecutive crops (Gamliel and van Bruggen 2016). *Normative rules*, and especially “role expectations”, were key. For instance, during our study, several marketing firms declined our offer to get involved in a work on soil health management on vegetable farms. Their justifications, completed with stakeholder interviews (C), showed that the procurement and sales managers of these companies considered that technical aspects of the production were not their responsibility, which impeded the dialog. Shared *cognitive rules* reinforced weak cooperation between farmers, and between them and the marketing firms. Interviews and meetings revealed a shared belief, based on past events on the territory, that no cooperation was possible without some participants taking advantage of it at the expense of the others (A,C,D,E). Our data also showed that the conventional paradigm (see 3.1. and 3.2.2.), historically shared between most researchers, extension services and farmers, was still structuring part of farmers’ and extension services’ mindsets (B,D,E). However, a growing number of public extension services and research, and some farmers, shared the alternative agroecological paradigm (A,C,D,E,F).

The *availability of material resources* at the STAFS level was another major determinant constraining practice change. Limited time prevented service providers (e.g., for tilling) from cleaning their tools (C,D,E). They were pointed to as potential major sources of initial RKN contamination on farms. Farmers and extension services pointed out a local lack of inputs that were needed for agroecological techniques, and that could be explained by the lack of development (see above), production, and distribution of these inputs (C,D,F). For instance, despite the existence of resistant rootstocks for melon (*Cucumis metuliferus*) (Expósito et al. 2019), they are not commercialized in France (C). On the other hand, financial infrastructure was

strong, as public policy stakeholders pointed out, stating that various sources of public subsidies were available from the local to the EU level, to foster agroecological soil health technology (F).

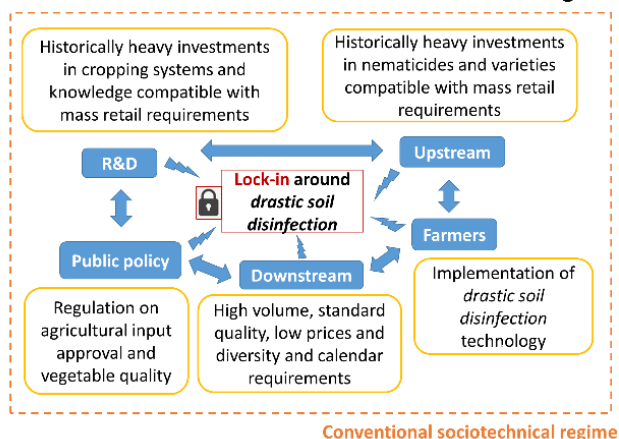
To conclude, the implementation of all agroecological techniques mentioned in Section 3.1. encountered hindrances resulting from interactions between downstream and upstream value chains, policy makers, R&D, service providers, workers and farmers (Fig. 13). Yet, the local resources showed high potential for agroecological transition of the Provençal sheltered vegetable systems, regarding RKN management.

3.2.4. Sociotechnical landscape level

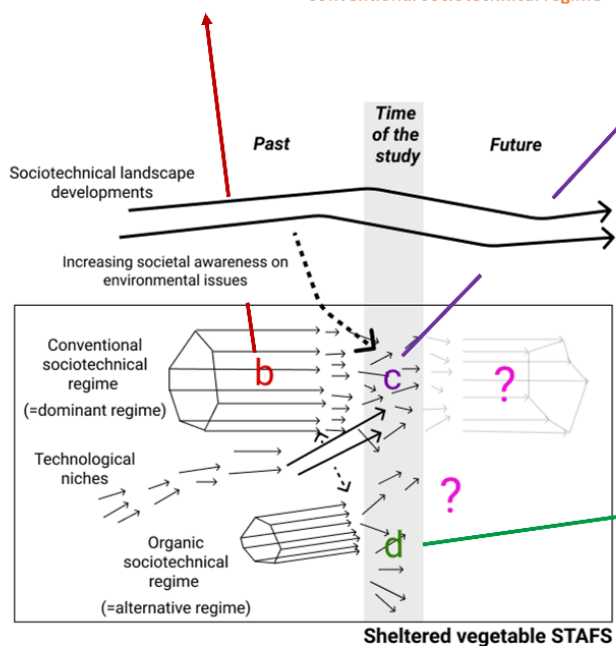
Sociotechnical landscape level determinants reinforced barriers or resources at the previous levels. *Global market dynamics*, with national and international competition, were pointed out as responsible for low and fluctuating prices for farmers. They were also considered to be the cause behind the lack of local outlets for minor and poor RKN-host crops, produced at a lower cost on other territories (A,C,E,F). The analysis of French fruit and vegetable markets by Bernard de Raymond (2013) confirms the reality of these factors. *Global environmental dynamics*, namely current global warming, has narrowed the cold period when RKN are inactive in the soil (C). As a consequence, escape cropping and crop calendar requirements became even more difficult to implement. Regarding *global socio-political factors*, an increase in societal and political awareness of the environmental and human health harm caused by pesticides led to the banning of synthetic nematicides and indirectly to the evolution of farmer's practices towards agroecology (B,E).

The previous results show that numerous barriers, interacting from field to sociotechnical landscape level, block the change of farmers' practices towards agroecological soil health technology. We have shown that numerous barriers to change towards more sustainable practices, that we observed, were also present in other case studies. However, our case study revealed specific features, especially compared to arable cropping (Chantre and Cardona 2014; Meynard et al. 2018; Mawois et al. 2019). The pressures of time and mental load are higher than in other production systems as vegetable farmers cultivate all year round and need to manage a large workforce. Additionally, working with fresh products tightens the requirements on production calendars, volumes and visual quality.

b. The lock-in of the dominant sociotechnical regime

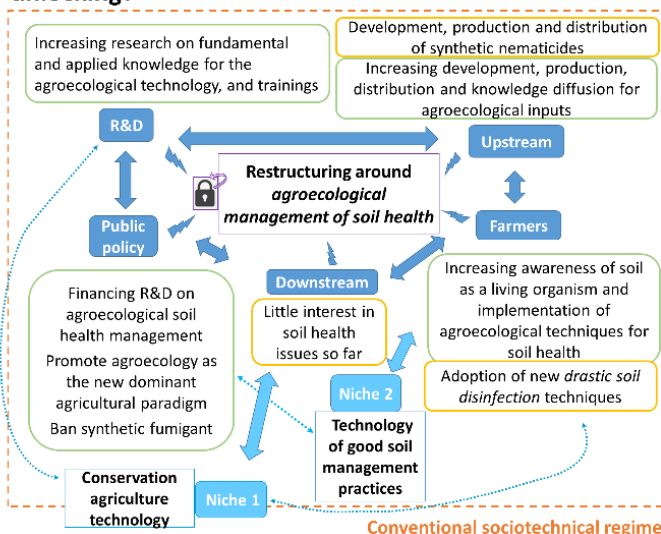


Conventional sociotechnical regime



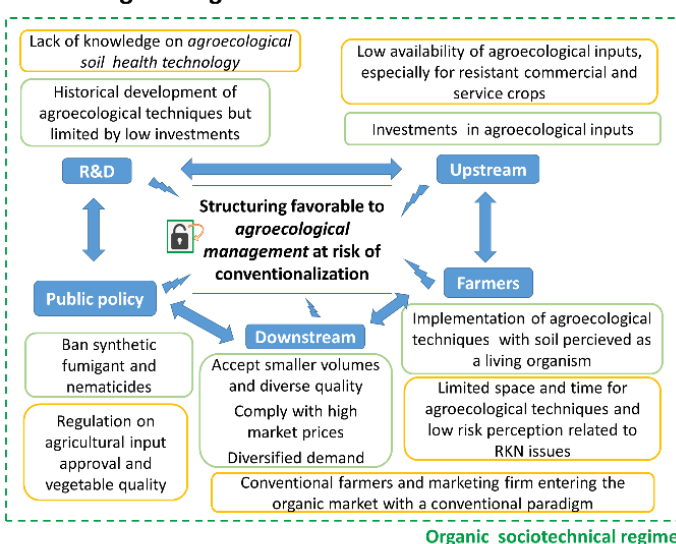
a. The transition of the Provencal sheltered vegetable STAFS

c. The evolution of the dominant regime: towards unlocking?



Conventional sociotechnical regime

d. The organic regime at risk of lock-in



Organic sociotechnical regime

Figure 13 – Sociotechnical analysis of change in RKN management practices within Provençal sheltered vegetable production systems. **a.** Coevolution of regimes and niches within the sheltered vegetable STAFS of Provence. The double dotted arrow represents the interaction between the organic and the conventional regime. **b.** Historical lock-in of the dominant sociotechnical regime. **c.** Evolution of dominant sociotechnical regime at study time. The dotted blue arrows represent the relations in-the-making and the bold arrows represent stabilized interactions between niches and dominant regime stakeholders. **d.** Organic sociotechnical regime at study time. The yellow boxes represent elements favorable to lock-in around drastic soil disinfection. The green boxes represent elements favorable to a structuring around agroecological management of soil health. The blue and bold double arrows represent the alignment of rules between stakeholder groups. The rectangular boxes at the center of the figures or next to niches' boxes represent technologies. Upstream and downstream are references to upstream and downstream value chains.

3.3. From lock-in to levers for driving the sociotechnical transition towards agroecology

In this section we show the underlying sociotechnical processes responsible for the identified barriers (3.2.), using the technological transition theory. We then present the levers that were identified to overcome them.

Disinfection technology was still the predominant technology at the beginning of our study (3.1.). The prevailing conventional regime had been historically structured around this technology (Fig. 13, b). Bernard de Raymond (2013) shows that the fruit and vegetable value chain had been structured to comply with the constraints of mass retailing: conservation, homogeneity, and zero visual defects. This structuring had gone hand in hand with massification and standardization of production and consumption, supported by public regulation on product quality standards and innovations from R&D and input suppliers (e.g., pesticides, varieties, new cropping systems). It enabled massive scale economies for the value chain actors. However, it resulted in economic and product constraints that made it necessary for farmers to use pesticides (Bernard de Raymond 2013; Belmin 2016), i.e., in our case study to use disinfection technology. In the previous section, we showed that this structuring was still present at the time of the study, resulting in interrelated barriers and lock-in around disinfection technology. It led to path dependency: only techniques compatible with the current system were largely implemented (3.1.). Diversification, for instance, was locked out. We also showed that the organic regime in Provence, evolving from a niche to a mass market, risked structuring itself around a similar lock-in (Fig. 13, d).

We nevertheless identified that landscape pressures related to environmental awareness (3.2.4.) and interactions with the organic sector were destabilizing the dominant regime (Fig. 13, a). As a result, an increasing number of non-organic stakeholders were structuring their beliefs and activities around the agroecological paradigm (3.2.3., Fig. 13, c), and participating in the creation of resources for unlocking (e.g., good knowledge infrastructure, alternative value chains). Technological niches were emerging, such as the value chain structuring around soil conservation farming practices (3.2.3., Fig. 13, c). As is often the case in agriculture, they were not isolated from the dominant regime, but close to dominant regime actors (Belmin et al. 2018). Following Geels and Schot (2007), this could be seen as an ongoing sociotechnical transition process. Nevertheless, landscape pressure from *global market dynamics* was not changing, which could hinder a full agroecological transition. The organic sector was converging with the conventional one, especially regarding downstream value chain structuring (Fig. 13, a, d). However, it could find an alternative path.

To orientate the future transition pathway, stakeholders (during the workshops - F) and researchers identified several levers based on the previous analyses. Some were peculiar to RKN management and others were generic (Table 5). The main specific levers consisted in generating and sharing both basic and applied knowledge on agroecological soil health technology to foster the development of agroecological inputs and ease the development of agroecological practices

by extension services and farmers (Table 5). As generic levers, it appeared crucial to give farmers more leeway in decision-making by freeing up time, increasing their income and fostering organization with marketing firms (Table 5). This could foster a change of management practices regarding soil health or other farming practices, and give rise to new marketing structures, increasing value chain sustainability. These levers are entry points in the complex agricultural problem under study to explore innovations that could foster practice change. This exploration could be supported by knowledge produced in other case studies. Indeed, many of the levers we identified have already been studied in other contexts, e.g., “fostering participation of farmers in peer-exchange groups on agroecological management” was explored in the case of campesino-to-campesino movement in Cuba by Rosset et al. (2011).

Table 5 - Specific and generic levers for agroecological management of soil health

Specific levers for soil health management	Generic levers
• Generate basic knowledge for agroecological soil health technology, (e.g., RKN-plant interaction, biophysical mechanisms fostering suppressive soils); train input supplier and extension services • Generate applied knowledge on agroecological techniques (e.g., how to apply effectively biocontrol products) and their combinations (synergies and antagonisms); train extension services, farmers and workforce • Facilitate access to key inputs for agroecological practices (e.g., amendments, cover crop seeds, resistant varieties and rootstocks) • Foster participation of farmers in peer-exchange groups on agroecological management of soil health • Facilitate access to specific equipment (e.g., manure spreader) • Develop commercial outlets for poor RKN-host crops • Develop cropping systems combining major commercial crop productions and agroecological soil health technology with sufficient income • Enforce sanitation measures for service providers	• Free up time for farmers so that they can learn, stand back, cooperate • Increase farmers' income to give them financial leeway (e.g., through niche markets) • Foster circulation of information on farm management issues and solutions, between farmers, input suppliers (e.g., inputs need, the timing of input availability) and marketing firms (e.g., production constraints, leeway at supply basin scale) • Foster organization between the marketing firm and their suppliers to generate collective leeway (equipment, crop calendar, crop species, new outlets for minor crops) • Propose alternative to short-term cooperation (e.g., service provider with machines, better communication with marketing firm) • Foster a cultural shift towards long-term collaboration (e.g., shared equipment, collaborative product marketing to balance bargaining power with marketing firms, collective order of high-quality input) • Develop and strengthen multi-stakeholder platforms such as identified technological niches • Combine long and short marketing channel at farm level • Foster change of consumer habits (diversification of species consumed, valorization of resistant varieties) • Adapt EU regulation on agricultural input approval to agroecological inputs and techniques

3.4. Contributions to sociotechnical analysis of practices change

In this section, we discuss the methodological contributions of our study to sociotechnical analysis applied to complex agricultural problems, and especially to change in farming practices.

Our study contributes to system agronomy (Meynard 2014) and sociotechnical analysis literature applied to farming practices (Belmin 2016; Meynard et al. 2018) by proposing a clear operational multi-level analytical framework and demonstrating its relevance on a case-study. The system agronomy literature has generally analyzed practices at one or two levels only (Belmin 2016). In our framework, all levels impacting farming practices were taken into consideration: field, farm, STAFS and sociotechnical landscape. Building on studies from Belmin (2016) and Meynard et al. (2018), we have moreover proposed a framework that operationalizes the concepts from technological transition theory (Geels 2002, 2004) on the analysis of practices change.

Our new framework complements other recent frameworks for systemic analysis of complex agricultural problems. Schut et al. (2015a) proposed the RAAIS framework focused on agricultural innovation systems, to analyze constraints to and opportunities for innovation, for solving complex agricultural problems. Della Rossa et al. (2020) proposed a framework adapted to study the hindrances to sustainable management of shared natural resources in multiple agricultural production sectors. We built on the multi-level approach of farming practices from Belmin (2016), with proposing for the first time (i) the STAFS level to represent the level where stakeholders' interactions influencing farming practices occur; and (ii) a classification of determinants of practice at their different levels to facilitate the analysis.

Focusing on determinants of practices enables us to jointly characterize the different farming practice technologies available, their effects on the agroecosystem (including productivity, human health and environmental effects), and the factors enabling or constraining change in practices towards more desirable ones. It thus provides all the elements required to foster the design of innovations "coupling" innovative practices at field level with technological, organizational or institutional innovations at farm and STAFS levels. Coupled innovations are innovations designed "in raw production, exchange, processing, and consumption, while taking into account synergies or antagonisms between upstream and downstream. Thus, the innovations are not only technological – e.g., concerning cropping systems or processing – but also organizational and institutional" (Meynard et al. 2017). Our analytical framework is then specifically adapted to prepare the design of coupled innovations linking innovative practices at field level with enabling innovations at upper levels. In our case study, we showed that the lock-in of farming practice change was systemic. Implementing simultaneously coupled innovations is then needed to unlock farming practice change towards agroecological practices. Therefore not one but various levers presented in Table 5 should be activated, together with the implementation of agroecological soil health technology within Provençal vegetable farms.

In our case study the STAFS concept allowed us to break out of the local territorial level (Della Rossa et al. 2020) or the focus only on the actors of “production, processing and commercialization of agricultural commodities” (Schut et al. 2015a), to consider all the actors that were influencing farming practices in the sheltered vegetable system in Provence (e.g., consumers).

Note that not all determinants identified in the literature were playing a role in our case study: *farmer-field relation*, *human factors*, *farm’s* and *STAFS’ biophysical factors* (Table 3). The first two seem to be more adapted to study practices change for individual trajectories of farms, as in Chantre and Cardona (2014) and Mawois et al. (2019). The latter two were likely not present because RKN management depends only on very local biophysical conditions, as a result of its low mobility. We therefore posit that *farm’s and STAFS’ biophysical factors* would play a larger role in practice change regarding above-ground pest management. Therefore, the generality of this framework should be assessed by applying it to other problems of change in farming practices (related to crop protection or not), in other production systems (e.g., cereals), other territories, and on individual farm trajectories of practice change.

Finally, our methodological proposition to operationalize the analytical framework of multi-level determinants of farming practice could be improved as regards quantitative data collection and representation of the different stakeholders. Additional quantitative data could have been collected through a web survey of numerous stakeholders at the territorial scale (Schut et al., 2015). Although all stakeholder categories were invited to participate in the study and were involved in several data collection methods, their representation was unbalanced. Organic stakeholders responded more than conventional ones, and farmers, researchers and extension service agents were over-represented. It would moreover have been interesting to involve NGOs representing consumers to discuss barriers related to purchasing and consumption of vegetables. Other disciplinary approaches such as economics and sociology would enhance the understanding of the sociotechnical processes, especially regarding downstream and upstream value chains, public policy roles, and sociotechnical landscapes. When applying our framework to another study, the methodology for data collection and analysis should be adapted to its specific context (e.g., territory characteristics, researchers’ resources).

4. Conclusion

The use of our new analytical framework has enabled the characterization of resources and barriers with regard to change from current RKN management to agroecological practices. It has likewise facilitated the characterization of the underpinning sociotechnical processes, of the stakeholders involved and, finally, of the levers to overcome the barriers. In this study, we have shown for the first time that in Provençal vegetable farming systems, RKN management practices were locked around drastic soil disinfection technology. Yet, numerous stakeholders were restructuring their activities and beliefs around the agroecological soil health technology.

The joint analysis of organic and conventional farming was a powerful way to reveal resources, current and future barriers, and levers for both regimes. For instance, the

characterization of barriers arising from the downstream value chain in the conventional regime showed the risks the organic regime was taking in the conventionalization process. Conversely, the better value chain governance by organic regime stakeholders is both a local resource and an example of lever for the organic and conventional regimes.

Finally, this analysis has revealed specific and generic levers that could be used: (i) to identify relevant existing innovation (innovation tracking); and (ii) to design coupled innovations with local stakeholders adapted to their context. To support these actions, it would be valuable to evaluate the potential for supporting the implementation of agroecological management practices of the identified levers and of the way they are implemented. It would enable hierarchizing the levers and prioritizing their implementation. Developing a method to achieve this is a future avenue of research.

Acknowledgement

This work was supported by the French Environment and Energy Management Agency (ADEME), ACT department of INRAE and UMT SI BIO. We are grateful to all the stakeholders whom we interviewed, who participated in the workshops, and who helped us to get in contact with farmers or to participate in their internal meetings. We also thank Henri Ernout for his very illustrative picture.

Authors contribution: Conceptualization, Y.B., M.C., M.N.; Methodology, Y.B., M.C., M.N.; Investigation, Y.B. ; Writing – Original Draft, Y.B.; Writing –Review & Editing, Y.B., M.C., M.N.; Funding Acquisition, Y.B., M.C., M.N.; Resources, M.N.; Supervision, M.C., M.N.

Compliance with ethical standards

Conflict of Interest: The authors declare that they have no conflict of interest.

Ethical approval: All research procedures performed involving human participants were in accordance with current research ethical standards.

Informed consent: Informed consent was obtained from all individual participants included in the study.

5. Compléments

➤ Guides d'entretien

Les guides d'entretiens ayant servi à la récolte des données sont disponibles en Annexe: guide d'entretien exploratoire (Annexe A), guide d'entretien pour l'analyse en profondeur des exploitations (Annexe B et C).

➤ Fixations

Dans l'analyse sociotechnique ci-dessus, J'ai caractérisé des règles cognitives partagées limitant l'innovation pour une gestion agroécologique des bioagresseurs telluriques (voir section 3.2.2 paragraphe §4 et 3.2.3. §6). Elles correspondent à quatre fixations²⁴ collectives :

- (i) pour nourrir le maximum de personnes, la meilleure manière de produire consiste en une production massive à un faible coût (ce qui freine l'implémentation de pratiques alternatives avec un coût plus élevé) ;
- (ii) chaque partie prenante doit rester indépendante et se focaliser uniquement sur son propre rôle (freine la coopération) ;
- (iii) l'innovation doit être faite au niveau du système de culture voire de production, sous contrainte des autres acteurs du système agri-alimentaire territorial et sectoriel (SATS), en particulier de l'aval de la filière ;
- (iv) le sol est uniquement un support de culture qu'il faut adapter aux besoins de la plante, quitte à le désinfecter.

Dans la suite de ma thèse, l'identification de ces fixations permettra de placer les innovations traquées (Chap. 2) et conçues (Chap. 4) par rapport à elles. Afin d'être capable de représenter l'exploration de l'espace des concepts de solutions possibles, j'ai construit un arbre C-K disponible en Annexe D. Concevoir des innovations au-delà de ces fixations permettrait d'ouvrir le champ des possibles et développer des solutions originales pour déverrouiller la gestion de la santé des sols et en particulier des nématodes à galles.

²⁴ Terme défini dans la problématique (Partie A) section 3.1

Chapitre 2. Traquer des innovations couplées pour produire des connaissances décalées remobilisables en conception

Accompagner le changement de pratiques vers une gestion agroécologique des nématodes à galles nécessite de concevoir des innovations couplées pour dépasser le verrouillage identifié au Chapitre 1. Or, des innovations couplées existantes, déjà appliquées sur le terrain, pourraient être adaptées pour résoudre notre problème. C'est pourquoi nous étudions dans ce chapitre, dans une diversité de territoires français, des innovations couplées permettant une gestion agroécologique des bioagresseurs en culture légumière (Fig. 14). Nous faisons l'hypothèse que cette étude permettra de générer des connaissances nourrissant le processus de conception multi-échelle de solutions au problème étudié (Chap. 3 et 4).

Ce chapitre est sous la forme d'un article en anglais soumis au journal *Agricultural systems*.

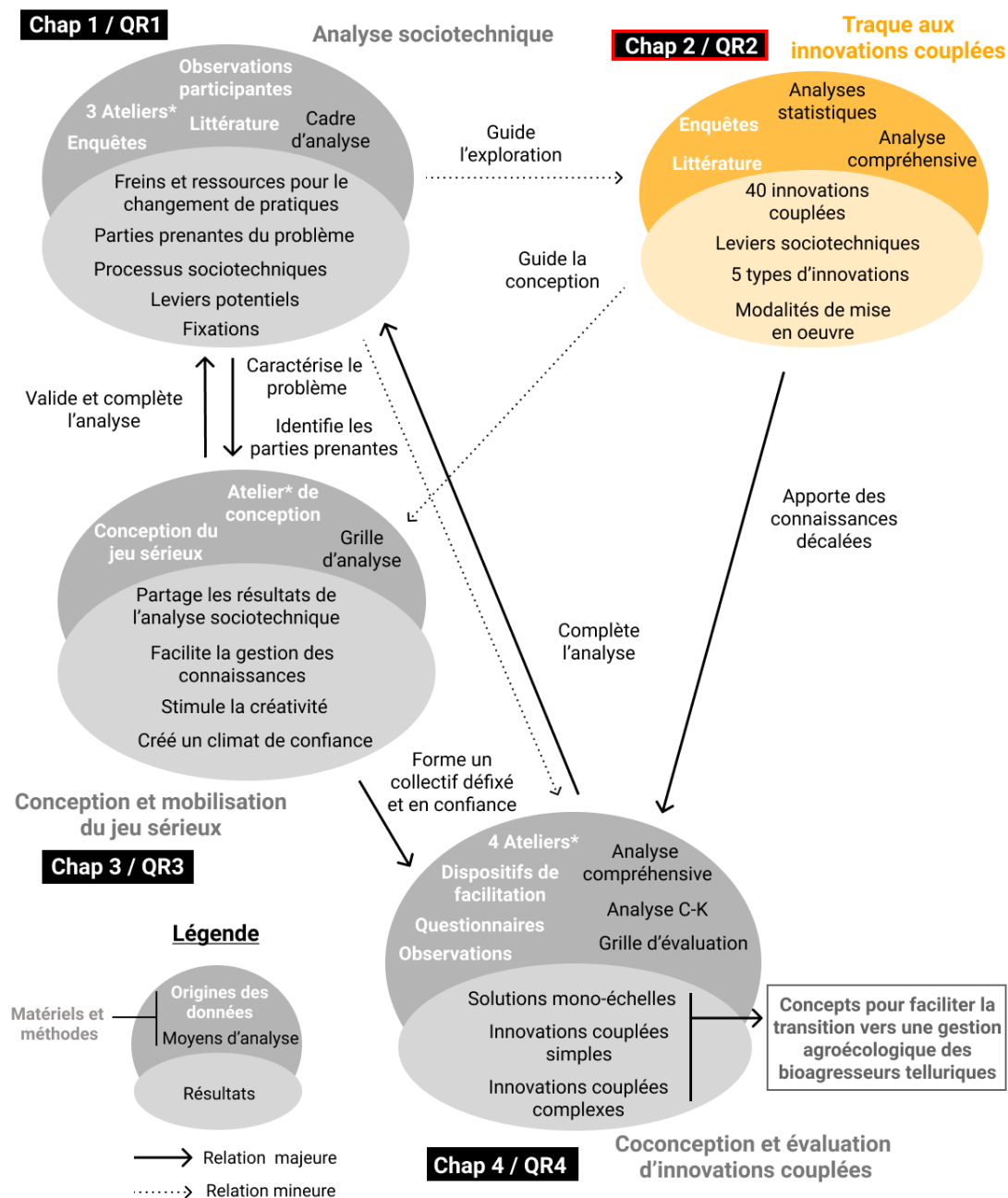


Figure 14 – Place du chapitre 2 (encadré en rouge) dans le dispositif général de la thèse. L'astérisque * après la mention des ateliers signifie que ces ateliers sont les mêmes : l'atelier de conception où le jeu sérieux a été utilisé est un de ceux qui ont alimenté l'analyse sociotechnique.

Tracking coupled innovations at agrifood system level to foster agroecological crop protection in French vegetable production systems

1. Introduction

High pesticides use cause environmental and human health hazards (Tilman et al. 2002; Plumecocq et al. 2018). Despite public policies at French (Ecophyto program) and at European level (Pesticide package), pesticide use in agriculture has continued to increase over the last ten years. Yet superior crop protection alternatives do exist, such as Integrated Pest Management (IPM) and Agroecological Crop Protection (Cowan and Gunby 1996; Deguine et al. 2016; Gamliel and van Bruggen 2016). Agroecological Crop Protection is a set of agroecological practices (Wezel et al. 2014) which “[promote] the ecological functioning of agroecosystems by directly or indirectly optimizing interactions between living communities (plant, animal and microbial) both in and above the ground”, mainly using preventive and non-synthetic methods (Deguine et al. 2016). However, some agroecology scholars have recently shown that the use of these more promising technologies was not scaling up, due to a lock-in around the current conventional farming model (farming systems dependent on synthetic pesticides and fertilizers) and conventional value chains (standardized food and long-distance trade) (Cowan and Gunby 1996; Vanloqueren and Baret 2009; Meynard et al. 2018; Della Rossa et al. 2020).

Recent studies have nevertheless also identified sociotechnical levers that could be used to overcome barriers to change in farming practices and “unlock” the dominant regime, such as the fair redistribution of agroecological products’ added value, the fluid sharing of information between stakeholders (actors facing the same problems or situations), and coordination between farmers to share resources (Boulestreau et al. accepted; Meynard et al. 2018). These levers are seen as means to reshape the agrifood system, that is, the “system [that] gathers all the elements (environment, people, inputs, processes, infrastructures, institutions, etc.) and activities that relate to the production, processing, distribution, preparation and consumption of food and the outputs of these activities, including socio-economic and environmental outcomes” (HLPE 2014 cited in Meynard et al. 2017). Studies on farmers’ trajectories of change in their practices (Chantre and Cardona 2014; Mawois et al. 2019), as well as sociotechnical analyses of complex agricultural problems (Vanloqueren and Baret 2008; Meynard et al. 2018; Della Rossa et al. 2020) and Agricultural Innovation Systems (Schut et al. 2015b), have shown that organizational, technical and institutional innovations are needed within agrifood systems in order to support a large scale transition to agroecological practices in the field and on farms. Meynard et al. (2017) thus proposed the concept of “coupled innovation”, initially in regards to the coordination of innovation across cropping systems and food processing.

In this paper, we focus on coupled innovations at territorial agrifood system level that combine intentionally or not intentionally innovative agroecological crop protection with technical, organizational, and/or institutional innovations at the agrifood system level to enable such protection. We characterize these within vegetable production systems in France, which are of particular interest

for two reasons: (i) a strong lock-in effect exists around pesticide use and standard quality value chains (Boulestreau et al. accepted); and (ii) consumers are highly sensitive to the issue of pesticide residues in vegetables (as they are fresh produce).

Tracking innovative cropping systems is an approach that has been developed to characterize innovative farming practices or cropping systems already implemented by certain farmers, along with the underlying rationales, their conditions of application and their outcomes. This approach aims to produce resources to help the redesign of other cropping systems and improve their sustainability (Salembier et al. 2016; Verret et al. 2020). To our knowledge, no tracking has yet been carried out for coupled innovations. It is our hypothesis that tracking this type of innovations will yield generic knowledge on the sociotechnical levers mobilized in the innovations at stake and the ways in which they are combined and implemented. In this article, our objective is thus twofold. First, we tailor the tracking of innovative cropping system to the characterization and cross-analysis of numerous cases of innovations (40 cases) at agrifood system level. In this respect, our study is original compared to monograph analyses, which describe a single innovation fostering a sustainability transition at agrifood system level (Magrini and Duru 2014; Bui et al. 2016; Salembier et al. 2020). Second, through the cross-analysis of diverse and numerous cases, we seek to identify recurrent sociotechnical levers and ways of combining and implementing them, including barriers to their implementation and conditions of success. These cognitive resources could then be used to inspire agrifood system stakeholders in other contexts, to design coupled innovations for supporting the implementation of agroecological practices.

In our study, we characterize coupled innovations in 40 cases involving agroecological crop protection in vegetable production systems. This work focuses on the scale of France's national territory, considering diverse cases from a range of production basins, with diverse forms of agrifood system organization and farming practices.

2. Material and methods

In the following sections, we present how the cases were identified, the data collected (2.1.), and how they were analyzed (2.2.).

2.1. Data collection

In order to identify cases of coupled innovations, we first required a clear definition of "innovation". Innovation here refers to the introduction of something new in an economic and social organization (Faure et al. 2018), which differs from the dominant model. It can be technical but also organizational and/or institutional (Meynard et al., 2017). Innovation is also contextual. Something can be considered innovative in a particular context, by certain actors or in a certain region, by virtue of being very different from the dominant model at hand, while being seen as old, commonplace and part of the dominant model in another context. For instance, introducing shared machinery cooperatives was new, different and innovative for vegetable farmers in Provence (South-East France), but very common and part of the dominant model in Brittany (North-West France). For this study, we sought coupled innovations that were deemed innovative in at least one of the French vegetable production basins according to the members of the GIS PICLég, a national expert group responsible for coordinating

French Research and Development (R&D) on integrated pest management for vegetable production (www.picleg.fr).

We looked for innovations coupled intentionally or non-intentionally because we believe that both can provide interesting knowledge for designing new coupled innovations. An example of innovations coupled intentionally is: a radish and a wheat farmers structured a novel system for plot exchange in order to diversify their cropping systems and designed jointly their new cropping systems. An example of innovations coupled non-intentionally is: a radish and a wheat farmers structured a novel system for plot exchange for a better fairness regarding high productive field allocation, and it resulted in more diversified cropping systems as a spill-over effect.

We sought these innovations at sectoral and territorial agrifood system (STAFS) level, defined as “all stakeholders from the agrifood system influencing food production, processing, distribution, preparation and consumption within the territory, and the food production sector(s) in which the farming practices are embedded, and the interaction between these stakeholders” (Boulestreau et al. accepted).

The cases were selected based on the following criteria:

1. There was a clear link between agroecological crop protection practices and/or technical, organizational or institutional innovations at STAFS level enabling the implementation of those practices. This link could be direct or indirect. In some cases, enabling agroecological crop protection was a key goal for the stakeholders, and in others it was a spill-over product of their coordination.
2. Each case involved at least two stakeholders from the STAFS coordinating with one another (e.g., two farmers, or a group of farmers and a marketing firm).
3. The overall sample covered a wide range of cases, so as to identify the largest possible diversity of sociotechnical levers and ways of implementing them. We did not strive for a representative sample at national level. To cover a wide diversity of cases, we sought to ensure that the overall sample:
 - a. involved all types of agrifood system stakeholders;
 - b. was comprised of diverse vegetable production systems: sheltered and open-field, small and large scale, production of fresh vegetables and processed vegetables;
 - c. related to the management of the three different types of bioagressors: pests, diseases and weeds;
 - d. covered all three types of innovation: institutional, organizational and technical;
 - e. covered different territorial scales: municipalities, production basins, regions and beyond;
 - f. covered different French vegetable production basins.

In order to identify the cases and verify their novelty, we interviewed R&D experts from vegetable production systems in various French production basins and explored scientific and grey literature (Peyras 2019). When the concept of “coupled innovation” was not clear to the expert interviewed, we provided examples based on our knowledge (e.g., specialized farmers exchanging plots to diversify). Once we had identified the cases, we presented them to experts from the national GIS PICLég group to verify their innovative nature. We thus selected 40 case studies (Cs) of coupled innovations (Table

6), at different stages of development: most were ongoing (31), while some were only starting (6) or had finished (3). A brief overview of the different cases is provided in the Results section (3.1).

For all cases, the goals were (i) to characterize the sociotechnical levers used by the actors involved to enable the implementation of agroecological practices and (ii) to collect data on the way they were implemented. This work was carried out based on 21 categorical variables (Table 7). For each of the 40 case studies, we spoke to between one and four stakeholders in semi-structured interviews, which we supplemented with grey literature when available.

We selected five of the case studies for further analysis, to gain a deeper understanding of the innovations involved (Cs5, Cs23, Cs27, Cs29, Cs37, Table 6). This comprehensive analysis aimed to provide insight into the different innovation types we identified (see Section 3.2.). To this end, we endeavored to gather information from a range of sources, to reach as complete as possible an understanding of the innovations. A larger number of viewpoints were gathered (two to four interviews per case), in order to represent the diversity of stakeholders, and when information was missing, grey literature was used as a complement (Cs23, Cs27 and Cs33). We should note that some of the cases involved only two stakeholders (e.g., Cs5), hence the limited number of interviews.

We led the semi-structured interviews for the five “in-depth case studies” and for the whole sample using two different guides, respectively: (i) one based on the categorical variables and additional questions (Table 2) and (ii) one based on the categorical variables only (Table 7);

Table 6 - List of the 40 case studies of coupled innovations. When a limited number of specific crops were targeted, these are indicated in brackets. Cs stands for case studies. The titles in bold correspond to the five in-depth case studies.

Cs n°	Title
1	Annual rental of open-field plots between landowners and farmers in a large peri-urban area (melons/wheat)
2	Annual rental of open-field plots between cereal and vegetable farmers (carrot/wheat)
3	Annual exchange of open-field plots and workforce between farmers in a context of intense pressure for land resources (celery/corn)
4	Annual rental or exchange of open-field plots between farmers (seed potatoes/forage or meadow)
5	Annual rental of sheltered plots between two farmers (radish/lettuce)
6	Multi-year rental of an open-field plot split in three to establish a rotation between two farmers (melon/wheat)
7	Annual rental of open-field plots between a Belgian processing company and French farmers or landowners (potatoes)
8	Annual or biannual rental of open-field plots between carrot and arable crop farmers (carrot/maize)
9	Rental of open-field plots between two farmers, with the one involved in a technical group aiming to improve the sustainability of farming practices (potatoes)
10	Support for land consolidation between farmers with semi-natural hedge planting
11	Supply by researchers of a tool for farmers, to identify, manage and map pests in a participatory way
12	Certification of sustainable farming practices for farmer organizations, with collective penalties in case of a breach (tomato and cucumber)
13	Development and evaluation of a decision-making support tool for fungicide treatment for farmers by the inter-branch organization and the firm supply inputs, and farmer support for its use (processed beans)
14	R&D group of organic farmers seeking to develop the practice of green manure
15	R&D group of conventional and organic farmers seeking to better manage weeds in sheltered production
16	On-farm technical visits and peer exchange between farmers supported by an R&D expert
17	Social media use for peer exchange and organization of meetings within a R&D group in the North of France
18	Social media use for peer exchange and organization of meetings within a R&D group in the East of France
19	Incentives for crop diversification by the organic cooperative
20	Incentives for crop diversification by an organic store
21	Incentives for crop diversification by a chain of organic stores
22	Incentives and support by an organic wholesaler for farmers to diversify their crops
23	Supported crop rotation design involving organic farmers and their marketing firms
24	Incentives for artichoke system diversification by a marketing firm, with the support of R&D actors

25	Long-distance pooling of crop rotation and workforce between two farms
26	Flexible pooling of land, workforce, equipment and sales between two farms in a polyculture system
27	Flexible and supported pooling of land, workforce, equipment, inputs and sales between four farms
28	Pooling of land management, equipment and workforce, with coordination of sowing dates to prevent the rapid spread of pests and disease, between 35 farmers across the island of Guadeloupe (melon)
29	Coordination between farmers and R&D for the local production and supply of banker plants hosting natural enemies to fight vegetable pests
30	Bulk purchase of alternative vegetable crop varieties by a group of organic farmers
31	Organization of participatory variety selection by a cooperative with a dedicated experimental station and its farmers.
32	Co-development and management of an organic experimental station by stakeholders of the organic vegetable sector
33	Management of an experimental station directly by the stakeholders of the vegetable sector
34	Participatory research and development on agroforestry vegetable farming systems led by a private R&D company with farmers
35	Co-development of and experimentation with a biocontrol system and natural enemy production by farmers and R&D actors
36	Co-development of and experimentation with a plant protection product made from natural extract for the collective management of a problematic orphan pest (the ant <i>Acromyrmex octospinosus</i>) in the Caribbean, by farmers and R&D actors
37	Structuring of an alternative value chain around soil conservation practices guaranteed by specification requirements regulating stakeholders' practices and a charter, and supported by a marketing firm and a R&D network
38	Collective establishment of a Halo blight-free zone for green bean seed production, with prophylactic measures enforced by a dedicated multi-stakeholder committee
39	Support by a supermarket chain to help farmers convert to organic farming, in collaboration with the inter-branch organization and chambers of agriculture
40	Support for organic farmers starting out, through institutional land release in cooperation with R&D, processing and marketing firms.

Table 7 – Analytical framework of the way coupled innovations are implemented. This framework is organized in two parts: (i) supplementary variables describing the way coupled innovations are implemented and (ii) more detailed information gained from the in-depth case studies.

	Supplementary variables for MCA analysis (n=40)		Questions to collect supplementary data for the in-depth empirical analysis of Cs (n=5)
	Variables	Categories of the variables	
Type of innovation	Institutional innovation	yes; no	What supports this classification?
	Organizational innovation	yes; no	
	Technical innovation	yes; no	
How it starts	Main initiator	farmer; upstream; downstream; R&D	How do(es) the initial actor(s) launch the innovation, how long does it take, which resources do they use, for which goal?
	Initial motivation	agronomic; economic; ideological; sanitary; workload; multiple	
	Key factor of successful initiation	trust; economical support; common values; constant motivation of one actor; will to gain knowledge; financial equity	
	Stakeholders' relationship before the start of the innovation	professional; acquaintance; friendship	
How it is implemented in the long term	Spatial level	municipal; production basin; regional and supra-regional	What role does the spatial scale play, e.g., does the physical distance between actors matter?
	Stakeholder network	farmer-farmer; farmers-R&D; farmers-R&D-public administration; farmers-downstream; farmers-downstream-R&D-NGO; farmers-downstream-R&D; farmers-downstream-upstream; farmers-upstream-R&D-NGO; farmers-downstream-upstream-R&D-public administration; farmers-R&D-upstream-public administration; farmers-R&D-downstream-public administration	What is the role of each actor, which actors interact, how, to what end, what are the consequences for the innovations?

	Form of agreement between stakeholders	yearly oral agreement; optional contract; yearly contract; multi-year contracts; permanent contract	
	Frequency of contact between stakeholders	daily; weekly; several times a year; yearly	How long does each step of the innovation take, does the order in which actions take place matter?
Relation to farming practices	Bioagressor targeted	soil-borne bioagressor; aerial bioagressor; group of bioagressors	Which practices are affected by the innovation and how, which cropping systems and which bioagressors are affected?
	Production system concerned	sheltered; open-field for small-scale fresh vegetables; open-field for large-scale fresh vegetables; open-field for processing; multiple systems	
	Organic, conventional or mixed stakeholders	organic; conventional; mixed	
	Agroecological farming practice(s) implemented	integrated organic pest management; breaking reproduction cycles; use of service crops; prophylaxis; multiple	
Conditions of success	Main barrier(s) to successful innovation	competition; lack of resources; distance; relational	What are the different barriers and how do they interact?
	Main resource(s) required	cultivable area; common will; resource actor; outlet; knowledge; inputs; capital	What are the different resources required and how essential are they to the innovations?
	Key factor of lasting innovation	economic outcomes; presence of a stakeholder dedicated to coordination; stakeholder flexibility; frequent solicitations; unbroken trust	What are the various success factors and how are they interdependent?
Evaluation	Qualitative impact on pesticide use	reduction; no impact; increase; could not be evaluated	What is the level of impact on bioagressors and pesticide use, how do these impacts arise from the innovation?
	Qualitative impact on bioagressor pressure	reduction; no impact; could not be evaluated	

2.2. Data analysis

We define a “sociotechnical lever” as a coordinated action within the sociotechnical system that allows for overcoming a barrier to technological change. Applied to changes in farming practices, it refers to a coordinated action within the agrifood system that modifies the determinants of farming practices and contributes to overcoming the barriers to change in these practices, towards more sustainable ones. For instance, ensuring a stable outlet for minor crops modifies the “on-farm availability of material resources” (Table 8) and resolves the existing lack of outlets identified for minor crops (Meynard et al. 2018). For a summary of the different types of determinants of farming practices at farm and STAFS level, see Table 8. The data analysis was performed in four stages.

Table 8 - Analytical framework of the farm-level and sectoral and territorial agrifood system-level determinants of farming practices (adapted from Boulestreau et al. accepted)

Level	Types of practices determinants	Examples practices determinants
Farm level	Farm biophysical factors	Biological communities within the farm, agroecological infrastructures (hedgerows, fallows and grass strips, topology), pedoclimatic conditions
	On-farm availability of material resources	Productive resources (land, capital, workforce, agricultural inputs, equipment such as tractors and tools), infrastructures such as greenhouse and irrigation, buildings, social networks belonging (e.g., knowledge-exchange networks, mutual assistance), outlet
	Farmer's cognitive resources	Empirical and scientific knowledge, know-how, skills
	Strategic decisions	Choices of agricultural production, marketing channel, certification, long-term productive resources (e.g., infrastructure)
	Farmer's personality, preferences and objectives	Risk aversion, ethics, beliefs, way of life, workload management, personal satisfaction, priorities and goals (e.g., maximization of economic profit, environmental care)
Sectoral and territorial agrifood system (STAFS)	Shared regulative (formal) rules	Laws, norms and industrial standards, contracts, specifications, public policies (e.g., subsidies), specifically: agriculture and food regulatory framework and their proper implementation and enforcement
	Shared normative rules	Values, norms, role expectations, customs, responsibilities, duties, authority systems
	Shared cognitive rules	Beliefs, cognitive routines, paradigms
	Availability of material resources	Storage and processing equipment, infrastructures (e.g., roads), inputs, capital, skilled workforce, functional communication and financial infrastructures, time
	STAFS biophysical factors	Landscape support for biodiversity, pest communities, topology, erosion risk, watershed characteristics
	Human factors	Individual personalities and preferences expressed in actors' relations (e.g., friendliness)
	Stakeholder cognitive resources	Empirical and scientific knowledge (e.g., on agroecological practices), know-how, skills
	Quality of knowledge infrastructure	Research, education, extension and development infrastructure (e.g., experimental networks involving farmers)
	Multi-stakeholder interactions	(Co)development and sharing of knowledge and information; project collaborations (e.g., agricultural tool-sharing system); public-private partnerships; networks; representative bodies (e.g., farmers' union); power dynamics; purchase and sale of goods (incl. food commodities)

Step 1: we characterized the sociotechnical levers in each case study based on the data collected, the definition of the sociotechnical levers provided above and the analytical framework of the determinants of farming practices (Table 8). The results are described in the Results section (3.2).

Step 2: For the 21 supplementary categorical variables regarding how the innovations were implemented, we assigned each case study to the appropriate categories, which we determined following an abductive reasoning. We defined possible categories before the interviews. At the interview stage, based on the data collected, categories were then tailored to better reflect that data.

Step 3: We built a typology by multiple correspondence analysis (MCA), followed by a hierarchical cluster analysis on principal components (HCPC) of the sample of 40 coupled innovations studied. The explanatory variables corresponded to the levers, translated as binary variables: “yes” for “lever implemented”, and “no” for “lever not implemented”. Thus, the clusters identified through the HCPC were characterized based on the combination of relevant levers. The supplementary variables described the way the levers were implemented (Table 7). To identify the variables’ categories that characterized each cluster compared to the others, a hypergeometric test was performed on the number of individuals (the case studies) in Cluster X, which compared Category A of Variable α to the other clusters, for each cluster, each category and each variable. A $p\text{-value} < 0.05$ revealed that for Variable α , Category A was more present in Cluster X than in other clusters (Lê et al. 2008). We tested all explanatory and supplementary variables. All statistical analyses were conducted using R (v4.0.2), with the packages FactoMineR and ade4. To identify the variables’ categories characterizing elements that played an important role in the functioning of each cluster’s innovations, although not specific to this cluster, we looked at the percentage of occurrence of each Category A for each Variable α and each Cluster X. These analyses supported a comprehensive cross-case study analysis to reveal generic types of coupled innovation based on similar combinations of levers and provide an overview of the diversity or homogeneity of ways of implementing them. The five clusters are described in the Results section (3.3).

Step 4: For the five coupled innovations studied in depth, a detailed description was written as a “story” based on the analytical grid (Table 7). The aim of this “storytelling” approach was to capture the complexity of the implementation of combined sociotechnical levers underlying the categorical variables used in the MCA for all the other innovations. This afforded more information to understand how the levers were implemented in the coupled innovations studied, so as to in turn further enable the implementation of agroecological crop protection. These cases are presented in the Results section (3.3).

3. Results

In this section, we first present the 40 case studies (3.1.), followed by the levers identified (3.2). We then show that clusters of case studies mobilize the same combination of levers in various ways to foster the implementation of agroecological practices (3.3.). In sections 3.1. and 3.2., the numbers in brackets indicate the proportion of case studies in the overall sample for a given category, whereas in section 3.3 they indicate the proportion of case studies in a given cluster for a given category. In the whole Results section, “N.S.” stands for “not significant” and indicates $p\text{-value} > 0.05$, “*” indicates $p\text{-value} < 0.05$, “**” $p\text{-value} < 0.01$ and “***” $p\text{-value} < 0.001$.

3.1. Brief overview of the 40 case studies

The 40 case studies (Table 6) covered diverse territories, across eight of the twelve metropolitan French regions (with five regions each accounting for more than five case studies) and two overseas regions. They involved a wide variety of systems and actors from the STAFS. The cases captured a diversity of vegetable farming systems, e.g., market gardening in open-field production (10%), under shelter (12.5%), large-scale open-field production of fresh vegetables (30%), and processing (12.5%). All cases involved vegetable farmers, sometimes interacting with farmers working in other production systems (e.g., livestock, arable crops). Marketing firms were involved in the innovations surrounding the long value chain (40%). The R&D actors involved were researchers (e.g., agronomists and technicians from the French research institute INRAE) and extensions services (e.g., a chamber of agriculture, a private advisor and a technical institute). They played an important role in 70% of the coupled innovations studied. Finally, other stakeholders were involved in the innovations, though to a lesser extent: public organizations (15%) such as administrations or water agencies, NGOs and associations (12.5%) such as trade unions and professional organizations, and input suppliers (10%) such as plant breeders, pesticide or biocontrol producers, and input retailers. The organic vegetable sector was overrepresented in the cases compared to its share of the national agricultural area: almost half of the cases involved only organic actors (47.5%), 15% involved a combination of organic and non-organic actors.

The farming practices fostered by the coupled innovations mainly revolved around breaking the cycle of targeted bioagressors (47.5%) (mainly through crop diversification) and organic integrated pest, weed and disease management (32.5%), for instance by stimulating or introducing natural enemies. The other practices related to the introduction of service crops (5%), bioagressor monitoring (5%), prophylactic measures (2.5%), and a combination of several types of practices (7.5%).

In the following sub-sections, we present how the coupled innovations fostered the implementation of alternative farming practices.

3.2. Levers to overcome barriers to change in farming practices

In this section, we identify the levers to overcome barriers to change for agroecological crop protection by analyzing data from the full sample (n=40). In each of the 40 cases, several levers were mobilized. Through an inductive data analysis, we identified 17 types of levers (in *italic*), which we grouped into five categories of levers (in **bold**), detailed in Table 9.

The first category of levers, “**Providing material resources**”, comprises seven levers directly or indirectly providing material resources at farm and STAFS levels (see Table 8) in 75% of the cases tracked. *Financial support* (58% of the Cs) consists in providing free services (e.g., a decision-making support system in Cs13), access to resources at a lower price (e.g., the bulk purchase of inputs in Cs30), easier access to capital (e.g., pooling the investment capacity of several farmers in Cs27 and Cs31), or paid services (e.g., Cs1 to Cs9). *Outlet guarantee* (32.5%) ensures that the produce yielded with the new practices (e.g., diversified production in Cs32) will be sold at an attractive price. *Land pooling* (30%) is achieved by renting, exchanging or sharing land (e.g., Cs1 to Cs9). Some of the innovations also provide *Access to new input* (17.5%) (e.g., Cs30: varieties) and *New equipment or access to*

facilities (10%) (e.g., shelter infrastructure in Cs25). Some coupled innovations facilitate access to workforce (*Workforce access*, 12.5%), for instance by pooling workforce (Cs27) or providing services (Cs6 and Cs8). Finally, some innovations afford workforce time savings (*Time saving*, 15%), for example with each farmer specializing in specific tasks within pooled farms (Cs25 and Cs26).

The second category, “**Risk reduction**”, relates to a single lever: *Risk reduction* (42.5%) at farm level, for instance by securing outlets (Cs32) or renting out land for high-value cash crop production instead of producing risky crops (carrots vs maize in Cs8). This lever is influenced by the perception of the farmers about the practices at hand and their sensitivity to risk (Table 8).

The third category, “**Providing cognitive resources to farmers and other STAFS stakeholders**”, encompassed three levers that involve filling a knowledge, data and know-how gap, i.e., cognitive resources, for farmers (farm level – Table 3) and other STAFS stakeholders (STAFS level – Table 8). It covers the vast majority of the coupled innovations sampled (77.5%). *Knowledge provision* was the second most used lever in our sample (62.5%). It is mobilized in coupled innovations when knowledge, data or know-how is provided to certain actors (mainly farmers) by other actors (mainly public or private R&D organizations, or knowledge provision professionals). It also involves knowledge and data exchange between farmers and other actors, although not as often. We distinguished this category from *Peer-exchange* (35%) among farmers, which is known to provide farmers with multiple cognitive and social resources (Mawois et al. 2019) that they appropriate more easily. *Knowledge production* (32.5%) corresponds either to the production of new knowledge through experiments (e.g., Cs29 and Cs35), or to the formalization of stakeholders’ empirical knowledge (e.g., Cs14 and Cs15).

The fourth category of levers, “**Creating or changing shared rules**”, relates to supporting change in farming practices at STAFS level (Table 8), and applies to more than half of the cases (55%). *Change or set of regulative rules* (37.5%) is implemented either through a legal entity (e.g., a cooperative for sharing equipment, land and workforce in Cs26, Cs27 and Cs28) or through contracts or charters (e.g., farming practice specification requirements to obtain a quality certification in Cs12 and Cs37). *Change in normative rules* (27.5%) specifically relates to changes in role expectations (e.g., buyers from marketing firms expected to support crop diversification, in Cs22) or in norms (e.g., rented field has to be returned in the same state in which it was found, in Cs5 and Cs6). *Change in cognitive rules* rarely played a role (7.5%). This corresponds to situations where a stakeholder changing other actors’ paradigms or values, for example with a R&D actor sensitizing buyers to get them to take crop diversification into account in their interactions with farmers (Cs22).

Finally, the fifth category, “**Facilitating stakeholders’ interactions**”, also was very present in the cases studied (75%). It consists of three levers to facilitate the multi-stakeholder interactions required in order to foster change towards agroecological practices, and can also involve creating or strengthening knowledge infrastructure (Table 8). We found that *Intermediation* by intermediary actors occurred in most cases. The intermediaries were mostly public extension services (in 15 cases), but also NGOs (three cases), farmer organizations (three cases) and other stakeholders (five cases – researcher, technical committee, independent advisor). They handled various tasks: connecting stakeholders; facilitating the building of a common vision; organizing and facilitating meetings either to plan actions (e.g., a new production campaign in Cs20 and Cs21) or to exchange and formalize knowledge (e.g., between farmers in Cs14 and Cs15); mediating negotiations (between farmers and

marketing firms in Cs22 and Cs37) or organizing the collection, production, formalization and translation of knowledge and its dissemination to various stakeholders (e.g., experimental stations in Cs32 and Cs33). *Structuring of a new network* applied to 45% of the coupled innovations tracked. The new infrastructure facilitates stakeholders exchanging knowledge or organizing collective actions. It then helps them to overcome barriers to change in farming practices. Finally, 20% of the coupled innovations studied specifically involved the lever *Facilitation of communication between stakeholders* that normally have little interaction with one another surrounding farming practices. For instance, in Cs28, a marketing firm, farmers and an agronomist came together to discuss pest dynamics, so as to plan rotations on the 35 farms involved to prevent the rapid spread of pest while respecting the marketing firm's requirements.

Conversion to organic farming was not characterized as a lever *per se* but as mobilizing the levers "*Change or set in regulative rules*" and "*Financial support*".

This first inductive analysis revealed 17 levers, which we used as explanatory variables to characterize clusters of coupled innovations sharing a similar combination of levers, with MCA and HCPC methods.

Table 9 – Sociotechnical levers mobilized by coupled innovations.

Lever categories	Sociotechnical levers (% occurrence of lever use within the overall sample, n=40)
Providing material resources	Access to new inputs (17.5%); Land pooling (30%); New equipment or access to facilities (10%); Workforce access (12.5%); Time saving (15%); Financial support (57.5%); Outlet guarantee (32.5%)
Risk reduction	Risk reduction (42.5%)
Providing cognitive resources to farmers and other STAFS stakeholders	Knowledge provision (62.5%); Knowledge production (32.5%); Peer exchange (35%)
Creating or changing shared rules	Change or set in new regulative rules (37.5%); Change in normative rules (27.5%); Change of cognitive rules (7.5%)
Facilitating stakeholders' interactions	Structuring of a new network (45%); Facilitation of communication between stakeholders (20%); Intermediation (67.5%)

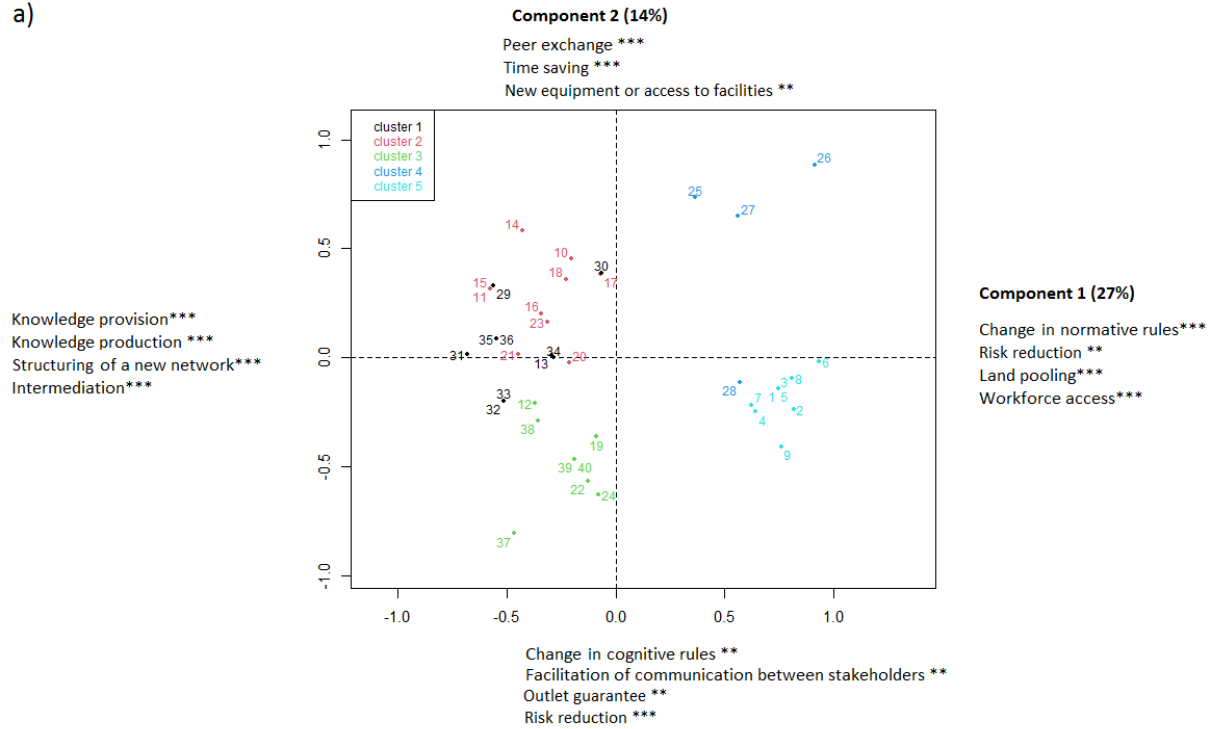
3.3. Characterization of five clusters of coupled innovations

Combined with the HCPC classification, the MCA analysis revealed five clusters of coupled innovations, characterized by the sociotechnical levers as explanatory variables (maximization of the inertia gain, Fig. 15). A three-component model provided a good fit, explaining 55% of the variance. All the correlated variables ($p < 0.01$), in other words the levers explaining Components 1, 2 and 3, were

identified and sorted according to their correlation with the components (Figure 15). Component 1 was positively correlated with *Change in normative rules*, *Risk reduction*, *Land pooling*, and *Workforce access* characterizing Clusters 4 and 5 (positive coordinates), and negatively correlated with *Knowledge production and provision*, *Structuring of a new network* and *Intermediation*, which characterized Clusters 1, 2 and 3 (negative coordinates). Component 2 was positively correlated with *Peer-exchange*, *Time saving*, *Access to new equipment or facilities*, which characterize Clusters 2 and 4 (positive coordinates), and negatively correlated with *Change in cognitive rules*, *Facilitating of communication between stakeholders*, *Outlet provision* and *New equipment or access to facilities*, which characterize Clusters 3 and 5 (negative coordinates). Finally, Component 3 was positively correlated with *Change or set of new regulative rules*, *Facilitation of communication between stakeholders*, *Outlet provision* and *New equipment or access to facilities*, which characterize Clusters 3 and 4 (positive coordinates), and negatively correlated with *financial support*, which characterizes Clusters 1 and 5 (negative coordinates).

In the following sections, we describe the five clusters: (1) Co-development of knowledge infrastructure partly coupled with input production and provision to foster the implementation of agroecological practices; (2) Facilitation of peer exchange among farmers around agroecological farming practices; (3) (Re)structuring of the food value chain to support the implementation of agroecological farming practices; (4) Pooling of material and cognitive resources by farmers to foster the implementation of agroecological practices; and (5) Renting or exchanging fields to diversify crop rotation. For each of the five clusters, we first present and explain the combination of levers that characterize the cluster in question and their links with agroecological practices. We then show within each cluster the diversity of ways of implementing levers, of **impacts on pesticide use and bioaggressor management, and of success conditions**. Finally, for each cluster, we illustrate the implementation of the sociotechnical levers in a specific “in-depth case studied”. We differentiate the categories of explanatory or supplementary variables that are significantly specific to a cluster compared to the others, from the one that are not significantly specific but which are largely present in the cluster and meaningful for describing it using N.S. abbreviation for “Not Significant”. Figure 16 summarizes the typical functioning of coupled innovations for each cluster.

a)



b)

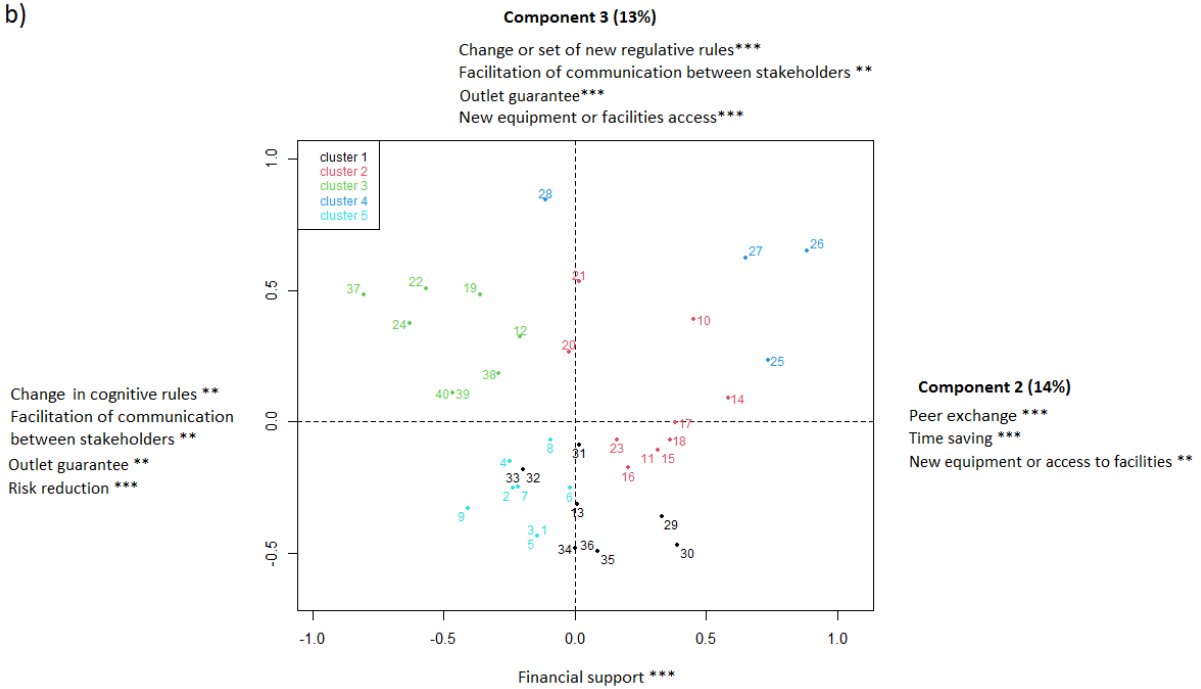


Figure 15 – Distribution and grouping of the 40 coupled innovations according to the levers used. a) Distribution according to Components 1 (27.2% of the variance) and 2 (14.2%) and their correlated variables. b) Distribution according to Components 2 (14.2%) and 3 (13.3%) and their correlated variables. The significance of the correlation between levers and the components is indicated with ** for p -value<0.01 and *** for p -value<0.001. The distribution according to Components 1 and 3 shows little difference with (a), hence it is not presented.

3.3.1. Cluster 1: Co-development of knowledge infrastructure partly coupled with input production and provision to foster the implementation of agroecological practices

Cluster 1, “Co-development of knowledge infrastructure partly coupled with input production and provision to foster the implementation of agroecological practices”, is comprised of nine coupled innovations and characterized by the combination of the following levers: *Knowledge production* (89%***), *Structuring of a new network* (89%**), *Financial support* (78%*) and *Access to new inputs* (56%*); and also using, for the largest share, *Knowledge provision* (89% N.S.) and *Intermediation* (78% N.S) (Fig. 16a). For half of the cases studied, the knowledge produced and provided was explicitly associated with the use of new specific input (e.g., a biocontrol agent in Cs29, Cs35 and Cs36) or new varieties (Cs30, Cs31). For the other half, this knowledge related to a range of agroecological practices, tested on experimental stations (Cs32 and Cs33) or in an agroforestry network (Cs34), or advised through a Decision-Making Support System (Cs13). This knowledge was produced and provided through the structuring and facilitation of new networks. Intermediation by a professional organization (Cs13, Cs33), public R&D (Cs29, Cs32, Cs35 and Cs36) and a cooperative (Cs31) facilitated interaction within new knowledge building and sharing networks, comprised of farmers, public organizations and private companies. They were financially supported mostly by public R&D subsidies (Cs29, Cs32, Cs33, Cs35 and Cs36) as well as marketing or input-supply firms (Cs13, Cs32 and Cs33).

The coupled innovations in Cluster 1 specifically relied on technical innovations (56%*) to implement levers, such as new production techniques for biocontrol input production (Cs29, Cs35, 36) (Fig. 16a). Yet organizational innovations are predominant, as all the innovations involved novel networks of actors. The stakeholders shared professional ties (89%*). The conditions of success, according to the interviewees, depended on the degree of reliance on the availability of material and human resources. Resources were the primary barrier, (89%***) and the main resources were capital (30%**) and inputs (30%**). Moreover, in 89% of the cases studied, the key factors of lasting innovation revolved around human resources (presence of a stakeholder dedicated to coordination, frequent solicitation, or stakeholder flexibility). We should also note that the innovations were mainly initiated by public R&D actors (67% N.S.), and primarily within the organic sector (67% N.S.). Finally, the stakeholders interviewed considered that these coupled innovations showed rather good results for pesticide reduction (56% N.S.) and bioaggressor reduction (67% N.S.).

Case 29, which we analyzed in depth, shows how the abovementioned elements can be concretely combined to foster the implementation of new farming practices in a given territory. This coupled innovation consisted in developing a local supply of banker plants and natural enemies, and the related technical support. The local organic farmers’ association (CIVAM) brought together 15 farmers around this project (*Intermediation* and *Structuring of a new network*). In 2014, they initiated a R&D group funded by French public subsidies (*Financial support*). The project was carried out in partnership with the INRA experimental station Alenya and the local farming high school. These two partners were in charge of developing and testing growing techniques for banker plants and natural enemies, and for supplying the organic farmers’ association with the relevant inputs (*Knowledge production*, *Access to new inputs*). The project also involved a plantlet nursery. The association’s technical advisor coordinated the project: he connected the participants, defined the shared goal, formalized knowledge

(*Knowledge production*), translated and transferred it to the high school and the farmers (*Knowledge provision*), and delivered the banker plants to the farmers (*Access to new input*), with the support of a technician and researchers from INRA (*Intermediation and Structuring of a new network*). The R&D group allowed for building lasting cooperation between the association and the high school, which continued even after the subsidies ended (2017). This coordination afforded total control of black aphids on Cucurbitaceae crops on participating farms. The main barriers encountered were (i) economic viability, (ii) the supply of inputs to breed natural enemies (e.g., samples of pure strains of black aphids) and (iii) the lack of farmer involvement in the production process. The key factors of success were shared motivation, funding, access to the required equipment, inputs and facilities, a dedicated facilitator, and relevant know-how.

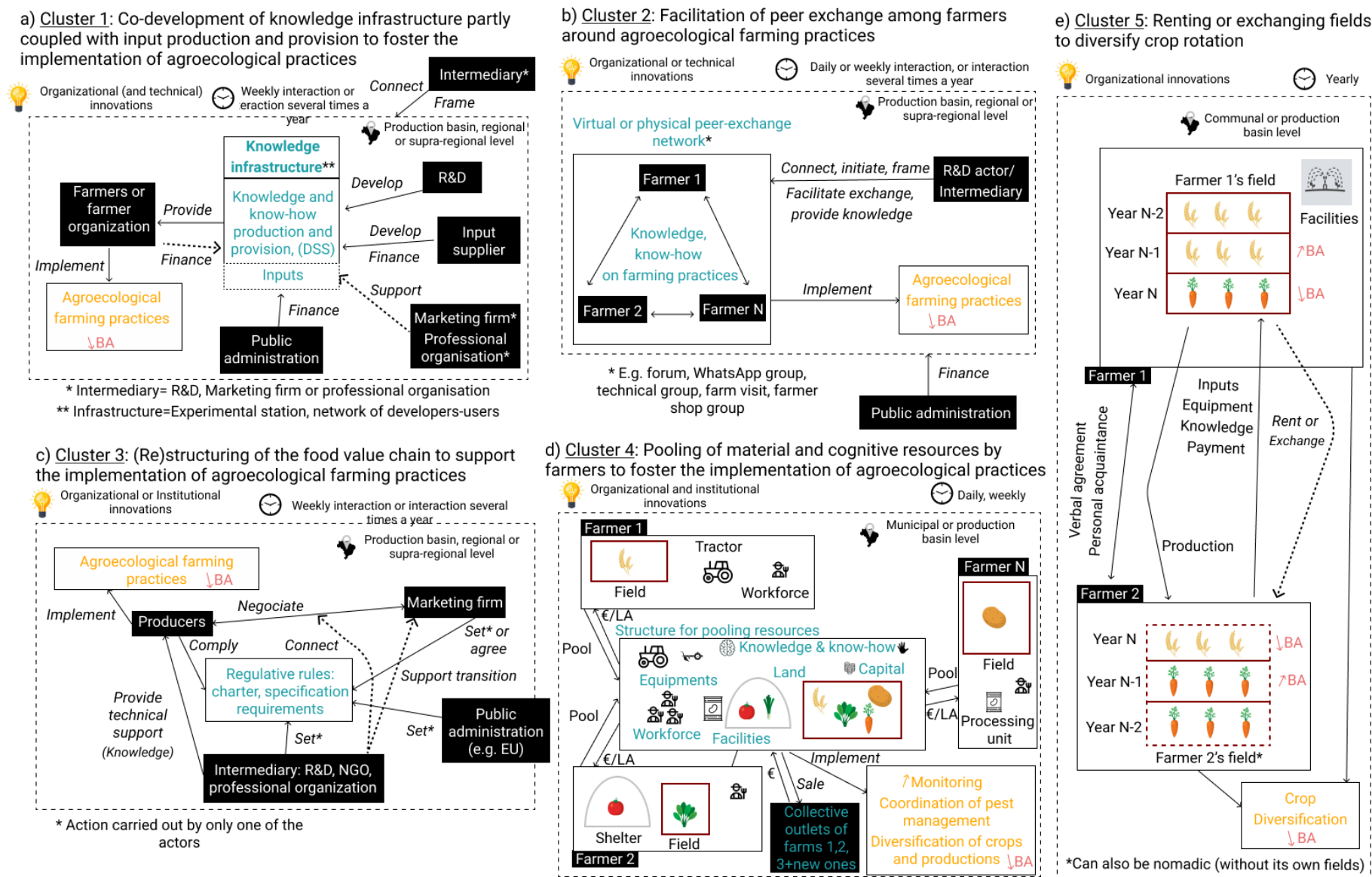


Figure 16 - Ideotypes of coupled innovations to enable change in farming practices, towards agroecological practices. Organic farming is overrepresented within Clusters 1 to 4. Farming practices are indicated in orange, the objects of coordination in blue, and the bioagressors (BA) managed in red. The black squares represent the stakeholders. The large dotted frames represent the territory across which the coordination is taking place (some actors can be outside, e.g., Clusters 1 and 2, or both inside and outside, e.g., Cluster 3). The dotted arrows represent optional actions by stakeholders. a) DSS = Decision-Making Support System. While input provision is optional, it was a key and original feature of half the coupled innovations studied. c) EU = European Union. d) €/S = benefits redistributed as a share of the resources pooled (especially land area).

3.3.2. Cluster 2: Facilitation of peer exchange among farmers around agroecological farming practices

Cluster 2, “Facilitation of peer exchange among farmers around agroecological farming practices”, is comprised of 10 coupled innovations, all mobilizing *Peer exchange* (***) and *Intermediation* (***) (Fig. 16b). We can also note that in this cluster, *Knowledge provision* was mobilized in 80% of the cases, *Knowledge production* in 40% of the cases, and *Structuring of a new network* in 50% of the cases (N.S.). This cluster encompasses coupled innovations that mainly revolved around the facilitation of a new or existing peer-exchange network of vegetable farmers and the transfer of formalized knowledge to these farmers. Most of the networks were facilitated by public extension services, focusing on knowledge about a specific agroecological technique (e.g. leek as green manure in Cs14; also Cs10, Cs15 and Cs23), the practices of the farms visited (Cs16), or simply the practices of the farmers around the table (Cs10, Cs20 and Cs21), partly mobilizing tools to support this facilitation: WhatsApp groups (Cs17 and Cs18), and a web forum linked to a tool to identify, map and provide knowledge on pest management (Cs11). As in Cluster 1, these networks constitute knowledge infrastructure.

The innovations in Cluster 2 were initiated by public R&D actors (70%*), with a view to improving farming practices (agronomic motivations, 60%*) (Fig. 16b). Knowledge acquisition was a major factor driving the development of the innovation at hand in this cluster (40%*). Knowledge was also the main resource needed (50%**). The innovations mainly involved cooperation between farmers and R&D actors (100% of the cases), public administrations (20% of the Cs) or marketing firms (30% of the Cs), at production basin level (70% of the Cs) or higher (30% of the Cs), through regular meetings (several times a year, weekly or daily for 90% of the cases). In half of the cases, the innovation arose from purely professional relations, and in the other half from personal acquaintances. The key factors of lasting cooperation were “frequent solicitations” (40% N.S.) and the “presence of a stakeholder dedicated to coordination” (40% N.S.). The main barriers were “distance” (40% N.S.) and “relational” challenges (30% N.S.). Half of the cases mostly involved actors from the organic sector. The impact on bioaggressors and pesticide reduction was only evaluated in 30% of the cases, and was positive.

Case 23, which we analyzed in-depth, illustrates the characteristics of Cluster 2, with the co-design of diversified crop rotations (species, varieties and service crops). It was initiated and led by INRA Alenya researchers as part of the European project *DiverImpacts* (2017-2022) (*Financial support*) to develop methods to facilitate crop diversification, and thus reduce bioaggressor pressure. It involved the extension services of the local chamber of agriculture, four organic farmers, and two organic marketing firms selling the vegetables. The researchers and extension service agent identified and brought the other stakeholders onboard (*Structuring of a new network* and *intermediation*), as well as identifying organizational, technical and marketing barriers to crop diversification for vegetable farmers on the Roussillon region (*Knowledge production*). They then co-designed diversified cropping systems with the farmers and marketing firms (*Intermediation*, *Peer-exchange* and *Knowledge diffusion*). The INRA researchers created tools for the diagnosis and co-design stages, with the support of the participants of the European project (*Knowledge production*). The INRA researchers and technicians designed and led experiments on crop diversification on their experimental station,

from cropping to sales, to serve as a basis for knowledge production (*Knowledge production*) and exchange (*Peer-exchange*, *Knowledge diffusion* and *Intermediation*). The researchers and extension services structured the evolution of the project, ensuring that the other stakeholders' expectations were met (*Intermediation*). They then capitalized on the knowledge co-produced. According to the interviewees, the main barriers were the high cost of the overall methodology, and difficulties in mobilizing a diverse range of farmers (especially conventional farmers). The main conditions of success were shared motivations, the availability of knowledge, the financing of researchers and advisors, involving a diverse range of stakeholders (especially marketing firms), and tailored work with the farmers and marketing firms. According to the extension services involved, cropping system prototypes were designed that the farmers would never have imagined alone, one of which was already implemented in 2019.

3.3.3. Cluster 3: (Re)structuring of the food value chain to support the implementation of agroecological farming practices

Cluster 3, “(Re)structuring of the food value chain to support the implementation of agroecological farming practices”, is comprised of eight coupled innovations that relied specifically on *Outlet guarantee* (100%***), *Change or set of new regulative rules* (87,5%**), *Knowledge provision* (100%*), and the *Facilitation of communication between stakeholders* (100%*) (Fig. 16c). The innovations fostered change in practices by guaranteeing an outlet for produces grown using alternatives to pesticides: biological control and integrated pest management (Cs12, Cs37), organic production (Cs24, Cs39, Cs40), diversification of production (Cs19, Cs22), or following strict prophylactic measures (Cs38). They also provided farmers with the new knowledge needed to implement these alternative practices. Changes in farming practices were structured and enforced through regulatory rules (except in Cs19), for instance specific requirements enforced through a certification process (Cs37). *Intermediation* (87.5% N.S) and the *Structuring of a new network* (62.5% N.S.) are also important levers in this cluster. These two levers consist in facilitating new or existing networks and supporting communication between their members around agroecological practices, the barriers to their implementation, and levers to overcome them.

The coupled innovations in Cluster 3 specifically revolved around institutional innovations (100%***, e.g. a new certification for alternative farming practices in Cs12, Cs37, Cs38), complemented by organizational innovation for half the cluster, at production basin level (62.5% N.S.) or higher (37.5% N.S.) (Fig. 16c). The innovations were characterized by multi-year contracts (75%*). They involved mainly coordination between farmers, marketing firms and R&D, and for half the cluster, NGO support (50%***). The relations between the stakeholders were exclusively professional (100%**). They met either weekly or several times a year (87.5% cumulated). These innovations were initiated overwhelmingly by marketing firms (62.5%**), and the motivations were initially economic (62.5%*). The main barriers were competition and limited availability of the resources needed (87.5% cumulated), namely “outlets” (37.5%*) as well as “resource actors” (50% N.S.). The key conditions of success of the coordination were economic results and the actors' flexibility (75% cumulated). Most of the innovations could not be evaluated by the interviewees, either because they had only recently been implemented, or

because the person interviewed had not received sufficient feedback from farmers. We also noted that the actors involved were largely from the organic sector (62.5% N.S.).

Case study 37 exemplifies the articulation of the abovementioned elements (Fig. 16c) in the case of the structuring of an alternative value chain around soil conservation management practices. This project was initiated in 2017 by a French NGO, originally co-founded, among others, by alternative agronomists who are known figures of conservation agriculture and agroforestry, a cook, and the head manager of a marketing firm. It was financed and managed mainly by marketing firms, but also by representatives of other stakeholders such as farmers and agronomists. These actors promoted agroecological systems guided by the principles of conservation agriculture (Palm et al. 2014) at national level, to foster soil life and reduce soil-borne pest and disease pressure. The NGO fostered change in the farming paradigm (*Change in cognitive rules*) and the construction and dissemination of knowledge on conservation agriculture systems (*Knowledge production and diffusion*), for instance by organizing a seminar bringing together farmers and all public and private R&D actors to discuss conservation agriculture in horticulture systems in 2019 (*Intermediation*). The NGO's employees (mainly agronomists) connected marketing firms and farmers (*Structuring of a new network*), and supported change in the practices of both groups of actors towards conservation agriculture. They formalized specification rules for vegetable production that commit farmers to gradually shifting their practices towards conservation agriculture (*Change or set of new regulatory rules*). They formalized a charter, and sensitized and monitored marketing firms to ensure that the farmers involved were paid at a fair price and that the marketing firms changed their practices (e.g. changing sorting practices to accept potatoes with irregular shapes) (*Change or set of new regulatory rules, Outlet guarantee*). They provided technical support to assist the farmers' transition either directly or by connecting them with R&D experts in conservation agriculture in their region (*Knowledge diffusion, Intermediation*). Finally, they informed consumers, for instance with a new label for melons in the south-east of France. The main conditions of success were significant funding, facilitation by the NGO acting as an intermediary, the involvement of marketing firms providing outlets, and networks of farmers historically involved in alternative farming practices.

3.3.4. Cluster 4: Pooling of material and cognitive resources by farmers to foster the implementation of agroecological practices

Cluster 4, "Pooling of material and cognitive resources by farmers to foster the implementation of agroecological practices", encompasses four coupled innovations, characterized by two levers: *New equipment or access to facilities* (100%***), and *Workforce access* (75%**) (Figure 16d). The provision of other farm material resources is also important in this cluster: *Land pooling* (75% N.S.), *Time saving* (50% N.S.), *Financial support* (50% N.S.) and *Outlet guarantee* (50% N.S.). *Peer-exchange* (75% N.S.), *Change or set of new regulative rules* (75% N.S.) and *Change of normative rule* (75% N.S.) play a significant role as well. The innovations pooled land, equipment, facilities, workforce, outlets, capital or knowledge, facilitating access to missing resources to implement agroecological practices, for instance shelter to produce specific crops (Cs25) or an agronomist to coordinate planting dates according

to the wind direction so as to limit flows of melon whiteflies, thrips, aphids and powdery mildew (Cs28). The structuring of this coordination relied on the involvement of legal entities (e.g. a machinery cooperative to share tools, in all cases except Cs25) and the setting of norms, responsibilities, duties, and roles (in all cases except Cs27).

Cluster 4 covers four coupled innovations implemented mainly on a small scale at communal level (75%*) (Cs25, Cs26, Cs27), or on a large scale at production basin level (island of Guadeloupe in Cs28) (Fig. 16d). These were specifically initiated by farmers (100%*), with some also involving R&D actors (one case) or a marketing firm (one case). The coordination was carried out by stakeholders who tended to be connected through friendship ties (50%*), but also personal acquaintance (50% N.S.). It specifically took place in daily meetings (75%*). These coupled innovations involved organizational (100%) and institutional (75%) innovations. The small-scale pooling initiatives were specific to organic farming (75% N.S.). They were built on long-term formal contracts (75%) or simple verbal agreements (Cs25). The key conditions of success appear to have been a shared desire to achieve this coordination, proximity between farmers, adaptability, and trust. The impact on bioaggressor and pesticide use could only be evaluated in two cases, where the innovations were considered to have a positive impact on bioaggressors (Cs25, Cs26).

Case 27 exemplifies the innovations in Cluster 4, at small scale. Four farmers from a French agricultural equipment cooperative converted to organic together starting in 2014, and initiated a R&D group in 2015. They were supported by the regional federation of equipment cooperatives and an external coach. Thanks to a specific legal status (SEP, “Société En Participation”), they structured the pooling of their land and crop rotations, inputs supply, workforce and sales proportionally to the surface provided (*Change or set of new regulative rules, Providing material resources*), while remaining independent farms. They also created an equipment cooperative for the storage and packaging of vegetables and tools (e.g., for weeding). The coach, who visited the farmers every two months, facilitated interaction between them and the work on existing or new projects (*Intermediation*). The coordination between the farmers facilitated and sustained access to a skilled workforce, improved effectiveness through the sharing of tasks, increased access to the equipment and facilities needed, and increased the value generated per hectare. It also promoted knowledge exchange between peers (*Peer exchange*). It fostered crop diversification known to reduce bioaggressor pressure, with the introduction of new vegetables and conversion to organic on the territory concerned. The key factors of success were shared dynamics and vision, trust and involvement in the group, financial support (initially from the R&D group for the coach and then banks for the investments required), and economic success. The main difficulty was managing this complex system (administration, human resources).

3.3.5. Cluster 5: Renting or exchanging fields to diversify crop rotation

Cluster 5, “Renting or exchanging fields to diversify crop rotation”, is comprised of nine coupled innovations characterized by the following levers: *Land pooling* (100%***), *Financial*

support (100%**), *Risk reduction* (100%***), and *Change in normative rules* (78%***)) (Fig. 16e). According to our interviews, the cases did not involve any significant **Cognitive resources provision** (0%* to ***) or the *Structuring of a new network* (0%**), and very little *intermediation* (11%**). The cases enabled crop diversification through field exchange or renting between vegetable farmers and other farmers (arable farmers in Cs1 to Cs9, as well as stockbreeding farmers in Cs4), between two vegetable farmers (Cs5) and between a landowner and a processing firm (potatoes, in Cs7). The farmer hosting high-value vegetable crops was always compensated for the rental or exchange, providing them with financial support without associated economic risk.

Cluster 5 covers nine coupled innovations, all fostering crop diversification to break bioaggressor life cycles (100%***), especially of soil-borne pests and diseases (44%*) (Figure 16e). These organizational innovations (100% N.S.) specifically applied at communal level (66%*), and mostly revolved around open-field exchange (only Cs5 was under shelter). They were characteristically initiated by farmers (89%***), for sanitary reasons (89%***). Conventional farmers (100%***) were also the main stakeholders of the coordination (67%**), based on yearly interaction (67%**), and informal agreements (78% N.S.). In most cases (all but one), the stakeholders were personally acquainted, as friends, family or neighbors. The main barriers were competition between farmers wanting to rent land (44%), and conflict between the lessor and the tenant around the management of land and/or infrastructure (relational issues, 33%). Distance was also a barrier in two cases, as the transport of workers and equipment is costly. The key condition of success was trust, both to initiate the coordination (66%***), and to sustain it (78%***). In several cases, the economic balance also initially played a distinctive role (33%*). According to interviewees, these exchanges or rentals allowed for reducing bioaggressor pressure (89%*). However, in two cases, the interviewees reported an increase in herbicide use either to guarantee that the weed pressure would not increase and to strengthen trust (Cs9), or to deal with regrowth of cover crops' plants in a carrot crop from previous arable rotations (Cs2).

Case 5 exemplifies how the coupled innovations in Cluster 5 can be implemented. Two farmers, P1 and P2, owned two farms 12km away from each other, and were friends. P2 was looking for sheltered space where no *Brassicaceae* had been cropped over the last few years to grow radishes with limited bioaggressor pressure (whitefly, mildew, cabbage fly). P1 had free sheltered plots where he had stopped growing lettuces for economic reasons. He thus agreed to rent out the shelter (*land pooling*) to P2 for €1,800/ha (*Financial support*), through a verbal agreement. P2 had to return the shelter in the same state in which he had found it (*Change in normative rules*). The main barriers reported were the distance, the farmers' desire to be independent on their own land, and the wear and tear of paths and facilities. The key factors of success were good communication about each partner's needs (e.g. specific soil treatment), exchange around crops requiring little intervention, the compatibility of the two farmers' cropping systems (e.g. P1 having free plots when P2 needed them) and of the facilities. As a result, P1 and P2 diversified their crop rotations, without the need for P1 to develop new knowledge to grow a new crop, invest in new equipment (in this case a radish seeder), or find new outlets.

4. Discussion

The discussion is organized in two parts: (i) we reflect on the tracking results and methodology and (ii) we discuss the potential of our approach to support co-design processes and the management of innovation niches.

4.1. Tracking of coupled innovations for sustainable agrifood systems

This is the first cross-cutting study and classification carried out on such a large sample of existing coupled innovations. Yet each of the five types of coupled innovation we distinguished are consistent with cases analyzed in several monographic studies. The case studies reviewed in that literature are not specific to vegetable farming nor crop protection, thus supporting the generic scope of our findings. This shows that the five types of coupled innovation we characterized can be found in other production systems than vegetable systems and extrapolated to farming practices other than agroecological crop protection. For instance, the Cluster 2's type of innovation have been explored extensively in analyses of peer-exchange groups for input reduction in arable cropping systems (Cerf et al. 2017; Compagnone 2019) or for transitioning to alternative feed practices in beef production (Compagnone 2019). The Cluster 3's type of innovation have been explored in analyses of alternative value chain building approaches to foster the implementation of agroecological practices, including crop diversification in arable and vegetable farming systems and animal husbandry (Magrini and Duru 2014; Bui et al. 2016; Berthet and Hickey 2018). Salembier et al. (2020) have contributed to formalizing knowledge on innovations similar to the ones from Cluster 1, through their extensive analysis of the NGO-farmer network functioning facilitating the development of equipment for agroecological practices suited to farmers' specific needs for vegetable production, arable crops, vineyards and orchards (*Atelier Paysan*). Lucas et al. (2018) have shed light on Cluster 4's type of innovation, studying French machinery cooperative systems and other related material resources pooling mechanisms for farmers, in arable and livestock systems. Finally, Clément et al. (2019) and Soulard (2014) have provided insights into Cluster 5's type of innovation, in their studies on land exchanges and "nomadic agriculture" involving arable, vegetable and livestock systems. While the links with change in farming practices is not always explicit in the abovementioned literature, organizational, institutional and technical innovations with the potential to overcome barriers to change in farming practices are indeed described.

Some cross-cutting insights can be given regarding the way that the coupled innovations we studied are implemented. First, in terms of key factors of success, human factors are fundamental in all cases: a shared vision of the project among stakeholders, shared trust, active involvement in the coordination of each partner, good communication, and an ability to make trade-offs. This finding is supported by the literature cited earlier. Second, involving farmers in coordination initiated by other stakeholders has often been reported to be challenging (see for instance Berthet and Hickey, (2018), whereas coordination was easier when the farmers became involved in the project at an early stage, or when they themselves initiated the project. Third, organic farming was overrepresented in the first four clusters and not represented in the fifth

one. We posit that this overrepresentation is due to the role of the organic farming sector as a laboratory for experimentation, a pioneer of alternative farming, as has already been described in other studies, at both farm and agrifood system level (Boulestreau et al. accepted; Niggli et al. 2015). Regarding Cluster 5, the absence of organic farms is likely due to the distance between the farms, which is a real barrier, for it is still rare, on the French territory, to have two organic neighbor farmers likely to rent or exchange their plots for crop diversification, due to the limited area dedicated to organic farming. Fourth, intermediaries played a key role in the majority of the coupled innovations we studied. For instance, Cs29 (3.3.1) and Cs37 (3.3.3) show that intermediaries fulfilled the main network manager functions, organizing collective innovation for agrifood systems' sustainability transition, as defined by Berthet and Hickey (2018): (i) connecting actors, (ii) framing the common project, (iii) brokering knowledge and (iv) facilitating the exploration of new solutions. Finally, the levers were either specific or generic. Specific levers specifically targeted the problem of changing farming practices. In Cs37 (Section 3.3.2), for instance, the charter specifically ensured a change in practices towards soil conservation practices. Generic levers strengthened the overall capacity of (part of) the STAFS to innovate, which was likely to produce spill-over effects, for instance in Cs27 (Section 3.3.4) where legal entities were mobilized to pool resources between farms fostering changes in practices, but also the organic transition of other farms on the territory and improved economic balance.

We propose the "tracking of coupled innovation" to extend the "tracking of innovative cropping systems", an approach which already exists in the agronomic literature, to innovations on larger spatial and organizational scales (Salembier et al. 2016; Verret et al. 2020). In our case, the production of knowledge is focused not on innovative farming practices but on how organizational, institutional or technical innovations enable their implementation. A wider range of stakeholders were therefore interviewed (e.g., marketing firms, inter-branch organization), with a focus on coordination features rather than cropping techniques. The study related not to farms within a specific territory but to the STAFS across multiple territories, which can range from municipalities to the national territory or beyond. Both approaches are based on a typology of innovations, to produce more generic knowledge. The "tracking of innovative cropping systems" includes the multi-criteria evaluation of the innovations' agronomic, environmental and economic impacts (Salembier et al. 2016). The evaluation of coupled innovations remains an avenue for future research as their complexity (multi-actor, multi-level interactions) makes it difficult to evaluate them effectively. In our study, we endeavored to establish assessments by asking the stakeholders interviewed for their evaluations. Yet the lack of feedback from farmers or data collected, and sometimes the interviewees' lack of experience, made it difficult for them to fully provide this assessment. Ultimately, the two approaches are complementary and applying them jointly would be beneficial. We believe that it would help (i) to identify existing coupled innovations starting from the spotting of innovative practices and the characterization of their conditions of implementation, (ii) to evaluate coupled innovations' impacts, by providing knowledge on the impact of their farming practices on agroecosystems, and (iii) to provide more detailed knowledge on the farming practices implemented within the coupled innovations. The last two aspects would make the knowledge produced all the more valuable for designing new coupled innovations.

Our approach could be improved in three areas: (i) the identification of case studies, the survey of innovation stakeholders, and the interpretation of the results. Our approach could be improved in three areas: (i) the identification of case studies, (ii) the survey of innovation stakeholders, and (iii) the interpretation of the results. As regards the first point, we provided experts with examples of what constitutes a coupled innovation for us (see Section 2.1). As recommended by Agogué et al. (2014b), these examples should be carefully selected to avoid “restrictive examples”, that is, examples which mobilize common knowledge for the expert and restrict their ideas to ones that are very close to the example. “Expansive examples” should be favored: examples that are radically novel for the expert, encouraging them to look for a diversity of innovative examples. As regards the survey itself, our approach would benefit from having a greater number of interviews per innovation tracked, beyond the few that we studied in depth. Some of the data could be missing or biased, due to an asymmetry in the information collected. Nevertheless, we posit that the potential bias was mostly overcome through the cross-analysis of numerous cases. Finally, the choice of categories needs to be improved, so as to be less sensitive to subjectivity and more reproducible. For example, several barriers or conditions of success can have the same importance or be intertwined, as in the case of the combination of a lack of material resources to transport equipment and a large distance between two farms hindering the sharing of equipment.

4.2. High potential for coupled innovation co-design process and innovation niche management for the sustainability transition of agrifood systems

Exploring alternatives to dominant design through the design of coupled innovation is a new research avenue that has been identified by Meynard et al. (2017) and Salembier et al. (2020). We believe that the “tracking of coupled innovations” can play a key role in this process, by fostering the radical innovation needed to achieve the sustainability transition of agrifood systems (Meynard et al. 2017). Based on the recent literature and our results, we consider that the levers identified in this paper are likely to overcome the main barriers to the implementation of agroecological practices described in other contexts (Table 10), which shows their generic scope.

The “tracking of coupled innovations” provides knowledge on existing coupled innovations and helps to identify innovative stakeholders that can support the co-design of new coupled innovations in multi-stakeholder workshops (see Della Rossa 2020 for examples of workshops). Having this original knowledge shared within co-design workshops, either by facilitators or directly by innovative stakeholders, should stimulate creativity, as long as the ideas presented are original for the participants of the workshop (Agogué et al. 2014b). Moreover, our approach provides key resources to guide exploration, by providing a wider understanding of the range of coupled innovations that could be created.

Finally, the “tracking of coupled innovations” produces detailed information on the way in which existing innovations are implemented by networks of actors (e.g., stakeholders involved, barriers to avoid, conditions of success) and on the supporting network functioning (e.g., the role of intermediaries, see Section 4.1). This can be seen as knowledge on the establishment and

functioning of innovation niches at various stages of development (Kivimaa et al. 2019a). Innovation niches (also called technological niches) are spaces protected from the dominant regime (arrangement of mainstream actors, rules and artifacts) where new configurations of actors, shared rules, artifacts and techniques can emerge and develop around radical novelties (Geels 2004). The development of innovation niches has been identified as a key to fostering the design of coupled innovations and the sustainability transition of agrifood systems (Meynard et al. 2017). Knowledge produced through the “tracking of coupled innovations” should therefore support both the elaboration of concrete proposals to implement coupled innovations and the management of the initial niche in which it would be developed.

Table 10 - Sociotechnical levers identified in this study could help overcoming barriers to change in practices characterized in literature

Main barriers to change in practices (from the literature)	Literature which identified the barrier				Corresponding types of levers from the innovations tracked (Cluster number+ other relevant innovations)
	Meynard et al. (2018)	Boulestreau et al. (accepted)	Della Rossa et al. (2020)	Schut et al. (2015a)	
Lack of coordination between the different links of the agrifood system	x	x	x	x	<i>Facilitation of communication between stakeholders, Structuring of a new network, Intermediation between the different links of the value chain (Cluster 3 + Cs20, Cs21, Cs23)</i>
Lack of access to material resources such as specific equipment and inputs	x	x	x	x	<i>Provision of New equipment or access to facilities (Cluster 4) and Access to new input (Cluster 1)</i>
Lack of provision of adequate knowledge on alternative practices	x	x	x	x	<i>Knowledge provision (Clusters 1, 2 and 3)</i>
Lack of knowledge production	x	x	x	x	<i>Knowledge production (Cluster 1 + Cs11, Cs14, Cs15, Cs23, Cs37)</i>
Lack of outlet for minor species	x	x			<i>Outlet guarantee with the commitment of a marketing firm (Cluster 3)</i>
Lack of financial resources		x	x	x	<i>Financial support (Clusters 1 and 5)</i>

5. Conclusion

The contribution of our study to the “coupled innovation design process” is twofold: (i) knowledge on sociotechnical levers, their combinations and the way they are implemented to foster agroecological crop protection; and (ii) a methodology for the “tracking of coupled innovations” that could be drawn on to tackle new problems of change in farming practices in other contexts. Compared to the literature focused on case study monographs, our work proposes an original and operational methodology to identify and cross-analyze numerous (>10) existing coupled innovations. We believe that the “tracking of coupled innovations” has high potential for supporting the sustainable transition of agrifood systems in three ways: (i) by inspiring the design of coupled innovation concepts that can overcome barriers to the sustainable transition of agrifood systems, (ii) by supporting the formulation of concrete proposals on how to implement these concepts and (iii) by supporting the management of the innovation niche in which the coupled innovation will be developed and implemented.

6. Compléments

La traque aux innovations a permis d'explorer des innovations au-delà des fixations identifiées à la fin du chapitre 1 (rappelé en Encadré 5). Par exemple les innovations couplées de type 3 (cluster 3) montrent une manière de dépasser la fixation autour de la production à bas coût pour un marché de masse (item i, Encadré 5), en construisant des filières alternatives valorisant des pratiques alternatives. Une grande partie des innovations décrites s'appuient sur la coopération entre les parties prenantes du système agri-alimentaire territorial et sectoriel, comme pour la mise en commun des ressources matérielles et cognitives entre maraîcher (innovations de type 4). La traque aux innovations a ainsi permis d'élargir l'espace des solutions possibles pour une gestion agroécologique des NàG. Cet élargissement est représenté dans deux arbres C-K en Annexe E : un arbre de référence construit sur la base de l'analyse sociotechnique et un arbre représentant le résultat de la traque.

Ces arbres indiquent d'autres innovations que j'ai caractérisées à d'autres échelles, sur la base d'entretiens avec des experts et de la littérature grise. L'objectif était de les remobiliser comme support à la conception multi-échelle de solution en atelier. Par exemple, j'ai caractérisé à l'échelle du système de culture l'emploi de paillage organique (paille, BRF) comme amendement pour stimuler les antagonistes des bioagresseurs telluriques. J'ai également caractérisé l'emploi de serres mobiles pour allonger les rotations. Ces innovations, remobilisées en atelier de conception, ne seront pas détaillées ici.

Encadré 5 - Fixations collectives limitant l'innovation pour une gestion agroécologique des nématodes à galles en maraîchage sous abris provençal	
(i)	Pour nourrir le maximum de personnes la meilleure manière de produire consiste en une production massive à un faible coût (ce qui freine l'implémentation de pratiques alternatives avec un coût plus élevé) ;
(ii)	Chaque partie prenante doit rester indépendante et se focaliser uniquement sur son propre rôle (freine la coopération) ;
(iii)	L'innovation doit être faite au niveau du système de culture voire de production, sous contrainte des autres acteurs du système agri-alimentaire territorial et sectoriel, en particulier de l'aval de la filière ;
(iv)	Le sol est uniquement un support de culture qu'il faut adapter aux besoins de la plante, quitte à le désinfecter.

Chapitre 3. Utiliser un jeu sérieux pour la coconception d'innovations couplées

La conception d'innovations couplées pour faciliter la mise en œuvre d'une gestion agroécologique des nématodes à galles est un processus d'innovation ouverte impliquant l'hybridation de connaissances et l'exploration de solutions innovantes avec de multiples parties prenantes. Un tel processus nécessite des outils pour l'accompagner. Dans ce chapitre, je propose de mobiliser un jeu sérieux que j'ai conçu pour partager le résultat de l'analyse sociotechnique (Chap. 1) et initier le processus de coconception de solutions innovantes (Chap. 4) (Fig. 17).

Ce chapitre est sous la forme d'un article en anglais à soumettre

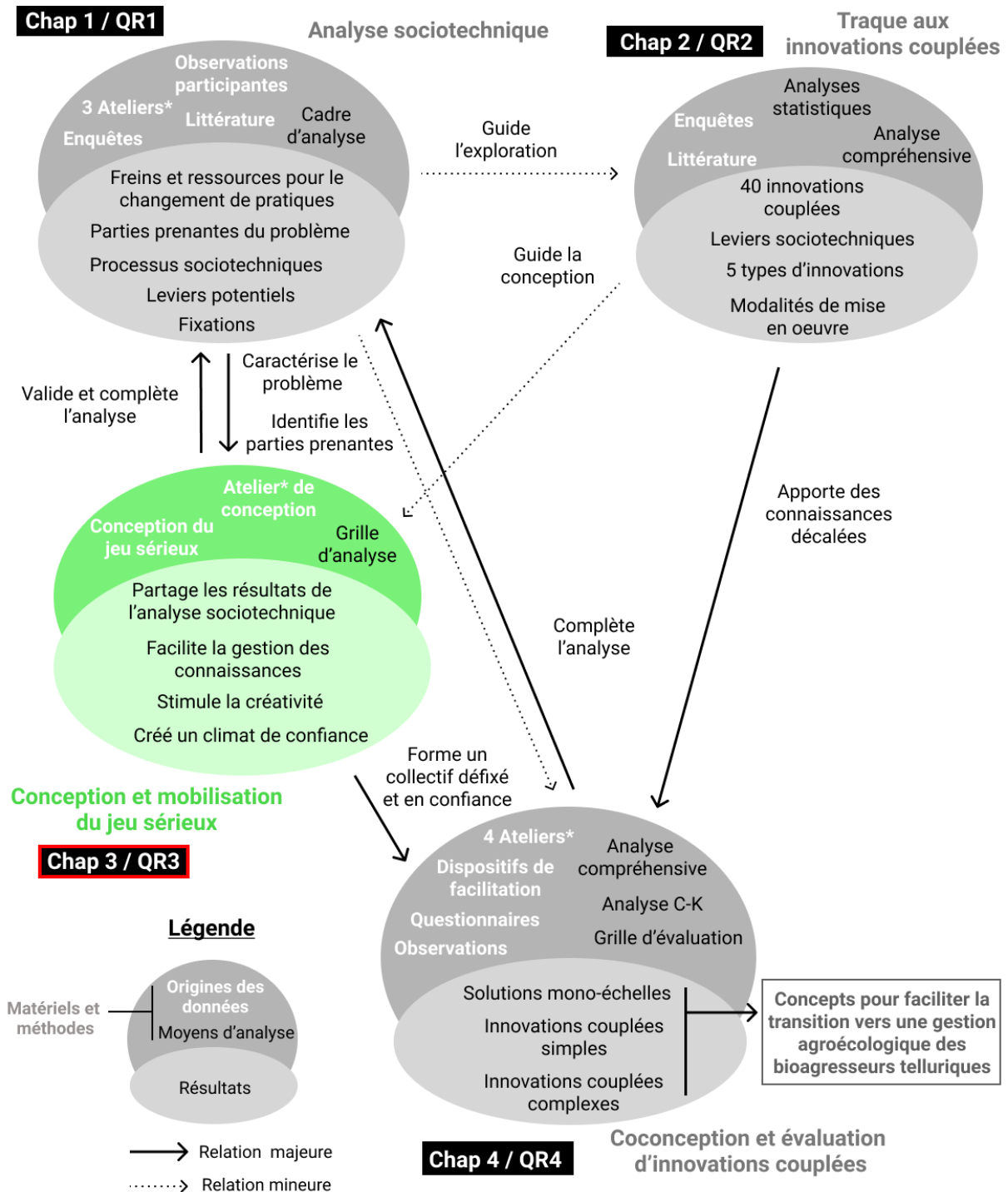


Figure 17 - Place du chapitre 3 (encadré en rouge) dans le dispositif général de la thèse. L'astérisque * après la mention des ateliers signifie que ces ateliers sont les mêmes : l'atelier de conception où le jeu sérieux a été utilisé est un de ceux qui ont alimenté l'analyse sociotechnique.

Using a serious game to support the codesign of coupled innovations for the agroecological transition

Yann Boulestreau^{a,b,*}, Marion Casagrande^{a,c}, Mireille Navarrete^a

^a ECODEVELOPPEMENT, INRAE, 84000, Avignon, France

^b ADEME, French Environment and Energy Management Agency 20, avenue du Grésillé- BP 90406 49004 Angers Cedex 01 France.

^c ITAB (Institut de l'Agriculture et de l'Alimentation Biologiques), 525 route de Gotheron, 26320 Saint Marcel les Valence, France

* corresponding author, yannboulestreau@hotmail.fr

1. Introduction

Today, the agrifood sector needs to tackle many sustainability issues, e.g., reduction of air and water pollution from pesticides, eutrophication due to macronutrient losses in the environment, food losses, farmer generation renewal in developed countries (Lobley et al. 2010; HLPE 2014; Tilman and Clark 2015). The sustainability transition of the agrifood system is a complex problem that calls for systemic innovations from the field to the territory and values chain level, with incremental and radical innovations (Duru et al. 2015a; Meynard et al. 2017). Moreover, such innovations require the involvement of a variety of actors (Meynard et al. 2017). Yet the question is: how to foster the design of such innovations? Meynard et al. (2017) suggested designing coupled innovations as a way to foster the emergence of such multi-level and multi-actor innovations. They first introduced the **concept of coupled innovation** to coordinate technological, organizational and institutional innovations between food production and food processing components of the agrifood system. Yet this concept can be extended to innovations that are designed across raw production, distribution, processing, consumption, knowledge production and transfer, regulations in order to take into account synergies or antagonisms between all the components of the agrifood system (Boulestreau et al. accepted; Salembier et al. 2020). Meynard et al. (2017) highlighted the **need to develop methods and tools to support the codesign of coupled innovations**. One of the challenges of these methods is to share knowledge on the whole system under review between stakeholders from the diverse components of the agrifood system, in order to form a collective representation that goes beyond the historical specialization of skills (Meynard et al. 2017). Besides, these methods and tools should provide good conditions to support systemic thinking and creativity from the stakeholders involved in the design process.

The design of coupled innovations requires a process of innovative design for radical innovations (Meynard et al. 2017), i.e., a process **organized to stimulate generativity** defined as “the ability to conceptualize and create non-existent alternatives” (Hatchuel et al. 2017). Generativity differs from creativity. When creativity fundamentally targets ideation (the formation of new ideas or concepts), generativity combines ideation and “knowledge creation and inclusion of independent knowledge from outside the current known knowledge [...] and [...] the necessary knowledge reordering that is associated with the emergence of new entities” (Hatchuel et al. 2017). Therefore **designing coupled innovations requires supporting both ideation and knowledge management**, especially for the

generation of innovation concepts, which is the first phase of the innovative design process (Agogué et al. 2015; Patrício et al. 2018). An innovation concept is an innovation which is not yet implemented but at the stage of an idea, a concept, more or less developed. In the rest of the chapter, I will use “innovation” for “innovation concept”. « Knowledge management » corresponds to all the actions upon knowledge to share it, process it and remobilize it, e.g., acquiring, processing, combining, comparing and restructuring pieces of knowledge (see Agogué et al. 2015). Hybridizing heterogeneous knowledge: scientific, technical and empirical is key to innovative design for sustainable agriculture (Meynard et al. 2017; Prost et al. 2018). It participates in bringing together independent knowledge, i.e., “propositions that cannot be deduced from past ones and can add significant dimensions to an artifact [under design]” (Hatchuel et al. 2017). Besides, innovative design also relies on open forms of social spaces and extended participation to bring together independent knowledge and foster generativity (Hatchuel et al. 2017). Thus, the design of coupled innovation requires participatory methods (called co-design) involving various agrifood system stakeholders, often in collective workshops (Berthet et al. 2015; Prost et al. 2016; Hatchuel et al. 2017). Ideation in collective workshops can be impeded by social factors, such as attention division (lack of focus on the work), social pressure and perceived lack of expertise on the topic. It can also be impeded by cognitive factors, such as fixation effects, cognitive load and unique ideas with poor association values (Hatchuel et al. 2009; Hooge et al. 2016). Fixation effect is a cognitive bias that consists in spontaneously activating knowledge of existing solutions, which constrains the generation of new, original solutions. It fosters similarity in the ideas generated (Agogué et al. 2014b). Unique ideas presented without the knowledge needed to understand them inspires fewer ideas from participants, who lack this knowledge. Therefore, methods for designing coupled innovation should foster attention, a climate of trust (Paulus and Nijstad 2003 cited by Agogué et al. 2015) and free participants from cognitive restrictions.

Among participatory methods, **serious games have been developed to collectively tackle complex environmental and agricultural problems and support ideation**. For example, numerous serious games have been used with the ComMod approach to help stakeholders innovate and solve collective problems in the agricultural or environmental scopes (Becu 2020). Besides, literature reviews and case studies show the potential of serious games to favor innovation design (Agogué et al. 2015; Patrício et al. 2018). Serious games can take diverse forms (e.g., role games, board games, card games, computer games), sometimes combined. They are used within collective workshops for very different purposes (e.g., teaching, exploring and evaluating solutions, scenarios or strategies with stakeholders, team building) (Garcia et al. 2016; Becu 2020). In this paper, following Alvarez et al. (2014), we consider a serious game as an “activity whose initial intention, of those who set it up, is to combine a game proposing rules and objectives, with a utilitarian (serious) aim, intended in a non-exhaustive and non-exclusive way to train, inform, communicate, train, heal.” Becu (2020) defines them as participatory simulations. Extensive literature indicates the ability of serious games to support innovation design (Agogué et al. 2015; Berthet et al. 2015; Patrício et al. 2018; Becu 2020).

Therefore, in this study, we hypothesized that serious games are relevant tools for the generation of coupled innovations within agrifood systems. To explore this hypothesis, **we designed and tested the serious game *Soilh&co* to support coupled innovation design for sustainable management of**

root-knot nematodes²⁵ (RKN), an increasing pest in sheltered vegetable production systems, in Provence (South-East France). We have previously shown that sustainable management of RKN in Provençal market gardening systems is a complex agricultural problem (chap 1). It faces a systemic lock-in around radical soil disinfection based on soil steaming or nematicide use. It then locks out agroecological management of soil health, based on the combinations of cropping practices killing RKN present in the soil, stimulating their antagonists and preventing their propagation and reproduction. Such practices are for instance solarization, biofumigation, trap cover crops, the use of poor or non RKN-host crops and cleaning tools between infected plot and RKN-free plots. To overcome the lock-in and favor practice change, we have shown that coupled innovations are needed (Boulestreau et al. accepted). Besides, we have shown that the conventional and organic sectors face different barriers, and comparing the two sectors provides a deeper understanding of them and the related agrifood system's functioning. In this study, we hypothesize that working jointly on the two sectors could inspire stakeholders from each sector or mixed stakeholders. For all these reasons, we chose to build a serious game on RKN management in Provençal sheltered vegetable systems, which supported four goals: (i) sharing effectively the sociotechnical analysis, on the barriers, resources and levers for agroecological RKN management in Provençal sheltered vegetable systems (Boulestreau et al. accepted), and discussing it; (ii) creating a cognitive distance with participants' routine and exploring together original solutions to tackle the issues; (iii) improving the accuracy of participants' representation of the whole system including the problem under study and the role of each involved stakeholder; (iv) sensitizing the stakeholders to the advantages of collective action to achieve their individual expectations in the long term. Therefore the serious game *Soilh&co* was built based on the sociotechnical analysis realized previously (chap 1). It was assessed in a workshop with 17 stakeholders from various components of the agrifood system. In this chapter, we first describe the main characteristic of the game (section 2). Then, based on the workshop outcomes, we show that: (i) *Soilh&co* effectively supports the sharing of the sociotechnical analysis with the participants, (ii) create favorable conditions for coupled innovation design (section 3). Then in Section 4, we discuss on the performance of *Soilh&co* and the specific features that make it effective to support coupled innovation design.

2. Materials and methods

In this section, we first present the serious game *Soilh&co* we designed (2.1.), then the workshop in which we tested it. Lastly, we present our data collection and data analysis methods.

2.1. *Soilh&co*, a serious game built to support coupled innovation design

The serious games draw their interests being both: serious (realistic, productive) and playful (fun, immersive) (Alvarez et al. 2014; Garcia et al. 2016). In this section, we show how the design of *Soilh&Co* combines these two dimensions to support the generation of coupled innovations for sustainable RKN

²⁵ Here and in the rest of the thesis, when I write RKN I refer to *M. arenaria* and *incognita*, the two species widely present in the sheltered soil in Provence

management in the Provençal vegetable production system. We first describe how we represented the functioning of Provençal sheltered vegetable agrifood system from the field to sociotechnical landscape level and its lock-in around radical soil disinfection (2.1.1.). Then we describe the elements of the game that were introduced (i) to make the participants experience the barriers we identified in our sociotechnical analysis (2.1.2.) and (ii) to jointly foster knowledge management, creativity and collaboration (2.1.3).

2.1.1. *Soilh&co*: a simulation of root-knot nematode management in the Provençal sector of sheltered vegetable production

Soilh&co simulates the management of RKN in three to six farms in a small vicinity, which interact with a common input and equipment supplier, a common marketing firm and a common R&D actor. In *Soilh&co*, participants play the roles of these four key stakeholder types of the RKN management in the Provençal sector of sheltered vegetable production, as characterized in Chapter 1. Besides, when needed, the game facilitators play the role of the other types of actors: the public policy actors, the banks, the global market representing the rest of the downstream value chain. Indeed, those actors are less playable as they interact less often with other participants and have less freedom of actions, hence they are played by the game facilitators. The global game configuration with the place of each actor is shown in Figure 18. All participants exchange products (plantlets, knowledge, harvests) and money (a virtual money called “buns”). Their aim is to earn the maximum number of buns by the end of the game. A game session simulates 4 years of cultivation, each year split into a summer and a winter season, each season split in an early and late period. These subdivisions enable representing the fact that vegetable species that can be cropped and the dynamics of RKN are temperature dependent, and thus, vary according to seasons and periods.

Each farmer receives a “profile” card characterizing his farm (surface area, conventional or organic practices, ...) and his personality (maximizing economic profitability or trying to nurture the soil, cooperative or individualist attitude). For each season and period, the farmers have to make technical choices (first phase) on 1-3 plots each with specific characteristics (open or sheltered field, field area, RKN infestation level in soil, information that is indicated on the game board). They choose the commercial and service crops that they want to cultivate on their plots and the other practices to manage soil health (Fig. 19). For commercial crops, they can choose between 9 archetypes representing the diversity of vegetables cropped under shelter in terms of crops frequency in Provençal cropping systems (major/minor crops), susceptibility and capacity to multiply RKN cropping duration, need for specific equipment and profitability (Fig. 19c). They can choose the soil health management practices (including service crops) between the main practices used to manage RKN in the area (see Fig. 12, Chap1). In order to implement a practice on their plots, they need to (i) buy the know-how for these practices (e.g., know-how of strawberry cultivation, know-how of high-quality amendment spreading) from the R&D actor, if they do not already own it, (ii) buy the inputs needed for the practice (e.g., strawberry plantlets and organic amendment) from input supplier actors and occasionally specific equipment (Fig. 20). All these cards are positioned on the game board (Fig. 19 and 20). In the second phase, they calculate how many batches of each vegetable are harvested depending on the crops (yield indicated on the plantlet card – Fig 19b), the number of plots and their RKN pressure

level (see below the yield reductions according to soil health status). They sell their harvests to the wholesaler. At the end of the season, the farmers have made benefits or losses, depending on the equilibrium between what they spent in know-how, equipment and inputs and what they gained from selling the harvest. They also calculate the new soil-health status for each of their field, depending on the practices they implemented during the season. For instance, a melon crop increases RKN pressure of 6 points, and a trapping Sorghum reduces it of 4, causing in sum an RKN pressure increase of +2.

In parallel to farmers' actions, from next season onward, the wholesaler sells to the global market the products bought from the farmers. The R&D and input supplier create new inputs and know-how, if they want to. All the participants are free to interact at any phase of the game. Additionally, the primary goal of the R&D role is that the farmers gain a maximum number of buns. **As a result, *Soilh&co* represents the four levels of the problem under review: the field, farm, STAFS and sociotechnical landscape levels (see Fig 11, Chap. 1), and the role of the key actors (Fig. 13, Chap. 1).**

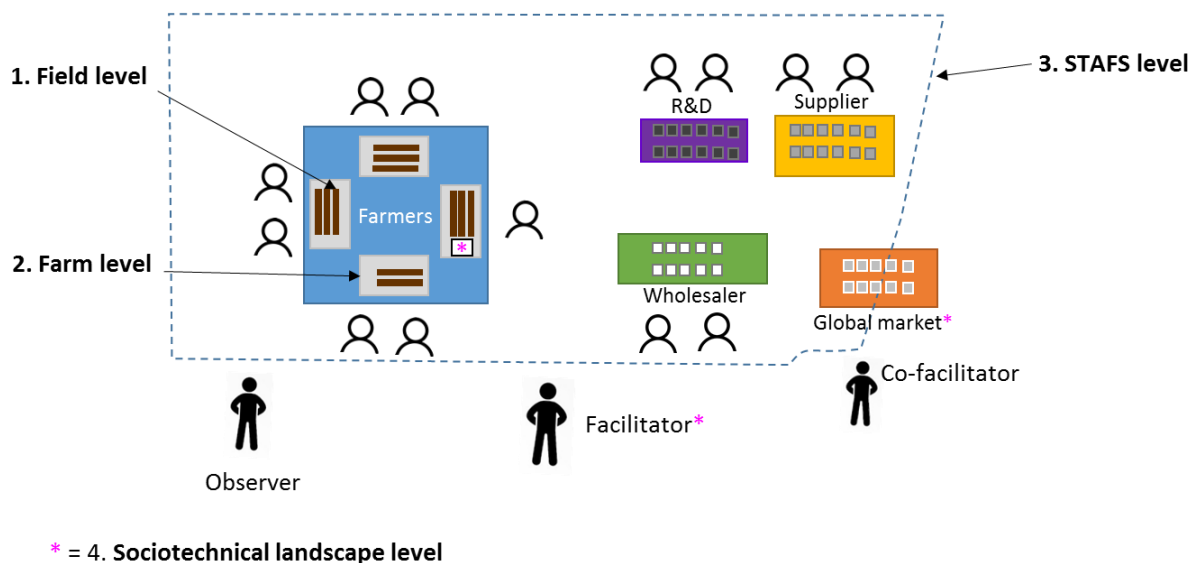


Figure 18 - Spatial configuration of the game and representation of the different levels whose determinants influence farming practices in the game. The large colored rectangles figure tables around which the players are seated. The brown rectangles on the farmers' table represent the field cropping systems. The pink star indicates elements in the game that represent the last level affecting farming practices, i.e., the sociotechnical landscape level: the banks and public policy actors represented by the facilitator, the global market represented by the co-facilitator and the cultural influences represented through the role cards. The stakeholders whose interactions we wanted to foster were spatially regrouped: the farmers that could cooperate as they are considered as farming on a spatially close territory, selling to the same wholesaler and getting inputs from the same suppliers; the R&D and suppliers working together on new inputs. The number of participants in the figure is purely illustrative: each role can be played by one or two participants, although it is preferable to have two participants for each non-farmer role to be able to manage several farmers' request at the same time.

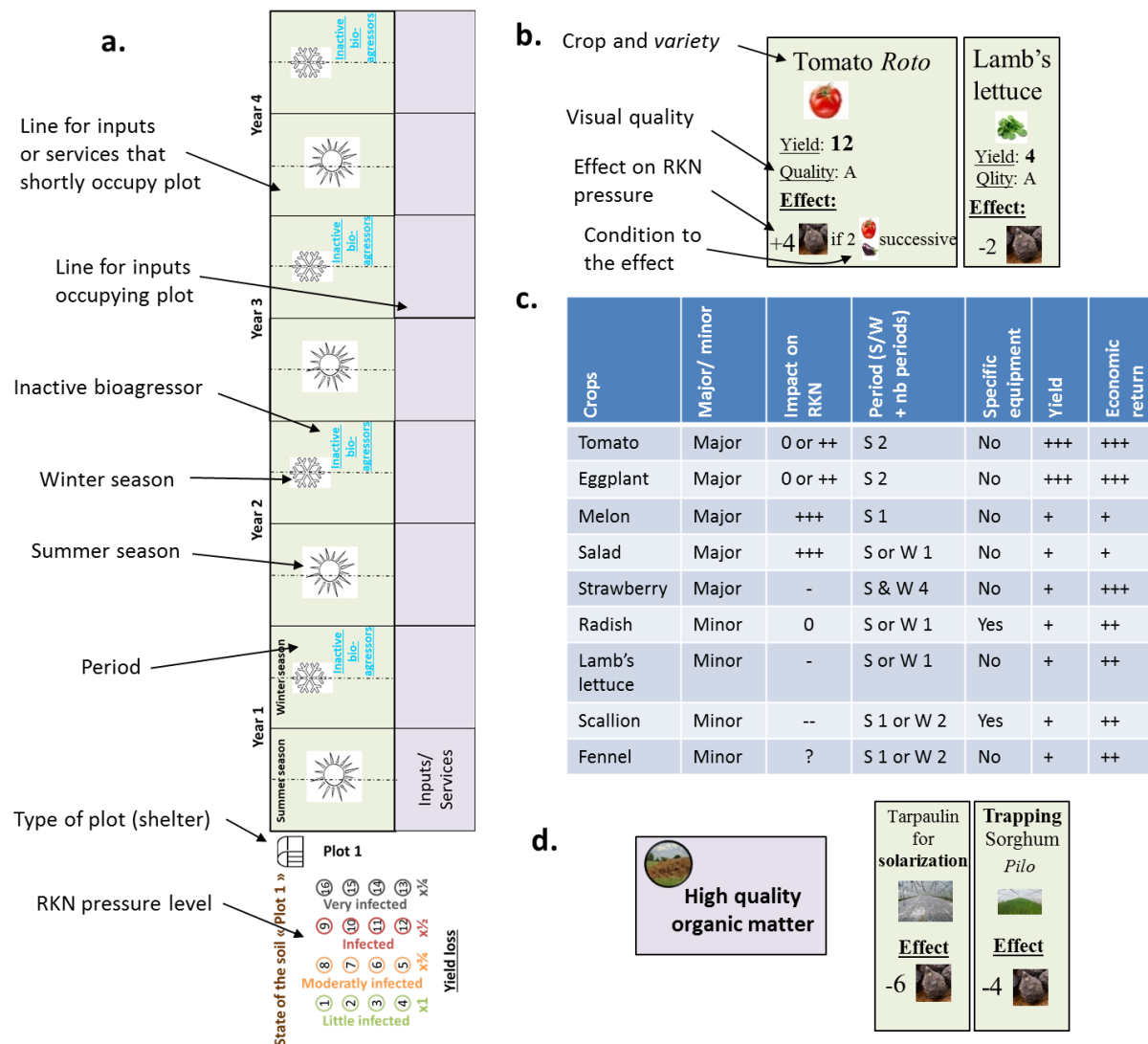


Figure 19 – Cards representing crops and techniques. **a.** Line on the farmer's board representing a sheltered field, where farmers position the cards of the successive crops and practices. The RKN pressure indicator is divided into four levels, with different impacts on the crop yield: little infected (RKN pressure between 1 and 4, no yield loss), moderately infected ($5 < \text{pressure} < 8$, -25% yield), infected ($9 < \text{pressure} < 12$, -50% yield), very infected ($13 < \text{pressure} < 16$, -75%). The poor or non RKN-host crops reduce RKN pressure and are considered to be unaffected by RKN, as well as crops cultivated during late winter. If the field is not contaminated (RKN level 0), and the player uses the prophylaxis technique "cleaning tools", the RKN level does not increase, no matter what the other practices are. The RKN pressure level cannot go beyond 16. **b.** 2 crop cards representing respectively a long cycle and partially resistant crop increasing RKN pressure (+4 if they come back too often) and a short-cycle and resistant crop decreasing RKN pressure (-2). **c.** The 9 crop archetypes chosen to cover the diversity of real crops. The information indicated was used to build the know-how cards, the input cards and the price for the products. They were based on expert knowledge and gray literature (Villeneuve et al. 2013). **d.** Three cards representing inputs for techniques, either occupying shortly the field (purple card, such as the amendment with high-quality organic matter) or occupying the field for longer duration (green, >4 weeks, such as the plastic tarpaulin for solarization and the trapping sorghum seeds). We chose the effect of the techniques on RKN pressure in relative terms based on the available literature on those techniques (e.g., Hoefflerlin et al. 2018).

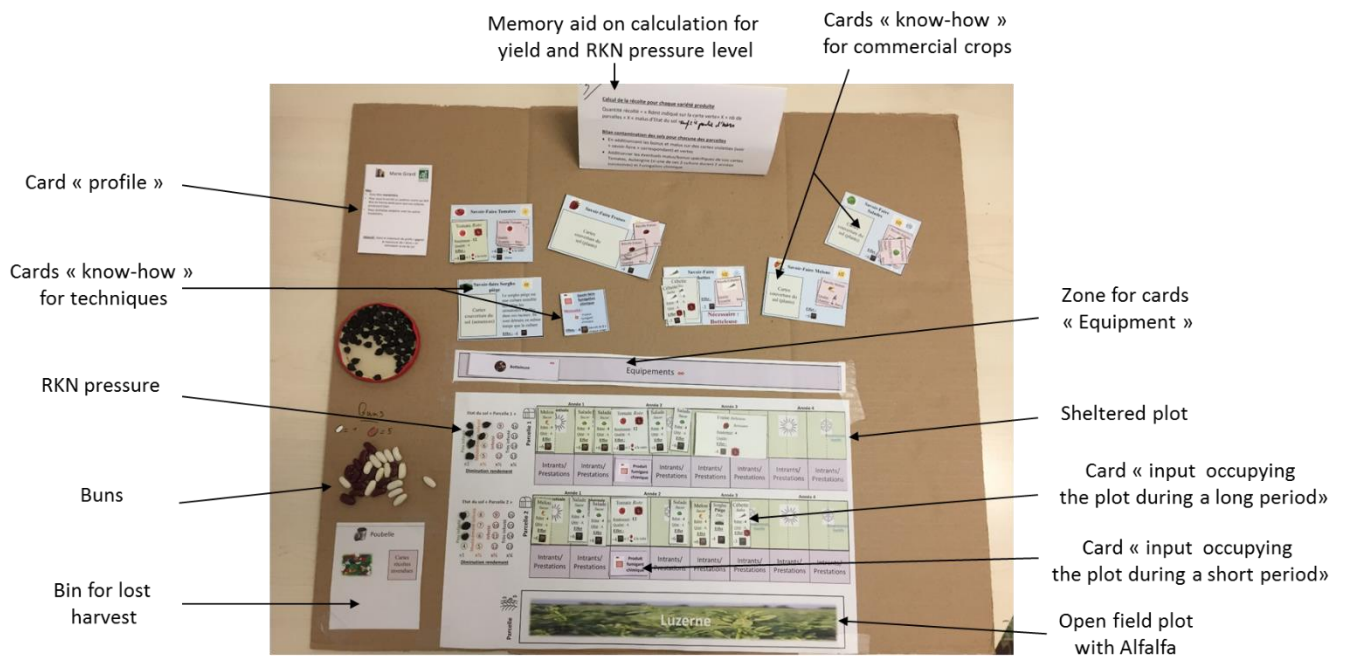


Figure 20 - Farmer board with all the elements affecting RKN management.

2.1.2. *Soilh&co*: a game designed to provide an experience of the lock-in around drastic soil disinfection

As the game is aimed to help stakeholders become aware of the sociotechnical lock-in of RKN management, we introduced specific elements in the simulation to represent the limits of the conventional production and marketing system, and the lock-in around drastic soil disinfection. This lock-in preventing a wide adoption of agroecological RKN management techniques is different in the organic and conventional systems. This is why we produced two versions of the game: a conventional one and an organic one. In this section, we will first present the conventional version and then show how we adapted it to produce the organic version. The knowledge embedded in the game is based on the sociotechnical analysis (Chap. 1).

First, we represented the processes that make conventional production unsustainable through the following rules and artifacts: (i) the price for conventional inputs or services (e.g., soil steaming service) is set as high, (ii) the effects of synthetic nematicides on RKN pressure gradually decrease with each use (resistant RKN population), (iii) if tomatoes or eggplant are produced on the same field two years in a row, they increase RKN pressure the second year (virulent RKN population overcomes the rootstock's resistance).

Then, we represented the main barriers identified in Chapter 2 with in-game rules and artifacts in Table 11. We detail here 4 examples.

a) Challenging downstream value chain requirements:

We represented the following downstream value chain requirements: (i) downstream demand focus on a few RKN susceptible major crops, leaving few outlets for minor crops that are RKN poor-host or non RKN-host, (ii) sufficient volumes for each production to avoid high logistical costs, (iii) staggering harvest dates, especially for lettuces, (iv) high visual standards of quality (no visual default, standardized size, resistance to shocks). Therefore, in the game, the global market player has to respect a sheet indicating for each crop: (i) a lower and upper limits of crop quantities that it can accept, (ii) a staggered production requirement for a few of the crops, (iii) requirements of quality A for all products, (iv) the price. The wholesaler player has a similar sheet indicating a lower limit and a reference price for each crop and is free to negotiate on volumes, prices, and quality. Yet the wholesaler is confronted with the requirements from the global market, which incites him to forward the global market requirements to the farmers, simulating a real situation in Provence. In the game, the products commercialized are represented by “harvest cards” indicating the volume of the harvest, the quality of the production (A or B, also indicated on the “plantlet card”) and the period of production. Finally, bins are available on the farmers and the wholesaler boards to place and keep track of the products that were lost, by lack of outlets, for the debriefing (Fig. 20).

b) Lack of inputs, equipment and knowledge on the farms

To foster collaboration between stakeholders, some inputs, equipment and knowledge for implementing agroecological practices are lacking on the farms. We voluntarily did not make some input cards available (“Resistant Sorghum for biomass” and “Resistant Sorghum for biofumigation”), except if the input supplier decided to develop it (or participants propose any other idea). The corresponding know-how cards are available, but the farmers cannot use them without the inputs. Similarly, some know-how cards are not available (“biocontrol” and “biopesticide”) except if participants find a way to develop them. The corresponding input cards are available but cannot be used without the know-how. Finally, we determined the price of equipment in buns to simulate the fact that pieces of equipment are very expensive and inaccessible with a small or middle-size farmer budget in real life. To calibrate the game, for instance to avoid unrealistic quick and easy access to equipment by small and middle-size farmers, we used an excel simulation of the game.

c) Cognitive and cultural barriers

Cognitive and cultural barriers are set up in profile cards associated with each role (Fig. 20). For instance, part of the farmers’ profile card indicates: “You do not have the will to cooperate with other farmers” or “you consider soil only as a growing medium that should be adapted to the need of the crops”. These profile cards enable contrasted cropping decisions among farmer players and make the debriefing time more learning/demonstrative.

d) Farm-size barriers

The farm’s size also plays a role in the implementation of agroecological practices, as small farms have less leeway to introduce non-productive practices such as sorghum green manure or soil solarization, because they occupy plots for several weeks and compete with commercial crops. Indeed, it quickly reduces the farm profitably. Small farms also have less investment capacities for specific

equipment. To represent this, we introduced several farm sizes: small farms with 2 sheltered fields, medium size farms with 3 and large farms with 6. On the top of that, the smaller the farm, the less budget they are given at the beginning of the game.

The interaction between the barriers was represented by the interaction between participants and with the artifact during the game. For instance, a farmer choosing to crop melon instead of tomatoes to introduce solarization and implementing a quality B resistant eggplant would face a strong reduction in profitability as melon is less profitable (if the wholesaler follows the reference price) and quality B is not accepted by the global market, then is also refused by the wholesaler. Resources are also represented in the game, for instance the R&D actor represented the presence of a strong R&D infrastructure mostly favorable to agroecological RKN management.

More details for the conventional version are indicated on Table 11.

In the organic version, the following modifications were made to be more realistic in regards to the organic sector functioning: (i) more farmer profiles are oriented towards supporting good soil life; (ii) reference prices for vegetable production are higher than in the conventional system; (iii) another role was added: a cooperative of producers that strives for the profit of its producers, then accepts quality B production, gives a better price for production and works on two-year bidding contract on production with farmers, (iv) organic farmers start with more diversified know-how for techniques and crops than conventional farmers, who start with the know-how for dominant techniques (synthetic nematicides and steaming) and major crops.

Table 11 – Representation of barriers to the change for *agroecological RKN management* in the serious game design.

Barriers to agroecological RKN management	Games elements (Artifact/Rules)
Marketing firms do not buy minor crops productions from farmers as a result of difficulties to commercialize them	Artifact: - The global market's sheet indicates (i) low numbers of minor crops accepted from wholesalers, (ii) a minimum quantity of production for each crop and season, (iii) staggered production is required, (iv) quality A required, (v) relative prices calibrated on the real profitability differences of each crop. - The wholesaler's sheet also indicates a minimum quantity of production for each crop and season. - Card "Harvest" for lettuce allows specifying the quality of the production (on card "input" also) and if lettuces were produced in both periods of winter. - "Bins" for farmers and the wholesaler to see the harvest they could not sell. Rule: - The global market respects the information strictly on his sheet. - Freedom of the marketing firm to negotiate with farmers on volume and prices.
Marketing firms do not accept small volumes of crops for logistic reasons	
Marketing firms require staggering productions	
Marketing firms require standard quality	
Inputs for agroecological techniques are missing	Artifact: Inputs card "Resistant Sorgho for biomass" and "Resistant Sorgho for biofumigation" are not available in the game, except if participants propose and implement a solution to make them available. Corresponding know-how cards are available. Rule: No know-how can be used without the corresponding input.
Equipment for agroecological techniques are missing on farms	Artifact: - Pieces of equipment are expensive to get. Only a large farm (6 fields) has enough initial money to buy one alone. - 4 techniques and crops require a piece of equipment to be implemented. Rule: Crops and techniques cannot be implemented without equipment if required.
Knowledge of agroecological practices is missing	Artifact:

	- Cards “Fennel” (know-how and input) have an interrogation mark and “uncertainty on vulnerability” as information on its effect on RKN pressure level. - Cards “know-how” for biocontrol and biopesticide are not available in the game, except if participants propose and implement a solution to make them available. Corresponding input cards are available. Rule: - If participants want to use fennel, the effect on RKN pressure is randomly chosen between -1 and +2 after. - No input can be used without the corresponding know-how.
Lack of cooperation between farmers	Artifact: - Cards “Profile” for few farmer roles indicate that they do not have the will to cooperate. Half of them for the conventional version and a quarter for the organic version. - Cards “Profile” for supplier and wholesaler roles indicate that their main role is only to maximize benefits. Rule: Participants must respect their profile.
Conventional farming paradigm	Artifact: Cards “Profile” for a quarter of farmer roles indicate that for them the soil is only a growing medium that they should adapt to the need of the crops. Rule: Participants must respect their profile.
Compliance with the mass-market requirements	Artifact: - The card “Profile” of the wholesaler indicates that they should buy from farmers depending on their markets, the quality and the price. - The card “Profile” of the supplier indicates that they should preferentially develop and sell commercial crop varieties compatible with the mainstream production’s marketing standards and with high yields. - The card “Profile” of R&D indicates that they should strive to help farmers optimize their cropping system in accordance with their outlets, marketing constraints and available inputs. - Only one wholesaler role in the conventional option (power asymmetry). Rule: Participants must respect their profile.

Lack of time for farmers to step back, develop a new system, acquire the new knowledge	Rule: Limited time for each phase, each season.
Lack of capital for farms to develop agroecological practices (e.g., buying equipment)	Artifact: - Cards “equipment” are expensive. - All farmers start with a limited number of buns.
Small farmers have issues to free up space for agroecological techniques requiring space and stay economically viable	Artifact: - Small farmers only have 2 sheltered fields. - The number of initial buns given increases with the farm size.

2.1.3. *Soilh&co*: a game designed to foster knowledge management, creativity and collaboration

Soilh&co was built to foster rapid and deep learning and to favor a shift in the way participants see the problem. Engagement and emotional involvement in a game embedding situated information are known to strengthen the learning of participants (Agogué et al. 2015; Garcia et al. 2016; Becu 2020) and make them change their way of seeing and thinking the problem (their cognitive representations) (den Haan and van der Voort 2018). According to Garcia et al. (2016) and Patrício et al. (2018), providing feedback on the behavior of the participants with a virtual representation supports higher motivation and engagement. That prompted us to introduce a virtual money (buns) and a soil contamination level, which the participants can manipulate and see evolve throughout the game. Also, and in line with Patrício et al. (2018), we imposed a time limit (4mn first phase, 3mn second phase) and demanding goals to participants to convey positive stress and foster engagement.

To favor creativity and mutual understanding, we chose to invert the roles of participants: farmers played no-farmers' roles and other stakeholders played farmers' roles, except for the R&D role that required specific knowledge. Indeed role inversion is expected to force participants to understand other stakeholders' points of view, postures and constraints (Becu 2020), then acquire new knowledge. In that respect, it should decenter participants, put them off their cognitive routines and foster collaboration (Becu 2020), which all favor creativity. Besides, in line with Agogué et al. (2015)'s suggestions, facilitators also encouraged participants throughout the game to go beyond the initial frame of the game, by imagining new inputs, equipment, new configurations and new coordination between stakeholders. We facilitated it by making possible to rapidly modify the game configuration for introducing technical, organization or institutional innovations, such as the ones we identified in Chapter 2. For this purpose, we introduced four features in the game:

- (i) blank cards for each card type to allow the introduction of new inputs, crops, equipment, know-how that players may suggest during the game,
- (ii) R&D and extension services are reminded on their profile card that they can develop new inputs, equipment and know-how by simply asking one of the facilitators,
- (iii) pre-prepared extensions that were inspired by several tracked innovations (Chap 2) allow facilitators to quickly adapt the game if required by a participant's new idea, e.g., use an alfalfa field to produce organic amendments, develop an alternative outlet such as a community-supported agriculture system, set up a new shelter,
- (iv) facilitators are prepared to play any other role that can be needed to go beyond the initial game frame, e.g., banks to make a loan and new investments such as new shelters, policy actors that can forbid an input or give subsidies for specific techniques.

Finally, we chose to build *Soilh&co* as a physical board game, with the hypothesis that it would reinforce acquisition, understanding and organization of knowledge and consensus

building, in line with Patrício et al. (2018). Indeed, in accordance with Patrício et al. (2018)'s literature review, physical tools made of real objects that the participants see, manipulate, exchange and transform “make ideas more tangible, supporting experimentation and joint visionary thinking [...] while expanding the range of possibilities for new ideas, options, problems, and solutions”. In other words, physical tools stimulate creativity.

In this section, we highlighted the choices we made in the game's design to foster knowledge, creativity and collaboration among stakeholders. This design was then tested in two game sessions in a workshop that we present briefly in the next section.

2.2. Using the game *Soilh&co* in a multi-actor workshop

Playing the game was the first step of a multi-actor workshop aiming to achieve the design of coupled innovations with a diversity of stakeholders: 6 farmers (3 organics, 2 mixed, 1 conventional), 1 advisor coordinating vegetable supply for in an organic wholesaler, the head of the local antenna of a mixed wholesaler, the head of the regional market platform, 2 technical advisors (1 organic, 1 mixed), 2 R&D managers and 2 sheltered vegetable section manager in inputs companies (respectively biocontrol and amendment company, seeds and inputs retail), 1 project manager in an NGO promoting soil conservation and 1 representative of a regional institution accompanying the implementation of agricultural policies. We engaged this diversity of stakeholders to bring together heterogeneous knowledge: on techniques and practices, farmers' constraints, marketing firm issues, commercialization, input supply, public policies, NGO actions, R&D functioning and hence to support generativity. The two game sessions were organized simultaneously: conventional and some mixed stakeholders were playing the conventional version of the game, while organic and some mixed stakeholders were playing the organic one. The detail of the proceeding of the workshop can be found in Appendix F.

The game sessions aimed at preparing the coupled innovation codesign by (i) building a common knowledge base and a systemic representation of the current lock-in to develop agroecological management of soil health, and the potential ways to unlock it, (ii) fostering joint knowledge management, creativity and collaboration. We indicate the role played by each participant and their group (organic/conventional) in Table 12.

The workshop lasted 4.5 hours with

- (i) an icebreaker time (15mn),
- (ii) the presentation of the overall project (10mn),
- (iii) a brief presentation of the main RKN management techniques (5mn),
- (iv) the presentation of the game (20mn),
- (v) the game session in 2 groups (70mn),
- (vi) the game debriefing in plenary (40mn),
- (vii) the design session in 2 groups (60mn),
- (viii) cross-presentation and discussion in plenary (30mn) and
- (ix) conclusion, perspectives and evaluation by participants with a questionnaire (10mn).

In this chapter, we present the results of the game session (v), the game debriefing (vi) and the final assessment questionnaire (ix). The debriefing is considered as a full part of the game session, as it is the main phase of learning by reflecting on the game experience (Garcia et al. 2016; Becu 2020). In our workshop, it was animated by confronting the experiences of the two groups of participants. First, feedback from participants were asked on their experience of the game, starting with the farmers' roles. Facilitators stressed the barriers to change for agroecological RKN management and the levers to overcome them that were experienced during the game session. They encouraged participants to discuss these barriers to share their knowledge and their representations of them.

Table 12 – Workshop participants, their group (organic or mixed) and their role in the game (OF=Open Field). The numbering corresponds to the global numbering for the whole Ph.D. manuscript (see Table 17, Chap. 4).

	Stakeholder	Group	Role
Farmers	Org Farmer 2	Org	Cooperative
	Org Farmer 7	Org	Wholesaler
	Org Farmer 8	Org	Wholesaler
	Mixed Farmer 1	Mixed	Wholesaler
	Mixed Farmer 2	Mixed	Supplier
	Conv Farmer 6	Mixed	Supplier
Marketing firms	Org wholesaler	Org	Small farmer+OF
	Mixed wholesaler	Mixed	Small farmer+OF
	Regional market platform 1	Mixed	Medium size farmer
Input companies	Biocontrol company	Org	Medium size farmer
	Seed company	Org	Large farmer
	Amendment company 1	Mixed	Small farmer
	Input retail cooperative	Mixed	Large farmer
R&D	Organic technical advisor	Org	R&D
	Mixed technical advisor 1	Mixed	R&D
NGO	NGO promoting soil conservation	Org	Supplier
	Regional policy implementer for agriculture&food	Org	Small farmer

The results from the design session (vii) on the various innovation concepts are presented Chapter 4.

2.3. Data collection and analysis

We used five ways to collect data during the workshop:

- (A) Audio recordings throughout the workshop
- (O) Observations of interactions between actors and with the game, based on an observation grid by 1 observer per group
- (P) Photos, especially of the gameboard during and at the end of the game session

- (N) Notes were taken by facilitators during the debriefing and informal discussions with participants
- (Q) Feedback Questionnaire filled by 13 participants at the end of the workshop (see Appendice G). We encouraged participants to be transparent about what they thought when filling out the questionnaire, even if it was negative feedback. For the same goal, we made it optional to give one's name on the questionnaire.

To understand to which degree the serious game *Soilh&Co* supports the generation of coupled innovations, we transcribed data in the following analytical grid, composed of 16 qualitative variables to characterize the three key functions that a method aiming at supporting coupled innovation design should fulfill (see sections 1. and 2.1.3): (i) knowledge management, (ii) creativity and (iii) collaboration. A fourth function was added to these three key functions: the immersion of participants into the playing situation that normally favors the first three functions (Table 13). The qualitative variables represent the sub-functions of the four main ones. For instance, to assess the capacity of *Soilh&co* to favor collaboration, we analyzed if it enabled (i) creating a collective understanding of the system, (ii) fostering the sharing and integration of the different participants' expectations in a compatible set, (iii) creating a climate of trust and (iv) fostering attention.

Table 13 - Analytical grid for assessing a serious game that aims to support the generation of coupled innovations

Functions	Sub-functions (qualitative variables)
Knowledge management	Increasing system understanding
	Fostering the understanding of others' roles and perspectives
	Changing the cognitive representations
	Fostering hybridization of independent knowledge
	Supporting processing of the knowledge
	Fostering mobilization of uncommon knowledge
	Allowing the identification of the knowledge gap and new actors to involve
Creativity	Generating original concept of innovations
	Supporting joint ideation and management of knowledge
	Lightening the cognitive load
	Segregating idea generation from idea assessment
	Setting participants in a creative mindset (avoiding fixation)
Collaboration	Creating a collective understanding of the system
	Fostering the sharing and integration of expectations in a compatible set
	Creating a climate of trust
	Fostering attention
Immersion	Favoring immersion and engagement including emotional involvement

For each variable, based on the five types of data indicated above, we assessed the level of evidence supporting the fact that the sub-function was fulfilled by our game. We stated that there was:

- Strong evidence when numerous (>5 elements) or virtually all (>4/5th of the elements) of the data collected converges to show that the sub-function is fulfilled.
- Good evidence when most (>3/4th) of the data collected converge to show that the sub-function is fulfilled. Yet there are fewer elements than for previous categories and there can be a minority of elements nuancing the statement.
- Mixed evidence when there is an equivalent number of elements showing that the sub-function is fulfilled and showing that the function is not fulfilled.
- Poor evidence when there are too few elements to state that the sub-function is fulfilled.
- No evidence when there is no data enabling to state that the sub-function is fulfilled.

3. Results

In this section, we first show that *Soilh&co* allowed sharing effectively the results of the sociotechnical analysis (3.1). Then we demonstrate to which extent *Soilh&Co* fulfilled each function and sub-function needed to support the generation of coupled innovations for agroecological RKN management (3.2 to 3.4). To ease reading, in the following section, sub-functions and participants' names are written in italic. We do not use the real name of participants but instead the type of structure they are part of (with capital letter - Table 12) instead of their names. The abbreviation "n.d." indicates that the person could not be identified (e.g., no name on the questionnaire). The single capital letter in parentheses refers to the data origin (e.g., O for Observation, see 2.3)

3.1. Sharing results of the sociotechnical analysis

Three elements demonstrate that the design we chose for *Soilh&co* was effective for sharing the result of the sociotechnical analysis (Chap. 1): (i) situations that we observed during the game were reproducing the conventional system limits, barriers, resources and levers to implement change for agroecological RKN management that we had previously characterized, (ii) the collective debriefing resulted in pointing many existing barriers and levers and (iii) participants themselves recognized that the game helped to identify barriers and levers.

(i) Individual experiences of the limits, barriers, resources or levers during the game

First, for players started with a conventional cropping system, they encounter situations reproducing the conventional cropping system limits. For instance, *Regional market platform*, playing as a farmer, experienced a rapid build up of RKN pressure in soil on the fields where he introduced only major susceptible crops (P, Fig. 21). Besides, participants experienced game situations that reproduced the barriers identified in the sociotechnical analysis. For instance, in the mixed group, the player of the large farmer specialized his farm in strawberries then in fennels, which led the middle size farmer to losing the harvest of his minor crop productions

because of market saturation twice (O). It corresponds to the real situation found in our sociotechnical analysis: farmers cannot easily produce minor crops (e.g., fennel) that are poor or non RKN-host without coordinating with each other, because few specialized farmers quickly saturate the outlets for these crops. Real farmers also experience market saturation for major crops (e.g., strawberries, lettuces and melons). In the organic group, *Regional policy implementer*, playing another farmer, got too small quantities of a minor production to interest the wholesaler, and failed to sell it, a process we also identified in the sociotechnical analysis (A). Finally, game situations also reproduced levers we characterized, which mobilize current resources. For instance, *Mixed wholesaler* when playing a farmer used the alfalfa in the open field as an amendment for the sheltered fields (P), which was an innovation we characterized in the innovation tracking (Chap 2). Other game situations revealed levers that we had not previously identified. For instance, in the organic group, the player of the wholesaler invested in equipment for a producer to facilitate the production of poor or non RKN-host productions he was interested to sell (O, A).



Figure 21 - Board of Regional market platform at the end of the first year. He started with an RKN pressure level inferior to 3 on the three plots. On the field 1 he produced melon (+6) and lettuce (+6) and reached an RKN level of 13 after only one year).

(ii) Collective identification of barriers and levers during the debriefing

Second, during the debriefing of the game, were collectively pointed out the barriers we had formerly characterized in the sociotechnical analysis. For instance, *Mixed marketing firm* stressed the lack of communication and planning between farmers and a marketing firm: “the problem is that there is a problem of communication between production and

commercialization [...] Even me, [in the game session] I started to produce lettuces and tomatoes without knowing if the demand was there. [...] [in real life] There are vegetable farmers that think “OK, I will produce that” without knowing if there are outlets for this product, and that quantity” (A). This lack of communication, confirmed by *Organic farmer 8* and *Conventional farmer*, impeded the coordination between farmers and a marketing firm to open outlets for minor crops that are poor or non RKN-host. In the organic group, *Regional policy implementer* stressed the lack of time to cooperate that she felt as a player. During the debriefing, we also discovered new barriers or gained a better understanding of barriers already known. For instance, *Seed company* and *Organic technical advisor* revealed the reasons for the difficult access to cover crops’ seeds: “Jumbo Star [...] is mainly sorghum for forage [...] the demand in forage sorghum has exploded and I think vegetable farmers command the last” (*Seed company 1*, A), “The vegetable farmers I advise tend to command their cover crop seeds late, it is not their priority” (*Organic technical advisor*, A). The debriefing revealed known levers such as the planning between producers and marketing firms (see above), but also unknown levers. For instance, *Organic farmer 8* suggested mutualizing the order to vegetable nursery of plantlets within his producer organization in order to facilitate access to relevant rootstock for RKN management purposes (A). His idea was to overcome nurseries’ sticking points that they usually do not want to produce specific varieties that are ordered in small quantities.

(iii) Recognition of the interest of the game in the final assessment

Third, 12/13 respondents of the questionnaire replied that the simulation **helped them to better identify barriers** to agroecological soil health management and levers to overcome them (S). Yet 7/13 declared that **the serious game allowed only partially identifying barriers that really exist**. For instance, part of the participants stressed that the *Soilh&co*’s representation of the problem under review **was not 100% accurate and complete**: “we saw thanks to the vegetable farmers participating that few barriers were not relevant” (n.d., S), “the situation did not take into account a lot of other factors that influence the producers” (n.d., S). One barrier we modeled and that provoked a debate during the debriefing was the minimum quantity of products that the wholesaler required to buy it from the producer. Mixed wholesaler considered the quantity modeled as unrealistic: “You put a brake on the minimum quantities, but as far as I am concerned as a wholesaler, it is rather a maximum” (A), when *Organic farmer 8* confirmed its reality for small farmers.

In this section, we saw that *Soilh&co* was effective in sharing the results of the sociotechnical analysis. In the next section, we show that this contributed to knowledge management for participants during the workshop.

3.2. Knowledge management

Among the 7 qualitative variables, there was strong or good evidence for 6 of them, only the variable “Fostering mobilization of uncommon knowledge” had a mixed evidence (Table 14).

There is strong evidence that *Soilh&co* contributed to *increasing system understanding* among the participants of the workshop during the game sessions. In addition to the

identification of barriers to agroecological change and levers to overcome them seen in 3.1, it contributed to *fostering the understanding of others' roles and perspectives* (strong evidence). Indeed, participants expressed that they got a better understanding of other stakeholders' roles, their needs, their difficulties, and how stakeholders interact between them and with the problem under study. Specifically, non-farmer stakeholders realized the complexity of farm management, they experienced how farmers have to balance production and commercial issues to maintain profitability: "[I learned] the complexity for the producer to take into account all factors while maintaining profitability" (n.d., S). Yet participants also learned about downstream value chain: "[the game] allowed me to understand [...] the need of downstream" (*Seed company 1*, S), "I realized the problem of marketing alternative crops that are poor or non-host for RKN" (*Input retailer 1*, S). However, no mention was made of learning for the input supplier role and the R&D role. Participants learned about the interaction between the stakeholders relevant for the problem under study too, for instance between farmers and downstream value chain: "I became aware of a stronger impact from the value chain: outlets, prices, crop calendar" (*Soil conservation NGO 1*, S). The game also generated discussions during the debriefing that were sources of learning on others' roles and point of view, as for the input retail cooperative who wrote: "[what interested me the most is] the point of view of producers and the way they approach the solutions" (S). Finally, many participants declared that what they were the most interested in was "actors' diversity", "diversity of participants" (*Organic wholesaler*, *Organic technical advisor*, *Organic farmer 2*, n.d., S). The elements above also show that the game session has been *changing the cognitive representations* of the participants (good evidence). It is the most striking with the words participants used: "I became aware of", "I realized" (see citations above).

There is strong evidence that *Soilh&co* has been *fostering hybridization of independent knowledge* by exchanging from heterogeneous sources different pieces of knowledge that participants did not link before. Hybridization was fostered (i) directly through the game, (ii) indirectly through the exchanges following it (debriefing, design phase). Indeed **during the game session**, the game delivered pieces of knowledge about the role of the different stakeholders in the RKN management (as seen in the first paragraph), and about techniques, e.g., "[the game] allowed me to understand the crop rotation management" (*Seed company*, S). Therefore, it fostered the hybridization in participants' minds of the different pieces of knowledge it embeds: scientific, technical and empirical, with their own knowledge. Besides, knowledge hybridization **also occurred through the exchanges between stakeholders**, mainly of empirical knowledge on the system. *Organic farmer 8* illustrated by concrete examples that some organizations that were formed during the game session were actually possible, whereas part of the participants thought it impossible. For instance, in the game, a large producer mutualized the sales of a crop with other farmers, which was considered as unrealistic by several participants. *Organic farmer 8* explained then how a large lettuce producer was buying lettuces from his neighbor to avoid conflict with them, who considered he was somehow stealing their market. The links between the game session and the exchanges were clear, "[What I preferred in the workshop was] the game, a very good opening to initiate exchanges" (n.d., S). The independence of the knowledge hybridized is demonstrated by the fact that participants and the observers learned completely

new things that they did not previously know, e.g., “As I was not specialist of biocontrol and problems linked with RKN, I learned a lot of things” (n.d., S). This held to be true for the participants and for ourselves, the organizers.

There is good evidence that *Soilh&co* was also *supporting the processing of the knowledge*, reinforcing the hybridization of new and former knowledge both collectively and individually. For instance, during the debriefing two participants expressed that they first had issues to manage RKN pressure in the game because they lacked knowledge on the impacts of the techniques. The need to alternate RKN-resistant rootstocks of tomatoes and eggplants with other crops or resistance genes to avoid the development of virulent RKN population was represented in the game. On this base, participants started to exchange and make collectively links between the need to alternate the rootstocks’ resistance to RKN (for tomato and eggplant), the lack of knowledge from farmers and part of technical advisors (Organic farmer 8, A), and the difficulties for part of organic farmers to get resistant rootstock from their nurseryman (Organic wholesalers, A). Organic wholesaler concluded that the nurserymen could be more proactive in proposing a diversity of rootstocks and providing knowledge to farmers on the benefits and shortcomings of each existing rootstock. Conventional farmer then stressed that nurseries also offered a limited number of rootstocks because they favor the most easy to produce, especially a good germination rate (A). Organic farmer 8 concluded that the volume of the command could play a role and they could make collective order to motivate the nurserymen in proposing rootstocks adapted to their need (A). This collective building of knowledge on the issue of rootstock resistance management shows well a progressive processing and hybridization in the participants’ mind of the knowledge exchanged. During the design session, we saw that the participants remobilized the knowledge they acquired during the game to propose solutions, showing that they integrated it in their own individual knowledge structures: “we saw that the big difficulty is to implement minor crops that generate few nematodes for instance. We know how to produce them, the problem is the marketing. [...] a pooling of these crops marketing should be done at producer level [...]. I saw it in the game, I wanted to produce strawberries, but I had to dump them because there was no strawberry market” (Input retail cooperative, A).

There is mixed evidence that *Soilh&Co* fulfills the sub-function *fostering mobilization of uncommon knowledge*. In the design phase, we observed part of the participants mainly retrieving uncommon knowledge to make propositions: “I went a bit further [...], it is a bit utopian but OK ... Make a kind of soil ecosystem. [...] natural plants to regenerate the soil. People speak a lot about the ecosystem, plant that regenerate either oxygen, or soil [...] A bit like a swimming pool that filters itself” (Mixed wholesaler, A). Besides, Mixed wholesaler wrote in his questionnaire “ecosystem” as an example of what the game inspired him for the design of solutions. It makes the link clear between the game session and the mobilization of uncommon knowledge for the design session. Yet, another part of the participants was sticking to their common knowledge. For instance, when Mixed wholesaler mentioned his idea of “natural plants to regenerate the soil”, Mixed technical advisor 1 answered: “Natural plants, what does it mean, green manure ? [...] Legumes, diversified green manure.” referring to the techniques he already knows and that have been used during the game.

There is strong evidence that *Soilh&Co* has been *allowing the identification of knowledge gap and new actors to involve*. Based on their game experience and following discussion, participant pointed out the lack of knowledge on the real impact of the agroecological techniques on RKN pressure (Seed company, A). The Biocontrol company stressed especially the need to develop knowledge on biocontrol and especially on their action mode (A). Regarding new actors to involve, participants identified the consumers and the European Union. The consumers were pointed because agroecological RKN management appeared costly and might request consumers to pay a higher price. The European Union was mentioned because they support little greening of vegetable farmers' practices compared to arable farmers, as most of the subvention are given based on the cropping area. Thus, participants identified that more could be done by policy actors.

Table 14 - Analysis of *Soilh&co* ability to support Knowledge management

Functions	Sub-functions (sb-f)	Result
Knowledge management	(1) Increasing system understanding	Strong evidence
	(2) Fostering the understanding of others' roles and perspectives	Strong evidence
	(3) Changing the cognitive representations	Good evidence
	(4) Fostering hybridization of independent knowledge	Strong evidence
	(5) Supporting processing of the knowledge	Good evidence
	(6) Fostering mobilization of uncommon knowledge	Mixed evidence
	(7) Allowing the identification of knowledge gap and new actors to involve	Strong evidence

3.3. Creativity

Among the 5 qualitative variables, there was strong or good evidence for 3 of them. There was no evidence for lightening the cognitive load and mixed evidence for setting participants in a creative mindset (avoiding fixation) (Table 15).

There is strong evidence that *Soilh&Co* contributed to *generating original concepts of innovations*. These innovations will be analyzed in detail in Chapter 4 but we here describe the arguments for the interest of the game in developing creativity. Indeed, 6 concepts of coupled innovations were proposed during the game and 26 coupled innovations were proposed during the design phase (A, O, P). Among these 32 coupled innovations, 13 are attainable concepts (5 directly proposed during the game) and 13 are disruptive (1 during the game).

Although the link between the innovations designed during the design phase and the game session cannot be made for each innovation, there is good evidence that *Soilh&Co supported joint ideation and management of knowledge* to generate the concepts mentioned above.

Participants found solutions to the challenges they were meeting by combining knowledge during the game. For instance, players of farmer roles from the mixed group pooled their individual productions of fennel to have enough products to reach the global market directly, and they also shared the losses when they overproduced (O, A). We see this innovative solution arose from the following knowledge elements embedded in the game: they had to introduce minor crops in the rotations to manage RKN pressure, yet they were confronted to harvest losses as they had either not enough harvest, or the market was already saturated (O, A). In addition, the marketing firm was providing a lower price than the global market. After the game session, they proposed solutions with referring to knowledge acquired during the game experience, combined to their former knowledge and the one provided by other participants. For example, during the design phase, an idea arose from several pieces of knowledge that were recalled when building collectively the idea: nurserymen should accompany farmers actively in the choice of rootstocks that are the most adapted to their current problems with the support of an external association. These pieces of knowledge were: (i) “farmers lacked knowledge on agroecological techniques” already mentioned when debriefing the game experience, (ii) “nurserymen could support farmers in their choices of adapted rootstocks” mentioned in the debriefing based on knowledge from *Organic farmer 8* and *Organic wholesaler*, (iii) “an existing NGO work to facilitate relation between suppliers and farmers and develop agroecological practices in other production systems”, mentioned by *Organic technical advisor* and NGO promoting soil conservation during the design phase (A). One of the observers wrote that during the design phase, the participants often said: “as we saw during the game” (O). Finally, 7/13 respondents replied yes to the question: “Did the simulation and the following discussion inspired you with ideas of concrete strategies to overcome barriers?”, 2/13 replied “Yes and No” and 4/13 replied “No” (S). Three reasons were given for the “No” side: (i) the lack of knowledge (n.d., S), (ii) the lack of concrete ideas (*Regional policy implementer*, S), (iii) the loss of part of what the participants learned or felt during the game and debriefing in the discussion of the design phase (*Organic technical advisor*, S), potentially linked with a too long workshop (S, O).

There is no evidence that *Soilh&co* lightened cognitive load. Indeed, although during the game session the participants seemed to focus on their choices and ideas, we do not have clear testimony demonstrating it.

There is good evidence that *Soilh&co* allowed segregating idea generation from idea assessments. Indeed, they were not exposed to other participants’ judgment, which allowed them to express their ideas freely. For instance, few farmers said, “that does not exist in reality”, when was mentioned the innovative solution consisting in the big farmer of the mixed group, specialized in fennel production, buying the production of other small producers and sharing losses with them when the market was saturated (A). Yet the idea could still be discussed based on what had been experimented during the game (A).

There is mixed evidence that *Soilh&co* has been setting participants in a creative mindset. Indeed, as we saw in the previous section, both common and uncommon knowledge was mobilized depending on the participants. We also saw that few participants stayed very close to what they already knew when proposing ideas, generating common ideas, e.g., “the farmers

need to lengthen their rotation. Potentially even introduced a fallow” (Mixed farmer 2), while others went further as for *Organic wholesaler* who proposed to monetarize soil health (S, N).

Table 15 - Analysis of *Soilh&co* ability to support creativity

Functions	Sub-functions	Result
Creativity	(8) Generating original concept of innovations	Strong evidence
	(9) Supporting joint ideation and management of knowledge	Good evidence
	(10) Lightening the cognitive load	No evidence
	(11) Segregating idea generation from idea assessment	Good evidence
	(12) Setting participants in a creative mindset (avoiding fixation)	Mixed evidence

3.4. Collaboration and immersion

There is good evidence that three sub-functions have been fulfilled. There is poor evidence that *Soilh&co* created a collective understanding of the system and no evidence that it fostered the sharing and integration expectations in a compatible set (Table 16).

There is poor evidence that *Soilh&co* has been *creating a collective understanding of the system*. During the debriefing we saw a few emerging agreements: (i) on the difficult simultaneous management of production and marketing challenge within vegetable farms (A), (ii) on the need for a better communication between farmers and marketing firm for production planning (A, O). Yet, many other points appeared to be not consensual (controversy around the minimal quantity of production to commercialize it; tension between people putting forward strong cooperation among farmers vs. strong desire for independence; A).

There is no real evidence that *Soilh&co* has been *fostering the sharing and integration of expectations in a compatible set*. According to the questionnaire, most respondents (12/13) agreed on the fact that all participants have a common interest to facilitate agroecological management of soil health in Provençal vegetable systems, for ecological and economic reasons. However, we have no element to claim that it is due to the game (S). Besides three participants left after the debriefing. Two farmers (*Conventional farmer* and *Mixed farmer 1*) were mainly expecting to obtain technical information on how to manage their soil, although we previously inform them about the goal of the workshop (O, N, A). *Regional marketing platform* was expecting to discuss directly of techniques and collective impediments and showed little interest in the game (N).

There is good evidence that *Soilh&co* has been *creating a climate of trust*. Indeed, all responders to the questionnaire considered that the game session helped them to exchange more easily with the other participants of the meeting (S). Organic farmer 2 specified: “this is one of the very interesting point of this simulation” (S). The observer of the organic group noted

that during the simulation, exchanges between participants became easier and easier (O). Yet, *Organic technical advisor* found that “halfway [of the debriefing] we got a bit skittish” (S), mentioning that participants seemed to speak more freely in the second part of the workshop.

Finally, there is good evidence that *Soilh&co* has been *fostering attention* and *favoring immersion and engagement including emotional involvement*. Indeed both observers noted that all participants, except *Conventional farmer* (who left), were immersed in the game, then fully attentive (O). Emotional involvement has also been observed, especially for producers and marketing firms (persons hurrying, laughing, focusing intensively on their board) (O). During debriefing the seed company expressed: “one regret as a large vegetable farmer is that I realized too late that I could sell directly to the global market” (A) and wrote concerning the game “I had a lot of fun” (S). Although the link with the serious game cannot be fully demonstrated, we noted that during the debriefing and the design phase, attention level and participation stayed high (O).

Table 16 - Analysis of *Soilh&co* ability to support the collaboration and immersion

Functions	Sub-functions	Result
Collaboration	(13) Creating a collective understanding of the system	Poor evidence
	(14) Fostering the sharing and integration of expectations in a compatible set	No evidence
	(15) Creating a climate of personal and collective trust	Good evidence
	(16) Fostering attention	Good evidence
Immersion	(17) Favoring immersion and engagement including emotional involvement	Good evidence

4. Discussion

In this section, we first analyze if the strengths and the limits of *Soilh&co* for the support of coupled innovation design are consistent with the existing literature on serious game use in business, sustainable development and agricultural contexts (4.1). Then, we discuss which design elements of *Soilh&co* are specific compared to other serious game and make it more suitable to support coupled innovation design (4.2). Finally, we discuss the generality potential of *Soilh&co* (4.3.).

4.1. Strengths and limits of *Soilh&Co* to share sociotechnical analysis and foster the design of coupled innovations

To our knowledge, *Soilh&co* is the first serious game explicitly designed to share the outcome of a sociotechnical analysis and support the design of coupled innovations, based on three

generic functions (in bold in the following sections) : **knowledge management** (4.1.1.), **creativity** (4.1.2.) and **collaboration** (4.1.3.). *Soilh&co* performed well in those functions (sections 3.2, 3.3, 3.4). Yet it presented some limits. In this section, we compare the performances of *Soilh&co* with the literature. To fulfill the three functions, we highlight the role of four *Soilh&co* features (underlined in the following sections) : (a) embedding the knowledge from the sociotechnical analysis in the game, (b) immersing participants in the role-playing game as players of problems' stakeholder, (c) inverting stakeholders' roles, (d) thinking in open and riskless environments.

4.1.1. Sharing the result of the analysis of a complex system and supporting knowledge management

We demonstrated (section 3.2) that *Soilh&co* fostered **knowledge management** on the RKN management from the field to STAFS (Table 14). It was an effective intermediary object (Vinck 2009) to share and discuss the results of the sociotechnical analysis. Indeed *Soilh&co* supported “the confrontation of their [actors'] points of view by offering them holds, by facilitating the emergence of solutions and bringing together aspects that are otherwise dissociated” (Vinck 2009). *Soilh&co* acted then as a mediator between stakeholders, and between them and the facilitators, as it represented the outcomes of the sociotechnical analysis and translated it for the stakeholders. It was also a boundary object as it enabled heterogeneous actors to handle the same elements of the game and share their understanding upon it (Vinck 2009). It then fostered exchanges between heterogeneous actors. This is consistent with the results of Becu (2020), who reviewed many serious role-playing games that aim to address societal and organizational challenges at territorial levels.

Besides, the capacity of *Soilh&co* to fulfill 6 of the 7 sub-functions (sb-f) of knowledge management (Table 14) is in-line with the literature on serious games. Most of ComMod games and other serious games addressing sustainability issues (>34 games) increased systemic understanding of complex systems (Barreteau et al. 2010; Le Page et al. 2010; den Haan and van der Voort 2018; Becu 2020) (sb-f 1, Table 14.). They also fostered the understanding of others' roles and perspectives (den Haan and van der Voort 2018; Becu 2020) (sb-f 2), raised awareness and fostered change in views (den Haan and van der Voort 2018; Becu 2020) (sb-f 3). This is supported by role asymmetry (*i.e.*, various roles represented within the game) and especially inverting roles, which fosters the learning of others' points of view and postures and of stakeholder's interdependence (Becu 2020). Agogué et al. (2015), Berthet et al. (2015) and Patrício et al. (2018) reviewed serious game cases that fostered hybridization of independent knowledge from heterogeneous sources (*e.g.*, generic scientific and local experiential knowledge - Berthet et al. 2015) (sb-f 4), and allowed the identification of knowledge gap and new actors to involve (sb-f 7). The strong capacity of *Soilh&co* and other serious games to stimulate rapid learning is to link with the embedding of situated information within the game (a), and by stimulating reflection upon the game experience during the debriefing (Agogué et al. 2015; Becu 2020). It fosters a full experiential learning cycle (Kolb 1984 cited in Becu 2020). This learning is strengthened by the immersion of participants in those games (b), and especially by emotional involvement in the games (Garcia et al. 2016). Finally, Patrício et al. (2018), reviewing

18 cases of gamification to support the early stages of innovation, showed that “the build-up of an open, playful, and creative environment allows participants to think, share, listen to others, and incorporate new knowledge into their own model” (d), *i.e.*, to support the processing of knowledge (sb-f 5).

Yet, the need in vegetable production systems to train a changing workforce and the risk of work overload was identified as an important barrier to the change in practices (Chap. 1, Navarrete et al. 2015) and were not well represented in the game. It was only experienced through the difficulties that farmer role players encounter to manage all the tasks during the limited time of the game rounds, which only illustrated the time and mental load issues of the farm manager. Besides, some game situations were not realistic and could bias the experience of the players, conveying ideas that were not consistent with the results of the sociotechnical analysis. For instance, *Regional market platform* diverted the use of a product for cleaning the tools to disinfect the soil, which allowed him to save a lot of money for no realist reason. He then told me that actually, based on the game experience, he was not seeing real problems managing soil health with conventional methods. Besides, for part of the rounds, players were not synchronized, *i.e.*, part of the players played one season and the others finished another. On a few occasions, it conducted to situations where the wholesaler or the cooperative could not gather the whole production from a season before selling it. This practical simulation issues pointed to several challenges for *Soilh&co* sessions improvement. First, it appears that the current version of *Soilh&co* requires more than 2 facilitators per group. Another option would be to convert the farm board in a virtual format that could be played on a tablet, with keeping the rest physical in order to maintain interactions between stakeholders. Indeed, the synchronization of rounds, the calculations of both yields and RKN pressure, the role of the big market and the checking of the rules could be done automatically. This would free up time to facilitators, and reduce the need to 1 or 2 facilitators. Finally, the representation of input supplier and R&D roles should be improved, to foster participants learning about their role and constraints, especially economic constraints (*e.g.*, taxes).

4.1.2. Supporting creativity and ideation

Soilh&co also fostered the generation of original concepts of innovations (sb-f 8, Table 15), supporting joint ideation and management of knowledge (sb-f 9, Table 15), segregation of the idea generation from idea assessment (sb-f 11, Table 15) and set part of the participants in a creative mindset (sb-f 12, Table 15). Our results are consistent with the findings of Berthet et al. (2015) who showed that ComMod games facilitate the exploration of solutions by stakeholders beyond their real situation. Agogué et al. (2015) showed that the serious game use allowed the collective to investigate a known issue with a new angle, raising new aspects and resulting in the emergence of disrupted ideas coming from a systemic understanding of the problem, at the ecosystem level, rather than at the usual firm level (sb-f 8 and 9, Table 15). We then see the strong link between serious game performance for supporting knowledge management and for supporting creativity. Also, the learning of the other’s point of view and postures through role inversion (b) provokes a decentering of participants (Becu 2020), which fosters creativity. Our

results are in line with those of Agogué et al. (2015) and Patrício et al. (2018), who established that serious games enhanced creative thinking, and expanded “the range of possibilities for new ideas, options, problems and solutions” (Patrício et al. 2018) (sb-f 12, Table 15). Moreover, the fact that serious games let you navigate in the complex situation without risk (d) is also a strong feature supporting creativity (Garcia et al. 2016) (d). They are effective tools to explore and test alternatives to the dominant design that cannot be tested in reality for reasons of safety, costs and time (Barreteau et al. 2010; Agogué et al. 2015; Becu 2020) as they minimize consequences and risks in real life (Broug  re 2012) (d). In that way, according to Agogué et al. (2015), serious games enhance ideation more than alternative approaches (e.g., brainstorming) (s-f 8, Table 15).

No evidence of “lightening the cognitive load” could be found in the data collected (sb-f 10). A specific question should have been added to the questionnaire. We also showed that *Soilh&co* fostered the mobilization of common knowledge for several participants (sb-f 6), which, according to Agogué et al. (2014b) tends to limit creativity (sb-f 12). It is in line with the study of Agogué et al. (2015) and Berthet et al. (2015), who stressed that the frame provided by the game (e.g., assigned roles and resources, spatial representation) can create fixation effects, e.g., the players do not feel free to add elements to their profiles or resources.

4.1.3. Supporting collaboration and immersion

Soilh&co partly fostered **collaboration**. It created a climate of personal and collective trust among a diversity of stakeholders unfamiliar with each other (sb-f 15, Table 16). Other studies showed that serious games allow building relationships and trust (den Haan and van der Voort 2018), sustain rapid collaboration between participants with reassuring participants and facilitating their involvement in an unknown context (Agogué et al. 2015) and reduce social distance and encourage interaction (Patrício et al. 2018). They also legitimate each participant to contribute by providing them skills and resources during the game (Agogué et al. 2015). Finally, literature also shows that serious games by immersion foster engagement of participants and participants’ attention (Garcia et al. 2016; Patrício et al. 2018; Becu 2020) (sb-f 16, 17, Table 16). This immersion in a playful environment fosters learning and then creativity as we saw in the previous sections. It also fosters collaboration by supporting empathy between players (Della Rossa 2020). The collaborative climate then fosters learning and creativity (Agogué et al. 2015).

According to Patrício et al. (2018), games facilitate the creation of a collective view of the problem and target, with reaching an “actionable consensus”. Yet, in our study, we showed that *Soilh&Co* did not successfully achieve these goals, which correspond in our analytical framework to “creating a collective understanding of the system” (sb-f 13) and “fostering the integration of each participant’s main expectations in a compatible set” (sb-f 14). Although it might be of little importance for the generation of coupled innovation concepts, it appears essential for their further development on the territory under study. We missed principally the engagement of *Conventional farmer*, *Mixed farmer 2* and *Regional market platform*, who were important actors of the problem under study, but left before the design phase, unsatisfied with the game session. They did not find the game serious enough and useful, and had different expectations: direct

exchanges between stakeholders and technical knowledge provision. On the other hand, *Biocontrol firm* told us that he first thought that he would lose his time with the game and finally found it very interesting. This is consistent with Garcia et al. (2016) who mentioned that games are still generally perceived as not serious enough, not realistic enough, and not complex enough. To overcome the rejections, more time should have been allocated to ensure that our expectations of the workshop and how stakeholders will participate were transparent and understood for all participants, as Barreteau et al. (2010) recommended.

4.2. Specific features of Soil&Co to support the design of coupled innovations, compared to existing agricultural serious games

Beyond the key features presented in the section 4.1.2, to support knowledge management, creativity and collaboration, we believe that three features need to be combined to tackle the specificity of the design of **coupled** innovations. These features are: (i) to encompass multiple levels (from the field to sociotechnical landscape scale), (ii) to include multiple stakeholders (all stakeholders strongly influencing choices of farming practices and fun to play), (iii) to foster the exploration of the unknown, i.e., of unexpected solutions. To our knowledge, *Soilh&co* is the first serious game gathering these three features.

Many serious games have been developed to accompany farming practice change. They are mostly focused on the design of adapted combinations of farming practices **at farm and field level** to the farm's context and farm's and organizer's goals, for instance, designing dairy farming systems adapted to climate change in 2050 for the forage rummy (Martin et al. 2011), designing cropping system with low input levels (Marguerye et al. 2018) or designing agroecological management of vineyards (Renaud-Gentié et al. 2018). Other serious games explore combinations of farming practices **from the field to territorial level**, e.g., Dynamix explores new feed practices, cropping practices and trade relations between grain and livestock farmers (Ryschawy et al. 2018). Yet all the serious game we cited above take **mainly farmers into account**, although other stakeholders strongly influence farming practices (e.g., for input reduction) (Boulestreau et al. accepted).

The games cited above also mixed **the “soft approach” of the serious game with the “hard approach”** of a model enabling rapid evaluation of the technical innovations designed during the game session (Martin 2015), for instance a Life Cycle Analysis model (Renaud-Gentié et al. 2018). This is a key element currently lacking in *Soilh&co*. As a result, although it was one of our objectives, we could not really evaluate the coupled innovation concepts during the workshop. Yet, in order to comply with their calculation tools, the serious games mentioned above could limit innovation, and preferentially provide combinations of predefined actions. This constrains generativity, as it limits the possibilities of participants to propose unexpected solutions (e.g., introducing a practice that has not been implemented by the designers in the game and the model) (Meynard et al. 2012; Berthet et al. 2015; Hatchuel et al. 2017). With this approach, innovative design is limited, as it necessitates defining the object designed along with the precise

expectations and goals of the designers during the design process (Meynard et al. 2012; Hatchuel et al. 2017)

Other serious games, especially from the companion modeling approach (ComMod, (Étienne 2013), are **multi-levels** (from the field to the territorial agrifood system) **and explicitly include multiple stakeholders** who foster the evolution of farming practices. For instance, *CauxOperation* involves various stakeholder roles: farmers (potatoes, dairy, pig farmers), the mayor and watershed syndicate manager (Souchère et al. 2010). Its designers make the real stakeholders play to explore solutions to collectively manage erosive run-off in the watershed. The game sessions result in the proposition of new combinations of farming practices and other stakeholders' actions, which are very close to coupled innovations. Yet, although participants can mention orally that they would like to achieve in another way, **the game is limited in the exploration of radically new ideas by what the computer model evaluating run-off evolution can take as input**. Conversely, the *OilPalm* ComMod game (Kamto et al. 2019), encourages finding unexpected solutions to develop sustainable palm oil production in Cameroun: players can imagine and implement any ideas that come to their mind, going beyond the initial frame proposed by the game. **Yet it does not explicitly take into account farming practices** beyond the strict number of plots that are cropped for each farm. **Therefore, it does not allow exploring the interactions between farming practices and STAFS level choices**. On the contrary, *Soilh&co* combines the four scales influencing farming practices: field, farm, STAFS, and sociotechnical landscape, it represents the main stakeholder and processes influencing RKN management and fosters the exploration of the unknown by its flexible structure and its rules oriented towards innovation.

Becu (2020) considers that 4 periods are suited exploration of alternatives to the simulated situation: (i) during the game to explore changes, (ii) at the end of the game, principally during the debriefing, to propose changes and reflect on changes operated during games, (iii) between two sessions, when the second session serves to test the proposition from the first one, (iv) after the workshop when people implement changes inspired by the workshop. In this study, we only explored the generation of coupled innovations concepts during the game session (i) and directly after it (ii). During her Ph.D. thesis, Pauline Della Rossa developed a multi-actor and multi-level serious game based on a sociotechnical analysis, specifically to explore the conditions for implementing previously codesigned concepts of coupled innovation (Della Rossa 2020). Based on a computer simulation, participants and facilitators could see the effect of the combination of technical, organizational and institutional solutions already implemented in the model on the pesticide pollution of a river basin and discuss their conditions of implementation. Yet they could not explore new solutions completely with the game. I hypothesize that *Soilh&co* coupled with a proper evaluation model could also be used to explore further already designed solutions. Further research should be done on how to design serious games to accompany the realization of several steps of a coupled innovation design process: ideation, concepts' selection, development, evaluation and implementation.

4.3. Generality potential and limits of *Soilh&co*

We hypothesize that *Soilh&co* architecture would allow a quick adaptation to the management of other bioagressors with low mobility (at the field and farm level), in other non-perennial plant production systems and territories, except if another main stakeholder is identified or if the workforce resource needs to be represented. Indeed, every cropping system of non-perennial crop is based on rotations over seasons represented in *Soilh&co* by the cropping calendar; on techniques implementation depending on farmers' values and objective (Navarrete et al. 2016; Mawois et al. 2019; Bouttes et al. 2020) represented on the role cards; on farmers' knowledge (Chantre and Cardona 2014; Navarrete et al. 2016; Mawois et al. 2019) represented by "know-how card"; and on the productive resources: inputs, machinery, capital (Aubry and Michel-Dounias 2006a) represented by the bun-money, input and equipment cards. The representation of the input supplier, R&D, downstream value chain and global market roles enable the expression of a large diversity of barriers. It respectively enables the representation of barriers relative to high-quality input accessibility, knowledge accessibility and downstream value chain constraints. Buns-money accounts for capital and cash flow limitations. Finally, the representation of the variation of RKN pressure level for each cropping system is generic enough to be reused for any bioagressor with low mobility at the field and farm level. In that case, based on the sociotechnical analysis of the case study, we could adapt to the studied bioagressor the input, know-how and equipment cards. We could also adapt the cropping calendar to the production system (can need more or less cropping seasons) and provide a new calibration of buns and variation of bioagressor pressure. *Soilh&co* could also be quickly adapted to simulate other complex agricultural problems around practice changes, such as crop diversification, that share the same main stakeholders and main limitation as the one represented in *Soilh&co* (Meynard et al. 2018). Then, based on *Soilh&co*, a generic framework could be proposed for supporting the design of serious games that represent practice change issues from the field to agrifood system level and foster the design of solutions. It could be inspired from Wat-A-Game (Ploeg 2012), a framework for designing game that tackles collective water management issues. In case of bioagressors with high mobility at territorial level (most aerial bioagressors), spatial representation and interactions should be added, as for the game developed by Della Rossa (2020). Yet this change might be more time consuming than the adaptations proposed above. The representation of another main stakeholder or workforce resource would also require a more profound reconfiguration. *Soilh&co* needs then to be reused and adapted to other situations in order to test our hypothesis on his generality.

Another generic aspect of a serious game is the diversity of use that can be made of it. In this study, we presented *Soilh&co* use to share and discuss a sociotechnical analysis with the stakeholder of the problem and to support the design of solutions, yet it can be reused in other contexts. For instance, *Soilh&co* has been used to train two classes of Agroecology License students, on a systemic approach to cropping practices, from field to agrifood system level. Diverting the use of such a serious game for education is common.

Finally, *Soilh&co* fulfilled most of our initial goals in the short amount of time we had available (one workshop of 4.5 hours). Yet it also presents shortcomings that are calling for improvements. We argued that *Soilh&co* could be adapted to other complex agricultural problems and to other uses such as education. To conclude, **we gave a proof of concept that serious games are adapted tools to foster quickly, with a heterogeneous group of people unfamiliar with each other multi-levels, the design of coupled innovations' concepts.**

5. Conclusion

In this paper, we showed that the *Soilh&co* serious game, was an adequate tool to manage the participatory design of coupled innovation concepts, which is the first step of the coupled innovation design process. Indeed, as expected from previous literature, *Soilh&co* proved to be effective in fostering rapidly and jointly (i) management of new and existing knowledge, (ii) creativity, and (iii) collaboration. These three intertwined functions support together coupled innovation design. Besides, we show that *Soilh&co* was efficient for sharing with participants the sociotechnical analysis of a specific multi-level and multi-stakeholder agrifood system problem: the change of farming practices for agroecological management of RKN in Provençal sheltered vegetable systems. This performance was based on the immersing role-playing game nature of *Soilh&co*, the multiple roles and role inversion, the representation of the multiple levels from farm to sociotechnical landscape and the stimulation to go beyond the initial frame of the game. Yet, the representation and the session management could be improved, for instance adding costs to the role of input suppliers and R&D and converting part of the game on a tablet format. Besides, our experience stresses the importance of ensuring beforehand the understanding of all participants regarding the goals of the workshop using a serious game, and the way stakeholders will contribute to the workshop. The reader also needs to bear in mind that (i) serious game development is a long process and (ii) the facilitation of role-playing game in a complex system often requires several trained facilitators. On the first aspect (item i), *Soilh&co* is an interesting prototype that could inspire and facilitate the development of adapted serious games for R&D actors that tackle other issues regarding farming practice change in plant cropping systems calling for coupled innovation. Based on this experience of *Soilh&co*, we foresee two future research avenues. The first one is building and testing a generic game frame to help game designers quickly design a serious game to foster coupled innovation design for farming practice change in other contexts. The second one consists of finding ways to combine the exploration of unexpected solutions and the evaluation of these solutions during the game sessions. That could allow rapidly evaluating and refining the innovation concepts developed by stakeholders that cannot multiply game sessions.

Chapitre 4. Coconception multi-échelle de solutions innovantes pour une gestion agroécologique des nématodes à galles en maraîchage provençal

Dans ce chapitre, j'explicite le dispositif de coconception multi-échelle de solutions que j'ai utilisé pour accompagner le secteur maraîcher provençal dans une transition vers une gestion agroécologique des nématodes à galles. Je montre également ses résultats. Ce travail s'appuie sur l'ensemble des travaux précédents : l'analyse sociotechnique (Chap. 1), la traque aux innovations (Chap. 2) et la mobilisation du jeu sérieux *Soilh&co* (Chap. 3) (Fig. 22).

Ce chapitre est sous la forme d'un chapitre de thèse en anglais.

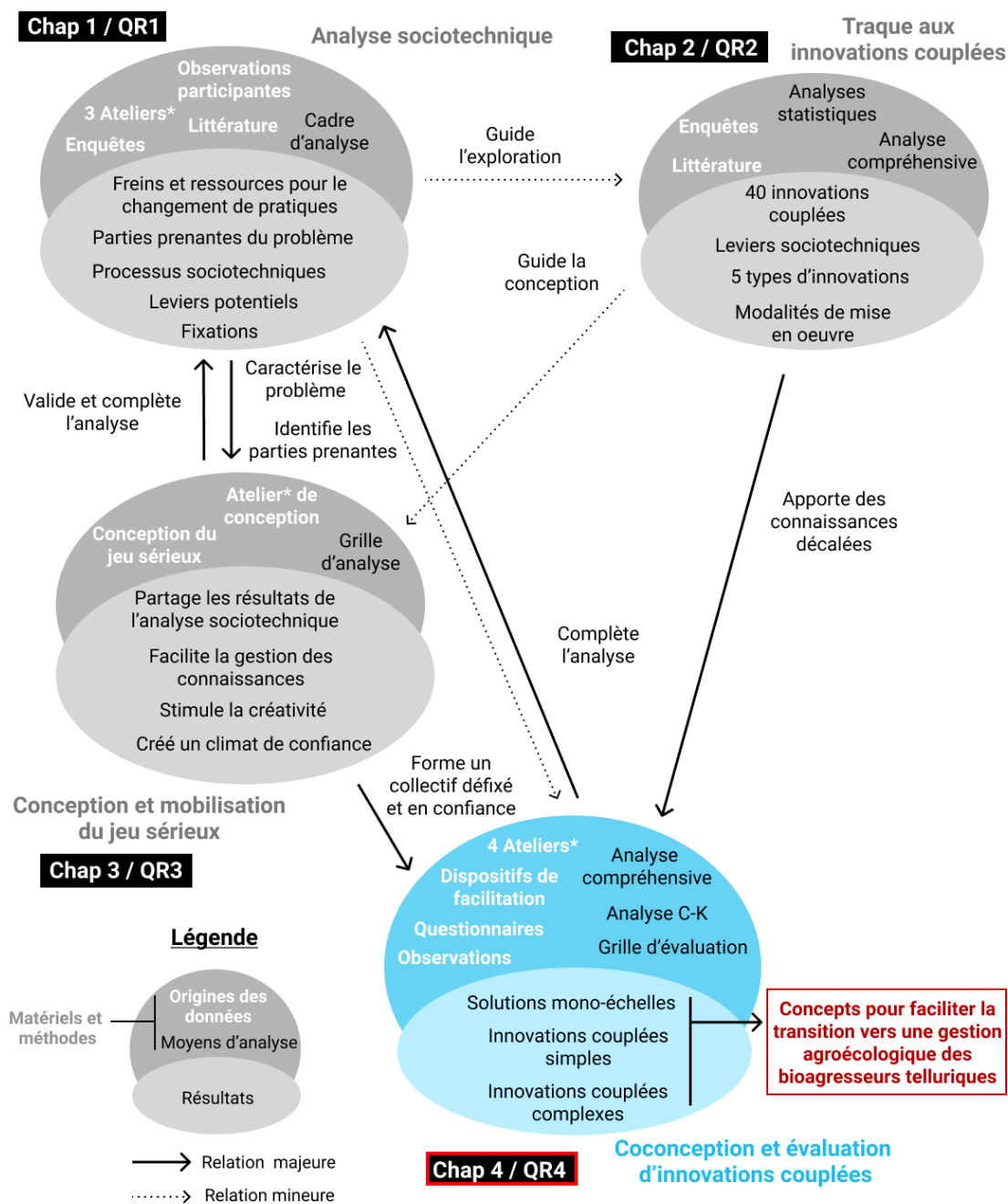


Figure 22 - Place du chapitre 4 (encadré en rouge) dans le dispositif général de la thèse. L'astérisque * après la mention des ateliers signifie que ces ateliers sont les mêmes : l'atelier de conception où le jeu sérieux a été utilisé est un de ceux qui ont alimenté l'analyse sociotechnique.

Codesigning innovative solutions from cropping system to sectoral and territorial agrifood system

1. Introduction

In chapter 1, I characterized the interrelated **barriers and the lock-in** that prevent the widespread implementation of agroecological management of root-knot nematodes (RKN) in Provençal sheltered vegetable production systems. This makes the problem of practice change for agroecological management of RKN a complex problem that is multi-stakeholder, multi-domain and multi-level. Therefore, designing solutions requires a systemic approach (Schut et al. 2015a). In Part A (section 2.3), I hypothesized that a multi-level codesign approach of solutions was needed in order to design coupled innovations that could tackle the complex problem. “Coupled innovation” was initially defined by Meynard et al. (2017) as an innovation designed “in raw production, exchange, processing, and consumption, while taking into account synergies or antagonisms between upstream and downstream [value chain]”. Meynard et al. (2017) advocated that barriers to innovation in upstream and downstream value chain could be overcome if the innovation process in both levels was coordinated. Yet, the authors put forward that many aspects of the design process for coupled innovations still need to be studied. In this chapter, I will contribute to answering two of them. First, which multi-actor approach to choose to design and evaluate coupled innovations? Second, which tools need to be designed and used in order to facilitate the design process for coupled innovations? The main challenge is that the different stakeholders of the complex problem under study are various, without hierarchical relations and with partly different interests. Besides, the case study (Part A, 4.3) shows that the sheltered vegetable agrifood system actors are little available, and are thus difficult to mobilize for participation in numerous workshops. Finally, the coupled innovation process requires to facilitate knowledge management, creativity and collaboration jointly (Part A, 3.1; Chap. 3).

The preceding chapters provide elements to organize this design process. Chapter 1 provides an understanding of the barriers, but also a characterization of the main stakeholders, of the resources and the potential levers to overcome them. Chapter 2 provides knowledge of existing innovations in the context of my case study or other others, based on which innovations adapted to the problem under review can be built. Chapter 3 shows the contribution of the serious game *Soilh&co* to share the result of the sociotechnical analysis and initiate the multi-level solution design.

Besides, extensive literature shows that such a design approach to facilitate agroecological transition requires the use of an intermediary or boundary object (Martin 2015; Prost et al. 2018) that allows all co-designers to work with the same basis and toward the same goals. Indeed, according to Vinck (2009), intermediary objects allow representing, translating, and mediating ideas as well as knowledge, and representations between actors. These objects become boundary objects when they have specific elements that speak to different social worlds, facilitating their interactions (Vinck 2009).

Intermediary and boundary objects²⁶ are then specifically adapted to the participatory design of complex solutions mobilizing a heterogeneous group of actors. They facilitate grasping the problem, bringing together various concepts, and devising solutions (Vinck 2009). In the design of agricultural systems, they may take multiple forms: a representation of the system to redesign, indicators calculated from model outputs, or a combination of both (Berthet et al. 2015; Martin 2015).

The global aim of this study was to design a diverse set of coupled innovations coupling solutions from the field to the STAFS level to foster agroecological RKN management in Provençal sheltered vegetable systems and conduct a basic assessment on them. For that purpose, I organized a series of four design workshops from December 2018 to February 2020 based on several new intermediary objects. I engaged a diversity of stakeholders playing a key role in the management of RKN. In this chapter, I show that the combination of the four workshops, based on the work presented in the previous chapters, allowed to develop various solutions and coupled innovations that could, if combined, overcome the lock-in identified in chapter 1.

2. Material and methods

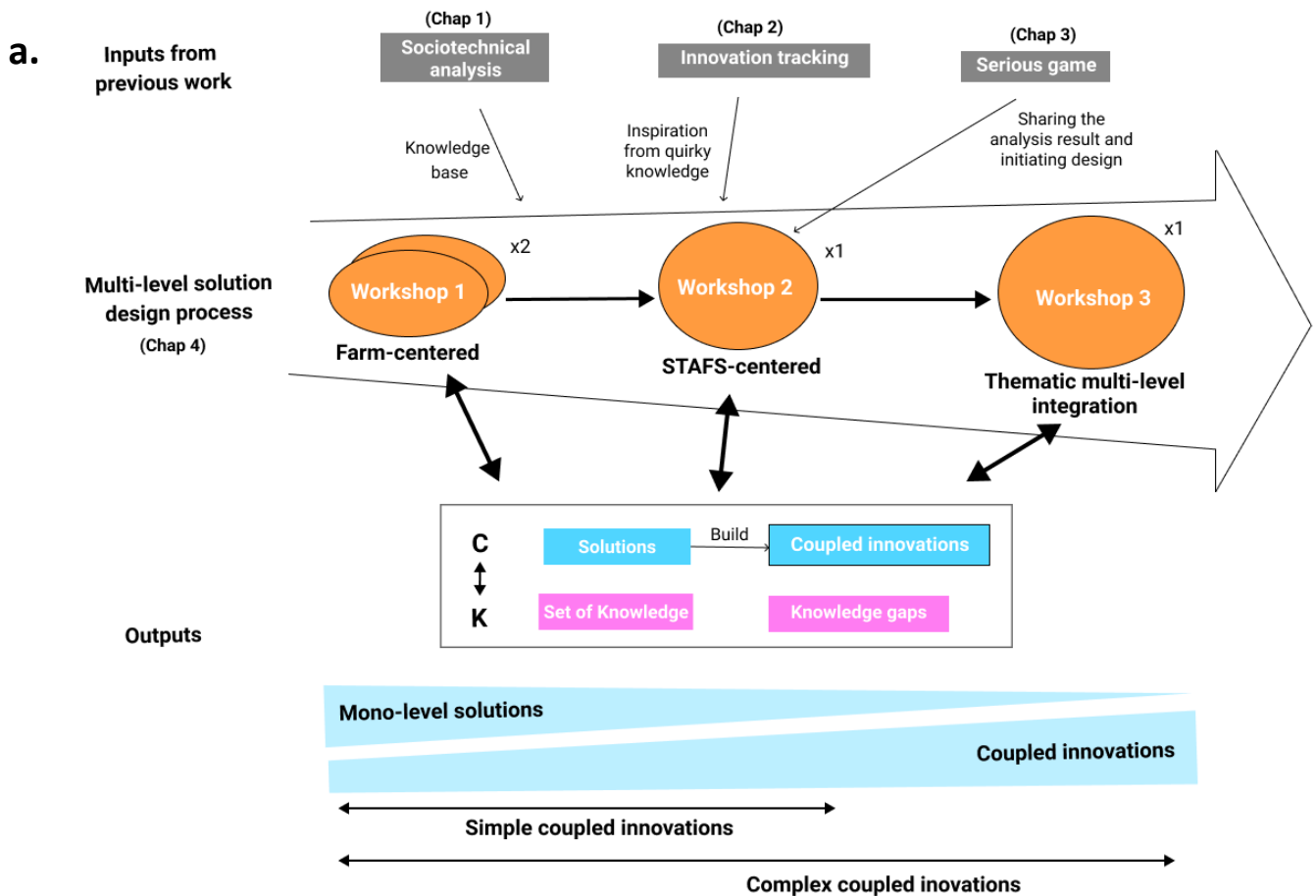
Before describing the approach, I first introduce several interrelated definitions that ease the understanding of the inputs and outputs of each workshop. A complex problem requires a complex systemic solution. In this chapter, we differentiate solutions, innovations and different types of coupled innovations (Fig. 23.a.). Solutions to solve the problem identified can be common or innovative and they require one or several actions at the field, farm, and/or STAFS level. Actions contribute to solving the problem, i.e., in our case how to facilitate widespread implementation of agroecological RKN management in Provence (Fig. 23.b). Innovation is the introduction of something new in an economic and social organization (Faure et al. 2018), which differs from the dominant model. In this work, an innovation is an innovative solution to solve the problem identified (Fig. 23.b). Based on Meynard et al. (2017) and the specificities of the system under study, I define “coupled innovation” as an innovation that aims to coordinate farming practice changes at field level with other solutions at the farm and/or STAFS levels. The “innovative” character of a coupled innovation is necessarily in the coupling and can be part of one or more of the solutions (Fig. 23.c). Coupled innovations can occur at various scales. “Simple” coupled innovations combine a small number of solutions at different levels, for instance a new farming tool with a new cropping system (Salembier et al. 2020). “Complex” coupled innovations combine many solutions at different levels, for instance the coupling of an innovative short supply chain with new diversified vegetable cropping systems (Meynard et al. 2017). “Complex” coupled innovations aimed to tackle the whole complex problem. In this study, we distinguish two types of coupled innovations (Fig. 23.c): (i) farm-level coupled innovations between cropping systems and other farm elements (e.g., innovative self-produced farming tool - Salembier et al. 2020), (ii) STAFS-level coupled innovations between cropping systems and other STAFS elements (e.g., new transformation processes or value chain organizations – Meynard et al. 2017) that can embed farm-level coupled innovations (e.g., an organization designing a new tool – STAFS-level – built by the

²⁶ For the rest of the chapter I will refer to “intermediary and boundary objects” as “intermediary objects” to ease reading.

forming a group, empowering and engaging representatives of the different problem's stakeholders based on the former farmers' group. In step 3, I organized a workshop for two main goals (Fig. 24b): (i) designing and evaluating complex coupled innovations to tackle a large part of the whole complex problem, (ii) empowering stakeholders for action in real life. The design process was always based on the barriers to change in practice identified in the sociotechnical analysis (Chap. 1) that can be summarized in four collective fixations (definition Part A, section 3.1): (i) to feed the maximum number of people, the only way is mass food production at low cost (hinders the implementation of alternative practices with higher costs); (ii) each stakeholder must remain independent and focus only on its own role (hinders cooperation) ; (iii) innovation must be made at the level of the cropping or even production system, under the constraint of the other actors of the STAFS, especially from downstream value chain; (iv) the soil is only a growing medium that must be adapted to the needs of the plant, even if it means disinfecting it.

Regarding the method, each workshop followed common principles. First, we (the facilitators) created an atmosphere of confidence with ice-breaking techniques and transparency on the goals and the proceeding of the workshop. Second, we shared knowledge on the complex problem under study. Third, we organized design sessions (in groups or plenary) and a collective debriefing. Fourth, we asked participants to evaluate the workshop based on surveys (Appendix G). Fifth, we organized an informal time for exchange. The workshop program and the method in each workshop were inspired by KCP methodology described extensively in section 3.1 Part A of this manuscript. I recall here the main elements. KCP method was devised to explore collectively a "desirable unknown" (e.g., an N-fertilization method without target yield - Ravier et al. 2017) (Hatchuel et al. 2009; Hooge et al. 2016; Berthet et al. 2019). The K-phase (K for Knowledge) provides knowledge to participants for (i) giving the knowledge base allowing them to design relevant solutions and (ii) fostering their creativity. The C-phase (C for concept) consists of exploring innovative concepts of solutions, based on creativity techniques (e.g., in known KCP method, "spotlight concepts" Hooge et al. 2016). The P-phase (P for Project) consists of designing a structured design strategy based on the previous phases by organizing the concepts to explore and identify actions to go on. This last phase also aims "at preparing the actors (make them informed, competent, aware of learning issues), and commit actors at all levels (to management, designers, engineers, scientists and even in some cases customers, users, partners...)." (Hatchuel et al. 2009). For more information on KCP, please refer to section 3.1 in Part A.

From a workshop to another (except for workshops 1a and 1b), the previous participants were re-invited as well as new participants that had been identified as missing in the previous workshops. The list of participants for each workshop is available in Table 17. The full and timed proceeding of each workshop is available in Appendice F. In the following part, I detail the specific features of each workshop.



b.

	Workshops step 1 (Dec 2018 & Apr 2019)	Workshop step 2 (Sept 2019)	Workshop step 3 (Feb 2020)
Main goals	(i) Explore and discuss innovative solutions from the farm level (ii) Form the farmer groups, empower and foster engagement (iii) Identify knowledge gaps (iv) Collect data for sociotechnical analysis	(i) Explore and discuss innovative solutions at STAFS level (ii) Form the multi-stakeholder group, empower, foster engagement and creativity (iii) Identify knowledge gaps (iv) Share and discuss sociotechnical analysis	(i) Design and evaluate complex coupled innovations (ii) Empower stakeholders for actions in real life (iii) Identify knowledge gaps
Duration	4 hours	4 hours 1/2	3 hours
Intermediary objects for design	Dynamic representations of a real farm belonging to one of the farmers invited	Serious game <i>Soilh&co</i> and multi-stakeholder based design board	74 solution cards and multi-level based design board

Figure 24- a. Co-design process based on three steps (four workshops) built on the former sociotechnical analysis, innovation tracking (for all workshops) and the serious game (for workshop 2). Each workshop jointly produced solutions, coupled innovations, a set of knowledge on the problem and identified knowledge gaps, following a C-K design process. The workshops step 1 (Wk1a&b) were organized at two different times with two different groups of farmers. The last two workshops (Wk2 and 3) were organized once with a diverse group of stakeholder representatives. The first workshops (1a, 1b, 2) produced mainly mono-level solutions and simple coupled innovations that served as building blocks for complex coupled innovations which was the main goal of the last workshop. **b.** Presentation of each workshop (date, main goals, duration, intermediary object(s) used).

Table 17 - Workshop participants grouped by stakeholder categories for each step. For step 1, I wrote “Div” to indicate that the stakeholders participated in workshop 1a “Diversity of farm profile” and “C-Outlet” to indicate that they participated in the workshop 1b “Common outlet”. For the step 2, “Org” designates the organic group and “Mix” the mixed group combining organic and conventional farmers. For the step 3, the word refers to the thematic group each stakeholder participated in: “Integration” for the group working on the integration of the different technical levers for agroecological management of RKN; “Amendment” for the group working on the implementation of amendment spreading susceptible to reduce RKN pressure; and “Diversification” for the group working on the introduction of poor or non RKN-host crops.

	Stakeholder	Step 1	Step 2	Step 3
Farmers	Org Farmer 1	Div		
	Org Farmer 2	Div	Org	Integration
	Org Farmer 3	Div		
	Conv Farmer 1	Div		
	Conv Farmer 2	Div		
	Conv Farmer 3	Div		
	Org Farmer 4	C-Outlet		
	Org Farmer 5	C-Outlet		
	Org Farmer 6	C-Outlet		Amendment
	Org Farmer 7	C-Outlet	Org	Amendment
	Org Farmer 8	C-Outlet	Org	Diversification
	Mixed Farmer 1		Mix	
	Mixed Farmer 2		Mix	
	Conv Farmer 6		Mix	
Marketing firms	Org wholesaler	C-Outlet	Org	
	Mixed wholesaler		Mix	
	Regional market platform		Mix	
	Retailer federation			Diversification
Input companies	Biocontrol company		Org	
	Seed company		Org	Integration
	Amendment company 1		Mix	
	Input retail cooperative		Mix	
	Amendment company 2			Amendment
R&D	Organic technical advisor		Org	
	Mix technical advisor 1	Div & C-Outlet	Mix	
	Mix technical advisor 2			Amendment
	Experimenter & mix technical advisor			Integration
	Nematologist researcher			Integration
	Nematologist technician			Diversification
NGO	NGO promoting soil conservation		Org	
Policy makers	Regional policy implementer for agriculture&food		Org	
	Regional public administration for agriculture&food 1			Integration
	Regional public administration for agriculture&food 2			Diversification
	Regional agricultural chamber			Amendment

2.1.1. Step 1: farm-centered exploration with two workshops

In the first workshops (step 1), we initiated the design process starting from the farm level. We also aimed at empowering farmers by providing them knowledge on agroecological RKN management, know-how on systemic multi-level reasoning, and by fostering their engagement in the solution design process.

We carried out two similar workshops with two different groups of farmers. I chose to start with farmers-only groups for several reasons. First, it enabled us to build trust and empower them, as farmers in multi-stakeholder groups tend not to feel legitimate to take the floor and in our case study, they were lacking technical knowledge and a systemic approach toward the RKN management problem. Second, it enabled to start solution exploration with the stakeholders who are at the center of the problem and make the link across the three system levels (cropping system, production system, STAFS). Finally, it facilitates the engagement of other stakeholders for the following workshops who were only interested to participate if farmers were involved.

Two groups of farmers were made, with two different ways of grouping. For the first one, I chose to form a first farmer group called “diversified” with the highest farm diversity possible (Appendice H), assuming that this would allow exploration of solutions at the farm level with a diversity of farming systems and at the STAFS level with a diversity of outlet types, and then foster knowledge hybridization, learning and generativity. As a consequence of this choice, the farmers did not specifically know each other. Besides, I especially targeted a balance between organic and conventional farmers with the hypothesis that (i) organic farmers were more advanced on agroecological RKN management and could share their experience with conventional farmers and (ii) that the conventional farmers had already experienced commercial barriers due to a value chain structure that the organic sector was heading toward (see Chap. 1). For the second group, called “common outlet” (Table 17), I chose to gather farmers selling to the same marketing firm, that knew each other and had their farms close to each other. The hypotheses were that (i) we could explore more deeply the levers that could be found with the farmers-marketing firm cooperation, (ii) we could explore more deeply inter-farm cooperation. This first hypothesis (item i) was in particular motivated by the strong role of marketing firms in impeding crop diversification necessary for agroecological RKN management (see Chap. 1). A large organic wholesaler company working in partnership with a producer organization agreed to engage in the project. The technical and vegetable production planning manager, who also had a trust relationship with the farmers, participated as the wholesaler representative. The farms’ characteristics for both groups are presented in Appendix H.

The two workshops were carried out **by a pair of facilitators** in the two groups: I and a technical advisor with strong experience in codesign workshop animation. I engaged the Mix technical advisor 1 (Table 17) in this process for two reasons: (i) providing precise technical expertise on each farmer’s propositions and (ii) improving the methods developed for the workshops thanks to his feedback, so that they could be reused by advisors (in line with Le Gal et al. 2011).

In order to achieve the goals of the workshops step 1 (Fig. 24b), I designed a workshop combining the K-phase and C-phase of the KCP method in two sessions: (i) presentation of the techniques based

on posters (K-phase), (ii) codesign of solutions based on the representation of a real farm (K&C-phase). After a short presentation of the techniques by the technical expert, based on posters I prepared (Appendix I), farmers had to place stickers under each technique poster to express: “I already do”, “I want to do”, “I do not want to do”, “I cannot do” or “I need more information” (**K-phase**). It served as a basis for knowledge exchange on farmers’ current practices, on agroecological techniques, on the barriers of their implementation and potential levers to overcome these barriers, which we facilitated. After these exchanges, a witness farmer presented his farming system based on a visual representation that I previously built with him. The other participants were invited to advise him on which solutions to implement in his cropping and production system for agroecological RKN management. Then they were invited to think of which could facilitate their introduction at the farm and STAFS level (e.g., self-production of amendment, cooperations with the outlets, input providers, advisors) (**C-phase**). This work was based on an evolutionary farm and STAFS system representation (Fig. 25) that serves as an intermediary object to redesign jointly the field, farm and STAFS’s system. First, participants were given time to think individually, then they shared and discussed their ideas with the support of the facilitators. The “witness farmer” was chosen based on the following criteria: (i) he had to face important RKN issues, (ii) his production system should present many opportunities for improvement (iii) he was volunteering. The aim behind these criteria was to motivate the witness farmer and his “helpers” and to work on a didactic case to optimize learning (**K-phase**). This interaction between farmers also aimed at fostering learning by remobilizing immediately the knowledge from the posters and knowledge exchange to advise the “witness farmer”. Knowledge gaps were identified by reflecting on the solutions collectively produced. Either during this phase (Workshop 1a) or just before (Workshop 1b), the facilitator presented uncommon solutions at different levels from the innovation tracking (Chap. 2).

I made the choice to work with a **representation of a real farm** and not a virtual one based on the following hypotheses: (i) the “witness farmer” can mobilize key knowledge on how his farm is really working, with the whole complexity of it, could not do so, at this stage, with a virtual farm, (ii) a real case will engage and motivate more farmers than a virtual one.

The workshop 1b was slightly improved after the experience of the first workshop: (i) simplification and correction of posters based on new data, (ii) simplification of the intermediary object representing the farm (e.g., presentation of two contrasted cropping system archetypes against six for the first workshop), (iii) innovative solutions were presented together in a block before the design phase to avoid fixation on specific examples, (iv) a marketing representative was added to the participants, since the farmers' group b was built by farmers selling their vegetables to the same wholesaler.

The workshops were prepared based on **interviews from participating farmers** (Guide in Appendices B and C) with the goal (i) to analyze their farms and practices, (ii) choose the witness’s farm, (iii) prepare the intermediary object, (iv) create a first contact to engage the farmers in the design process.

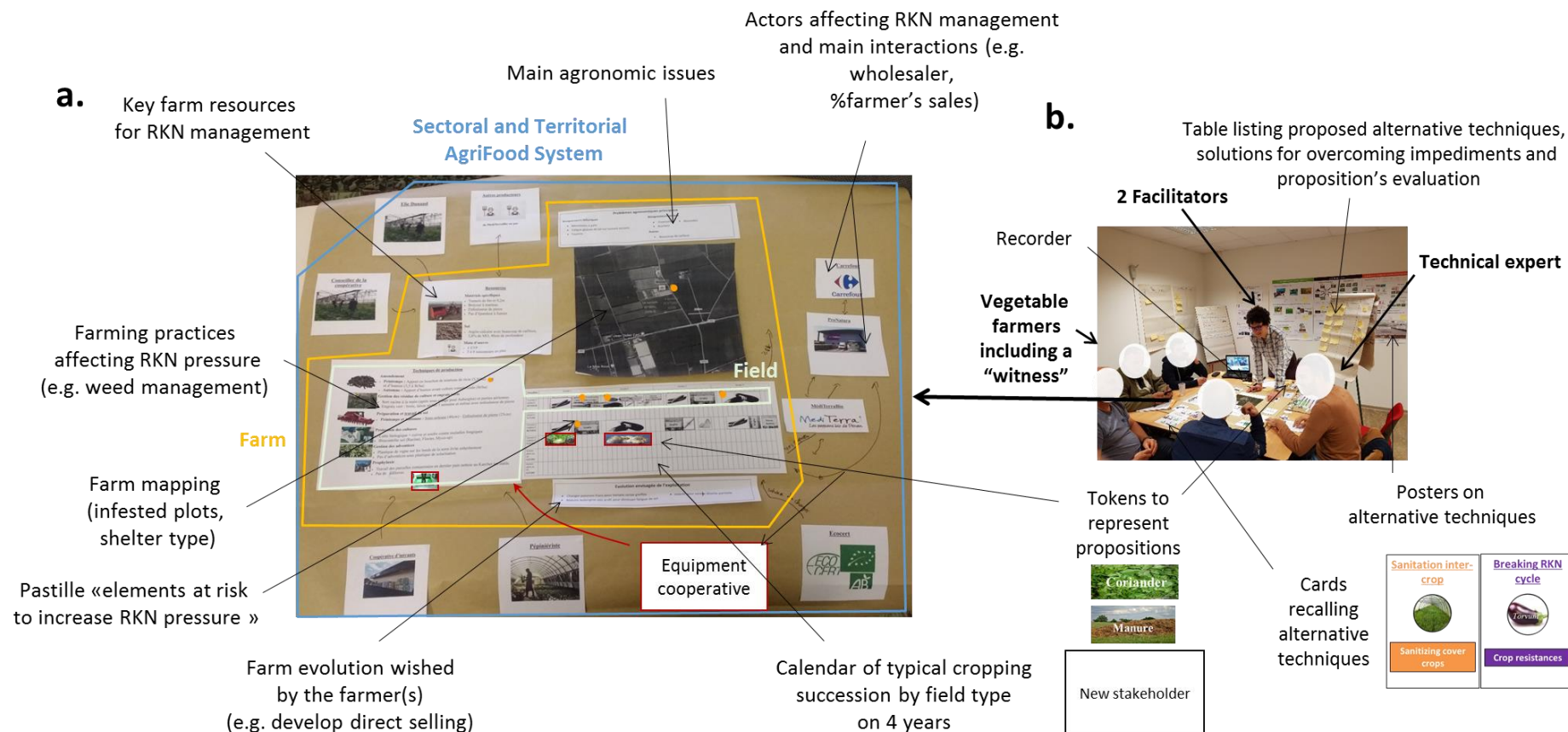


Figure 25- Intermediary objects configuration of workshops 1a and 1b. **a.** The intermediary object representing all the elements of an existing farm and its environment that influences RKN management. The three levels that can be redesigned are represented: the field, farm and STAFS level. The elements framed in red correspond to tokens added to represent the proposition of solutions **b.** Configuration of the room for the workshop. The "witness" farmer managing the represented farm presents his farm. Cards recalling the alternative techniques presented on the posters are given to each farmer. When farmers make proposals, facilitators write the pieces of solutions proposed on the board, modify the farm representation thanks to prepared or clean tokens and facilitate the discussion on the possible barriers to overcome at other levels and cost-benefit assessment of the solution by participants. The technical expert responds to farmers' questions and can intervene on the technical consistency of the redesign proposed.

2.1.2. Step 2: STAFS-centered exploration with one workshop

In step 2, we scaled up the innovation design process started to the whole STAFS level (Fig 24a).

We aimed at engaging participants in the process and empowering them by providing an understanding of the problem in a systemic dimension (multi-level, other stakeholder roles and viewpoints). The workshop combined the K-phase and C-phase of the KCP framework, similarly to step 1. It was organized in two sessions: (i) serious game and debriefing (mainly K-phase), (ii) design session (C-phase) based on a design sheet (Fig. 26).

The **K-phase** consisted of two parallel game sessions with *Soilh&Co* (Chap. 3) and a common debriefing. It aimed at preparing the design phase by fostering knowledge management, creativity and collaboration between stakeholders. The two groups playing in parallel were (i) an organic group playing the organic version of *Soilh&Co* mainly with stakeholders of the Provençal organic vegetable sectors (8 participants), (ii) a mixed group playing the conventional version of *Soilh&Co* with conventional and mixed stakeholders (9 participants). All the main stakeholder types identified in Chapter 2 were present: farmers, downstream value chain actors, upstream value chain actors and policy actors (Table 17). New large mixed and conventional farmers were invited for (i) completing the diversity of farm profiles, (ii) balancing that the three conventional farmers from step 1 (group 1 “diversified”) were unavailable.

The **design phase** was the main **C-phase** of the workshop although solutions were explored during the serious game sessions, and formalized and discussed during debriefing exchanges. After the debriefing, the two groups split for the design phase. Then, the complex coupled innovations designed were shared in a plenary session. I chose to split the participants into two groups to have a compromise between having a group small enough to manage the activities (playing the game, designing collectively) and large enough to hybridize the expertise of a maximum diversity of stakeholders in the plenary phase. The separation between organic and conventional groups enabled us to hybridize viewpoints on and experience with the organic sector and the conventional-mix sector (see 2.1.1 and Part A, section 4.3). As for step 1, these choices were still based on the hypothesis that fostering knowledge and viewpoints within a group of various stakeholders favors learning and generativity. This design phase consisted of: (i) individual ideation of solutions to facilitate RKN agroecological management collaboratively, based on the knowledge exchanged during the debriefing and on their own, (ii) sharing the ideas and placing them on the intermediary object to show which stakeholders were involved in (Fig. 26, large yellow post-it notes), (iii) exploring further 1 to 3 ideas chosen with the participants by specifying the conditions of implementation. For the individual ideation (i), the participants were asked to write down the actor(s), the action(s) and the object(s). The facilitators encouraged them to explore unrealistic ideas. When exploring the ideas further (iii), the facilitators asked the following questions to the participants: how do you implement them? Who participates in it (e.g., nurseryman, wholesaler)? What are the roles of the stakeholders, the actions they implement? How do they articulate it? How do they foster the implementation of agroecological techniques and their combinations? When possible, several ideas for solutions were combined. The developed solutions were then discussed in a plenary session.

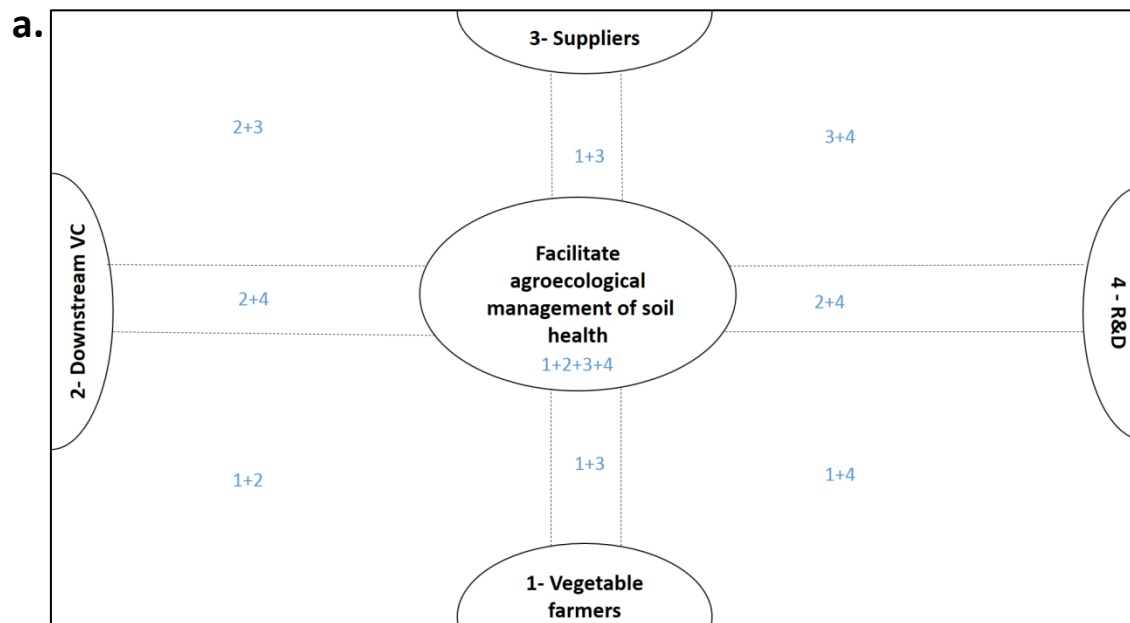


Figure 26 - Design board for solution design in step 2. **a.** The main question to collectively solve is placed in the center and the 4 main types of stakeholders are placed on the side. The solutions proposed by the stakeholders are written on a post-it note and placed depending on the main stakeholders involved in the solution (e.g., 1+2 means Vegetable farmers+ downstream value chain). Additional main stakeholders could be added (e.g., public institutions). VC= Value chain **b.** When all the solutions proposed were placed, the facilitator and participants chose 1 to 3 of them to be explored. Post-its were used to represent the solutions (light yellow), specific actors (in orange), objects, artifacts or techniques (green) and issues or needs (pink).

2.1.3. Step 3: thematic workshop of coupled innovation design

In step 3, we combined solutions coming from steps 1 and 2, from innovation tracking (Chap. 2) and new ones to design complex coupled innovations from the field to the STAFS level (Fig. 24a). We aimed at evaluating them *ex-ante*. We also aimed at empowering stakeholders for actions in real life by providing them the systemic understanding of the problem, missing knowledge, helping them to develop a relevant multi-stakeholder network and mobilizing them to participate in implementing solutions.

I invited all the stakeholders that wanted to come to the previous workshops (including the ones who could not come) and completed with stakeholders that were identified as missing when analyzing the previous workshop: regional public administration for agriculture and food, regional agriculture chamber, new amendment company (the previous one being not available) representatives (Table 17). I combined a light K phase, a C-phase and a P-phase initiation, according to the KCP framework. The **C-phase** consisted of **designing coupled innovations from field to STAFS level** that could enable the widespread implementation of agroecological RKN management by a large number of farmers in the territory. Before the workshop, based on the sociotechnical analysis (Chap. 1) and the former workshops (steps 1 and 2), I identified three key technical themes concentrating most of the barriers to agroecological RKN management: (i) fostering a widespread combination of agroecological techniques to implement agroecological RKN management, (ii) fostering a widespread implementation of crop diversification to introduce poor or non RKN-host crops in crop rotations, (iii) fostering a widespread implementation of high-quality organic amendments able to boost RKN natural enemies. Each of these themes can be considered as a complex agricultural problem by itself, yet, the first theme (item i) encompasses the two others (items ii and iii). The 14 participants (Table 17) were split into three groups, one group per theme, depending on a balance between the following factors: their interest, the expertise needed in each group and the number of persons per group (for good collective work). Each group worked in parallel, before sharing the complex coupled innovations they designed with the other groups and discussing them collectively.

The **design session** proceeding consisted of (i) setting a common medium-term goal (2030) based on an initial proposal derived from previous steps and the sociotechnical analysis (Chap. 1), (ii) presenting the main generic and specific levers to overcome the barriers for the theme under review, (iii) presenting the intermediary object that will be used (Fig. 27 et 28) and the initial solution designed in the previous workshop (step 2), (iv) building together the coupled innovations while noting in parallel knowledge gaps, problems and risks associated with the solutions proposed and their combinations, (v) evaluating together the coupled innovations at each level based on an evaluation grid, (vi) and if necessary redesigning the coupled innovations to take into account the shortcomings identified during the evaluation. This approach and the card design (Fig 27) were inspired by the *COOPPLAN* methodology (Ferrand and Abrami 2015). The generic and specific levers related to the three technical themes were identified based on the sociotechnical analysis. Generic levers (step ii) do not only target the theme under review but can have spillover effects (e.g., improve farmers' financial leeway, free them up time). Specific levers targeted barriers specific to the themes (e.g., increase equipment access to spread soil amendments, increase access to poor host varieties). The list of the

presented levers is available in Appendice J. Between steps 2 and 3, I designed 74 “solutions” cards based on the outputs of preceding workshops (step 1 and 2) and the outputs of the innovation tracking (Chap. 3) that was used to build the complex coupled innovations. New cards could be designed during the design process. To succeed in the design of consistent coupled innovations, facilitators acted as following: they asked participants what actions should be taken by 2030 to reach the goal and how they should be combined. Then they guaranteed the consistency of the coupled innovation at each level by asking questions on the relation between the solution proposed and the other levels. They used the intermediary objects (Fig. 27 and 28) to represent the complex innovations and to avoid that the participants lose their footing.

The evaluation grid (step v) was inspired by the *COOPLAN* methodology (Ferrand and Abrami 2015). It was composed of stakeholders’ evaluation criteria at each of the three levels, with specific criteria depending on the themes. There were three categories of criteria: availability of resources (not limiting, limiting or very limiting), effects expected of the complex coupled innovation (Likert scale with seven levels: -3/+3), compatibility of the complex coupled innovation with the current context (free responses). The criteria were evaluated with a qualitative appraisal from participants. The initial criteria list could be completed by participants if an important criterion was missing. I give more details on how I characterized the stakeholder’s criteria in the section 2.3.2. At the end of the design session, the facilitator asked orally the following questions: did we correct the shortcomings of the evaluation? What title for the complex coupled innovation (what does it do)? Which governance? Which risks and uncertainties? Which question do we have to other participants (other expertise) if any? How would you engage in this complex coupled innovation to implement it?

At the end of the workshop, to initiate the P-phase, I asked the participants within the evaluation survey how they think they could engage in the coupled innovations we designed and discussed in plenary (Appendice G).

N°40	Field	Farm	T&VC	Extent :
Créer un label et cahier des charges agroécologique qui inclue l'introduction de cultures mauvais hôtes "de diversification"				
Obj : Faciliter l'introduction de cultures mauvais hôtes "de diversification" en valorisant économiquement cette pratique				
Rôles acteurs porteurs : L'organisation de producteur créé un label et cahier des charges des pratiques agroécologiques, qu'il soumet à l'Etat.				
Rôles parties prenantes : L'Etat valide et contrôle ce label que les metteurs en marché valorisent auprès des consommateurs qui				
Ressources mobilisées : financement et RH publiques, temps chef d'exploitation				

N°29	Pclle	EA	T&F	Ampleur :
Conseiller de manière personnalisé les maraîchers pour un choix de leur porte-greffe adapté à l'état sanitaire de leur sol				
Obj : Faciliter l'introduction de porte-greffes mauvais hôtes dans les rotations				
Rôles acteurs porteurs : Les pépiniéristes conseillent les maraîchers sur les différents porte-greffes à disposition et leurs caractéristiques, en fonction des problèmes qu'ils connaissent du maraîcher. Ainsi ils peuvent les inciter vers plus de diversité. Ils agissent dans l'intérêt d'une relation				
Rôles parties prenantes : Les maraîchers introduisent plus régulièrement des porte-greffes mauvais hôtes ou pièges. L'aval ou un groupe de maraîcher peut inciter le pépiniériste fournissant un volume important de plants à réaliser ce conseil.				
Ressources mobilisées : confiance, connaissance réciproque				

Figure 27 - Two examples of solution cards. They provide an indication of the level of the actions described, the title, goal, role of the action carrier, role of the stakeholders, resources mobilized. An indication of the dimension that the action(s) is supposed to cover can be filled at the top (e.g., "80% of the vegetable producers" or "only the large farmers"). These cards were categorized in 5 technical themes and 5 transversal themes. The colors correspond to the theme in which the piece of solution was categorized between workshops 2 and 3. Clean cards with only the section's title were also available to create new ones.

- a. Target :** In 2030, 80% of farm contaminated with RKN limit their damages below 5% of yield loss, with combining at least 3 technical mechanisms

Title :

Gouv :

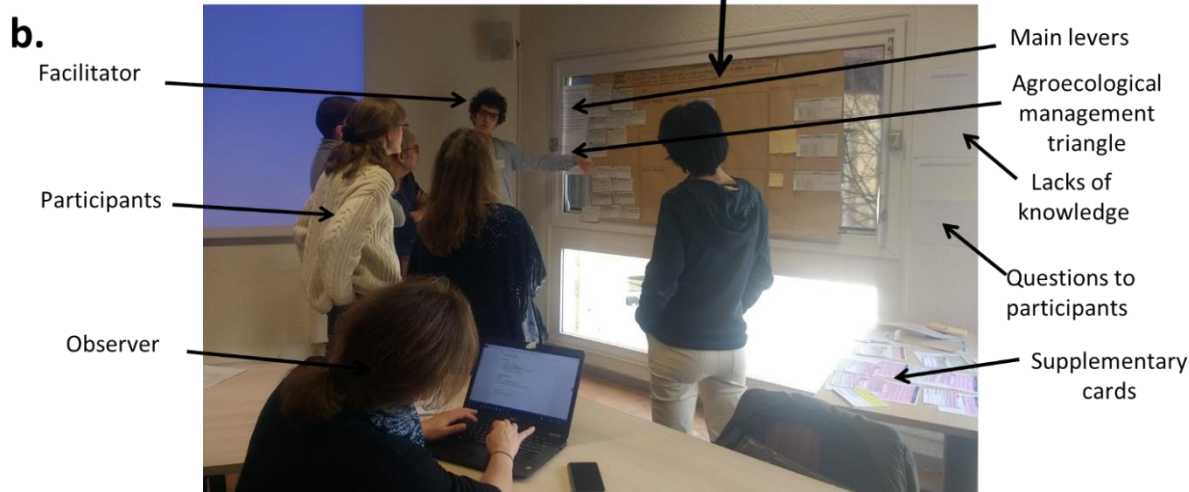
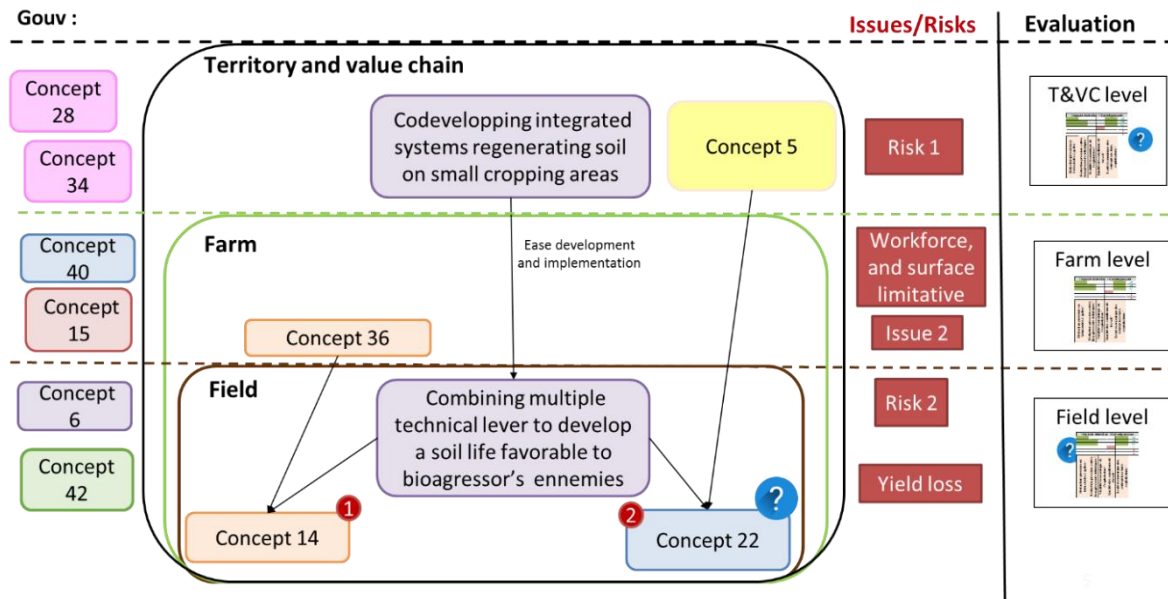


Figure 28 –Intermediary objects in step 3. **a.** Intermediary object for a shared representation of the coupled innovation(s) jointly built during the workshop. From top left to bottom right: the target of the innovations is given, the title needs to be filled by participants, as for the governance. The representation is split in the three levels that can be redesigned: STAFS (named territory and value chain for stakeholders), farm and field. Solution cards (Fig. 27) are made directly available for each level. Each card color refers to a specific theme. Cards are pinned on the board with arrows to represent the interaction between the solutions. Red numbers can be added to represent the temporal succession of the actions corresponding to the solutions. Issues and risks associated with the proposed solutions and their combinations are added in the process on the right side of the board. Evaluation is done thanks to predefined indicators at each level. Question marks represent lack of knowledge stressed during the workshop **b.** Photo of one of the groups during the design phase. Generic and specific levers for the themes and the triangle of the agroecological management of soil health is recalled at the left of the board. Lack of knowledge and questions to participants can be noted on post-it notes pinned on the right side. Supplementary “action cards” are accessible in an organized manner on the table at the right.

To conclude, the succession of the three steps, and four workshops, allow to progressively design solutions and integrate them in complex coupled solutions susceptible to solve the complex problem under study (Fig. 23).

2.2. Data collection

For each workshop, the data were collected in four ways:

- Audio recording, with the agreement of the participants
- Notes from observers and facilitators
- Photos of the session, especially of the final state of the intermediary objects that represented the solutions designed
- Workshop evaluation questionnaires (Appendice G). The questions were adapted to each step, to assess if the workshop fulfilled its goals, and how to improve it. They mainly treated three items: (i) participants learning and empowerment, (ii) workshop methodology relevance to attaining the goals, (iii) interest of the participant to stay involved in the design process.

2.3. Data analyzes

I analyzed data in three ways: (i) a comprehensive analysis of the solutions designed (2.3.1), (ii) an analysis of the design process based on the C-K theory (2.3.2) and an analysis of the evaluation criteria used by stakeholders (2.3.3).

2.3.1. Comprehensive analysis and typology of solutions

The solutions designed during the workshops were analyzed *ex-post* with a comprehensive approach to identifying their relevance, their potential complementarities or antagonisms, the questions they raise, the barriers they tackle or conversely the sociotechnical levers they mobilize.

I categorized the different solutions designed, based on two criteria: (i) the agroecological RKN management techniques concerned by the solution, (ii) the sociotechnical levers that enable to overcome barriers to agroecological RKN management (e.g., finance actions, developing knowledge), if any.

2.3.2. C-K analysis

I used the C-K theory (Hatchuel and Weil 2009) to analyze the results of the design process. This theory was presented in Part A section 3.1. Here, I give a summary. The C-K theory formalized the design process as a joint exploration of a concept space (C-space) and a knowledge space (K-space) in constant interaction. The exploration starts from a desirable unknown (C0), for us: "Provençal sheltered vegetable agrifood system managing sustainably RKN". The design process consists of four operations (Agogué et al. 2014a):

- K->C "disjunction": a knowledge set is used to add new properties to a concept and then partition it into several alternatives.
- C->K "conjunction": a new concept shed light on a new set of knowledge existing or to explore.
- C->C "partition": creating alternatives of concepts based on the properties of the initial concept
- K->K "self-expansion": of the knowledge space: developing new knowledge based on previous one through research method (e.g., deduction, optimization, modeling, evaluation)

I make a difference between three types of knowledge: known, attainable and missing knowledge. Attainable knowledge is in an ongoing process of acquisition. Missing knowledge is a set of knowledge that is currently collectively unknown. On this basis, following Agogué et al. (2014a), I distinguish three types of concepts: known (if the underlying knowledge is already available), attainable (if it is based on an attainable knowledge) and disruptive concept (if it is at least partly based on missing knowledge).

2.3.3. Evaluation criteria from stakeholders

The assessment of innovations was mainly based on stakeholders' points of view on their feasibility. During all the steps with stakeholders (surveys, workshops), every time a stakeholder stressed a problem or gave his opinion on a potential solution, I inferred an underlining evaluation criterion. For instance, a farmer citation "The problem is that it is very costly for the farmer" led to identifying the criterion "Economic balance of the farm". I listed the evaluation criteria for each level (field, farm, STAFS) categorized and prioritized them to make the evaluation grids for each of the three themes addressed in the workshop of step

3. Results

In the following results section, I consider that the implementation of the following agroecological techniques for RKN management in the cropping system is innovative, as they were very little implemented at the time of the study: introduction of poor or non RKN-host commercial crops in the rotation (except with the *Mi* gene such as common *Solanaceae* rootstocks), the introduction of service crops²⁷ as RKN trap crops, biofumigation and spreading of biological active amendments (i.e., that stimulate soil life). The names of the participants are replaced by the type of structure they represent following the stakeholder's label indicated in Table 17. In the results section, the different mono-level and simple solutions designed are summed up in tables. I will only comment on the innovative ones (attainable and disruptive concepts).

3.1. Step 1: farmers' empowerment and first exploration of concepts with a focus on the farm level

In this section, I first show that the workshops stimulated knowledge exchange between participants within the two groups (3.1.1). Then, I describe the solutions designed with the two groups (3.1.2.). Finally, I show the specificity of the concept and the knowledge exploration of these two workshops (3.1.3.).

²⁷ By "service crop" I mean a crop that is not cultivated for commercialization but to provide services to other crops (e.g., nitrogen supply, pest control)

3.1.1. Knowledge exchange on techniques, barriers and levers

The presentation of techniques and the redesign sessions of two real farm cases stimulated knowledge exchange between the facilitators (including the technical advisor) and the farmers. First, much new technical knowledge was provided by the technical expert and the posters to the farmers. For instance, when the technical expert presented the biofumigation techniques on posters, organic farmer 2 reacted: *“I did not know that”*. Conventional farmer 2 asked regarding solarization: *“do we have to use it every year?”* and organic farmer 6 showed his surprise: *“The fodder radish doublet²⁸ is a host?”*. Farmers also exchanged altogether on techniques: *“what do you use to remove the roots?”* asked organic farmer 2 to conventional farmer 1, who explained his technique using a potato harvester or a subsoiler. They also exchanged on key issues for the transfer of alfalfa biomass from the open field to the sheltered field: machinery needed, synchronicity between alfalfa cycle and rotations under shelter. And finally, facilitators and technical advisors also learned from farmers, for instance with organic farmer 8 explaining that colleagues reduced drastically their RKN pressure by using a contaminated field as a nursery for leeks or by growing leeks and working them into in the soil²⁹.

Yet, the workshops also fostered reflection on barriers, as in the common-outlet group where several farmers expressed that they do not want to use solarization because they believe it will worsen the balance of the soil ecosystem. The workshop provoked exchange around potential levers that participants did not think of: *“I would have never thought that one could accept that another farmer comes to produce radish on his farm”* said the organic farmer 1 after testimony from conventional farmer 2. Finally, we gained an important body of additional knowledge on the STAFS functioning and especially on the barriers to the implementation of agroecological RKN techniques, as for crop diversification: *“There is a commercial network that makes you wait ... if you don't produce lettuces for them”* (conventional farmer 1).

We then saw that during workshops of step 1, exchange between farmers and with facilitators was fruitful. Topics addressed were techniques (examples on the question on solarization and on root removing) at field level, organizations at farm level (alfalfa biomass transfer to sheltered fields) and STAFS functioning (commercial practices in marketing).

3.1.2. Designed solutions

In this section, I will present the solutions designed during both workshops, detailing the innovative ones and their potential combinations.

3.1.2.1. Workshop 1a with the “Diversified” group

We collectively explored solutions for Organic farmer 2's farm. I present the key elements of this farm, needed to understand the solutions proposed, in Box 1. The complete representation of the farm is available in Appendice K.

²⁸ Presented as resistant to RKN but not to the good species

²⁹ Leeks are poor or non RKN-host and have a biofumigation effect when worked into the soil

Box 1: Presentation of Organic farmer 2's farm

Surface under shelter and facilities: double-wall plastic greenhouse that can be heated to produce earlier (21000m²) and one bi-tunnel (1380m²)

Main crops: tomato, melon, cucumber, celeriac, lettuce

Minor crops: radish and green beans

RKN pressure: high pressure affecting all his crops but tomatoes

RKN management strategy: biocontrol product applications (*Larvasol*, *Racinet*, *Flocter* on cucumber), cover crops superior to one-month duration and resistant rootstock for tomatoes based on common *Mi*-gene

Other production system(s): 3ha of open fields around the farm with the rotation melon-celeriac-alfalfa

Outlets and relation with them: two marketing firms specialized in fresh organic fruits and vegetables: a wholesaler and a shipper; good trust relationship with the shipper, also commercializing biodynamic products; shipper gives technical advice

Interaction with other farmers: collaboration with neighbors (e.g., tool exchange)

➤ **Mono-level solutions and simple coupled innovations**

When contributing to solutions design on this farm, the farmers collectively imagined 15 solutions (Table 18) that could be combined in one complex coupled innovation. **They proposed four types of solutions: 6 field-level solutions, 1 farm-level solution, 6 farm-level coupled innovations and 2 STAFS-level coupled innovations. Among them, 7 were attainable concepts and 3 were disruptive (Table 18).** The field-level solutions were changes in farming practices that were compatible with the current farm organization and the relation between the farm and the STAFS level (n°1-6 in Table 18). For instance, participants proposed a long soil flooding to asphyxiate RKN (n°4), replacing plastic mulching with straw or dry alfalfa to favor a soil life balance detrimental to RKN (n°5) and mixed cropping of tomatoes and garlic which exude nematicidal components (n°6). The farm-level solution proposed consisted of moving the shelter to restart in uncontaminated soil (n°7). The farm-level coupled innovations consisted of five innovative combinations of changes in production systems in terms of sheltered surface increase, biomass mobilization of new or existing crops for use as amendments, and changes in sheltered cropping systems in terms respectively of poor host introduction and amendment practices (Table 18). For instance, participants proposed to use the existing alfalfa cropping to produce a biologically active amendment for sheltered crops, either worked into the soil (n°9) or used as mulch (n°10). They also proposed to introduce garlic and use its residues as an amendment with nematicidal properties (n°12). The STAFS-level coupled innovations consisted of combining organizational innovation at STAFS level with the introduction of minor poor host or resistant crops at the cropping system level. For instance, participants suggested exchanging fields with another farmer producing a minor crop that is a poor or non-host for RKN to introduce it in organic farmer 2's rotation (n°15).

➤ Joint exploration of knowledge and concepts of solution

During the workshop, the solutions were designed based on a set of knowledge that could be explicit or implicit. When formulated, other farmers, technical advisors or facilitators reacted to the solution concepts by mobilizing new knowledge sets and shedding light on knowledge gaps. These interactions between knowledge and concepts are displayed in Table 18. These interactions, in the C-K theory, correspond respectively to disjunction (K-> C) and conjunction (C->K) operations. Here I will detail these interactions based on the example N°14 (Table 18). During the design phase, participants mentioned: (i) the interest to introduce minor crops that are resistant or poor hosts, such as garlic, to reduce RKN pressure (facilitator) and (ii) that outlets exist for minor crops but are easily saturated by few producers (organic farmers 1 and 2). Indeed, organic farmer 2 could not introduce garlic because his shipper told him he already has a supplier for it. Following this, organic farmer 1 suggested exchanging the production of a minor crop with another farmer who had it planned with the shipper (concept n°15). This would overcome the lack of an outlet. Participants expressed that this solution raises several problems: (i) Provençal vegetable farmers do not easily abandon volumes they are used to supply to their marketing firm (organic farmer 1 and 2); (ii) the area for different crops do not easily match, *“when one produces tomatoes on 5000m², one needs to produce eggplant on 300m²”* (organic farmer 2); (iii) low level of willingness of the conventional marketing firms to adapt volumes and product portfolio according to farmers’ needs and wishes *“they tell you that you are a number for cucumber, tomato, lettuce, the rest they do not care, as long as they have what they want every day”* (conventional farmer 1); (iv) problems with relations between marketing firms and farmers increasing more and more in the organic sector, *“the organic sector is at the doorstep of this”* (organic farmer 1). This new concept (n°15) then opens a set of knowledge on the way how to build organizations that facilitate the exchange of crop planning for the management of crop health, and on the way to motivate farmers to exchange as well as the marketing firm to accompany it. This accounts for the conventional as well as for the organic sector. In other examples, farmers directly proposed personal experiences, e.g., garlic residues mixed into other amendment substances and sheltered field exchange had been experimented by conventional farmer 2. Finally, several ideas seemed strongly influenced by examples of tracked innovations, provided as a workshop input to inspire participants, e.g., plot exchange (n°15), auto-production of biomass to use as an amendment (n°9-11).

Table 18 - Solutions and linked knowledge designed during workshop 1 by the diversified group. The knowledge on techniques (e.g., how to implement techniques, combine them, resulting effectiveness) was systematically mobilized, then it is not indicated in this Table, except for specific pieces of knowledge mobilized during the workshop. Color code: known concept in black, attainable concept in blue and disruptive concept in purple.

	Solutions concept	Knowledge
Field-level only solutions	1- Introduce solarization in a bi-tunnel cropping system	Mobilized: Double-walled greenhouse does not allow enough radiation to reach the soil for effective solarization. Biodynamic certification <i>Demeter</i> does not allow solarization practice. Questioned: how to plan cropping systems by taking into account heterogeneity of field characteristics, and diversity of specifications depending on the outlets.
	2- One short sorghum+ biofumigation or a long millet crop after tomato crops	Mobilized: Long cover crops can multiply RKN. Short cover crops as three weeks Sorghum trap RKN. Millet is poor host of RKN.
	3- Two short sorghum crops after melon crops	Questioned: Is biofumigation possible with short Sorghum cover crops? In particular, is there enough biomass? Effect of long millet cropping on RKN populations.
	4- Soil inundation	Mobilized: Farmers' sheltered fields were willingly or unwillingly flooded and had no more RKN issues. Questioned: impact on soil quality unclear (e.g., compaction, durable shift of biological communities). Optimization of the practice, potentially through biological soil disinfestation?
	5- Use straw or dry alfalfa as mulch instead of plastic mulch	Mobilized: Little digested amendments can boost RKN natural enemies Questioned: Impact on RKN, soil, crops and on other cropping operations
	6- Association of garlic in the row of tomatoes	Mobilized: Alliaceous plant species release root exudates that are detrimental to RKN Questioned: Impact on RKN, soil, crops and on other cropping operations
Farm-level only solution	7- Move shelters and restart cropping with fresh uncontaminated soil	Mobilized: RKN have low lateral mobility. They are brought by soil machinery or boots and are maintained by intensive cropping of receptive crops. Moving shelters to former uncontaminated open field plots should allow restarting cropping with a 0 RKN pressure level. Questioned: Material and economic feasibility. Effectiveness of this practice combined with prophylaxis on RKN pressure
Farm-level coupled innovations	8- Increase surface under shelter + introduce poor host or resistant crops	Mobilized: Farms with a limited surface under shelter need to produce intensively in order to stay viable. Questioned: Economic feasibility: shelters are very expensive
	9- Harvest in open field alfalfa + spread it fresh under shelter and work it into the soil	

	10- Harvest in open field alfalfa and dry in bale + use it as mulch	Mobilized: See concept 5-, difficulties to find high-quality ³⁰ amendment sources Questioned: See concept 5- + how to pay off specific equipment (mower, rake and round baler). How to spread fresh alfalfa under the greenhouse? Which benefits compared to buying commercial amendment? Literature on carry-and-cut fertilizer. How to organize the operation at the farm level (e.g., synchronization between alfalfa mowing and amendment spreading operation for alfalfa)?
	11- Introduce cereals and straw in open field + use it as a mulch	
	12- Introduce garlic in the cropping system instead of celeriac or early lettuce + use garlic sorted out mixed with amendments (e.g., compost) as a RKN fumigation-repellant agent	Mobilized: Garlic extract limits RKN activity and garlic residues release toxic gas for RKN when it decomposes. Questioned: Impact on RKN, soil, crops and on other cropping operations
	13- Divert the use of a potato harvester (potentially lent by a neighbor) or subsoiler + to ease the exportation of contaminated roots	Mobilized: Exporting contaminated roots should limit RKN population build-up. Experience of conventional farmer 2. Questioned:
STAFS-level coupled innovations	14- Negotiate product planning exchange with other suppliers of the marketing firm + introduce poor host or resistant crops in the cropping system	Mobilized: Outlets for minor crops that are poor hosts or resistant are easily saturated by few producers Questioned: How to motivate the other supplier to adapt his production? How to coordinate production exchange between farmers producing different quantities and with different field surfaces? How to make the marketing firm facilitate the exchange?
	15- Exchanging shelter fields with another farmer + introduce poor host or resistant crop in the cropping rotation	Mobilized: Exchange fields between farmers to diversify production is done in open field systems in a certain region and is experienced by conventional farmer 1. Outlets for minor crops are lacking. Questioned: How to build trust between two farmers? Limits for organic producers that tend to be further from each other? How to make it simple, especially when the shelter facilities are different? How to avoid cross-contamination?

³⁰ In my work, high-quality amendment refers to biologically active amendment suppressing RKN and other soil borne pests and diseases, without detrimental effect on crop growth after a reasonable buffer period for degradation and that does not contaminate soil with pollutants

➤ Complex coupled innovations

All designed solutions (Table 18) could be combined on the farm of organic farmer 2 within one complex coupled innovation, with potentially a choice to be made between the solution n°10 and 11, both with organic mulching. During the workshop, we did not identify any issues with the combination of the different solutions. Yet, I want to stress the most interesting interactions. Concept n°14 (negotiate product planning exchange) could facilitate the implementation of concept n°12 (introduction of garlic crops + use of their crop residues as an amendment). Concept n°12 could also be combined with concept n°6 (garlic in rows of tomatoes). Moving shelters to restart on uncontaminated soil (n°7) could be done at the start of the growing season and combined with prophylactic techniques to avoid recontamination as well as with amendment input to build a resilient soil ecosystem. If n°7 is not achieved (costly), we see that the combination of the other solutions would allow implementing a combination of 6 agroecological techniques for RKN management: solarization (n°1), trap cover crop (n°2-3), biofumigation (N°2, 12), green manure (n°2-3), biologically active amendment (n°5, 9-12), exporting infected roots (prophylaxis, n°13), introducing a minor crop which is a resistant or poor host (n°8, 12, 14-15). This combination mobilizes the three key mechanisms to manage RKN: destroying present individuals, stimulating in-soil competition, prevention the reproduction and the spreading of pests and diseases (See Fig. 12, chap 1). We could then expect that it allows to effectively manage RKN. Yet, as shown in the “knowledge questioned” in Table 18, many knowledge gaps would need to be filled to refine and implement this complex coupled innovation, both on the level of techniques (e.g., inundation, straw mulch) as well as on the level of organization (e.g., solution n°14, organization enabling production planning exchange to facilitate crop health issue management).

3.1.2.2. Workshop 1b with the “Common outlet” group

In workshop 1b with the organic farmer group having a common wholesaler, we collectively explored solutions’ concepts for Organic farmer 6’s farm. I present the key elements of this farm, required to understand the solutions proposed, in Box 2. The whole representation of the farm is available in Appendice K In this section, I only detail the main novel solutions designed compared to the first one (3.1.2.2).

Box 2 - Presentation of Organic farmer 6’s farm
Surface under shelter and facilities: 1.3ha of tunnels with a block of 0.3ha RKN-free (recently installed) Main crops: only summer crops: Eggplant, cucumber, strawberry, bell pepper, in summer Minor crops: none in summer (kohlrabi, pointed head cabbage, chard in winter before stopping) RKN pressure: Moderate pressure with 20% loss on cucumber RKN management strategy: Resistant rootstock on eggplant (<i>Mi</i> gene), poor host crop (strawberries) various cover crops the whole winter (sorgo, radish, mustard) tilled in the soil as green manure, solarization, export and burn roots with knots, till first the RKN-free plots then the contaminated plot and clean tools with water, Other production systems: none Outlets: 100% of his production goes to the organic wholesaler through producer organization Interaction with other farmers: other farmers from the same producer organization, neighbor

➤ Mono-level solutions and simple coupled innovations

When contributing to solution design, the farmers imagined 13 solutions: **4 field-level solutions, 2 farm-level solutions, 2 farm-level coupled innovations and 5 STAFS-level coupled innovations** (Table in Appendice L). **Among the 13 concepts, 5 were attainable and 1 disruptive.** As for the first group, participants also proposed farming practice changes compatible with the current farm organization (n°16-20). Participants proposed to introduce a multi-year poor or non RKN-host crop in order to break the RKN cycle for a long duration (n°18). As farm-level solutions, they proposed to change farm infrastructure in order to make prophylactic boot disinfection systematic (n°20). They also proposed to adapt cropping systems depending on the RKN-status of the field: early lettuce production on RKN-free fields and late lettuce production on contaminated ones³¹ (n°21). They proposed two farm-level coupled innovations combining changes at the cropping system level, for instance the introduction of a biologically active amendment (ramial chipped wood) and the use of farm resources to produce it (invasive giant canes present on the farm) (n°23). Finally, as STAFS-level coupled innovations, participants suggested that the introduction of a multi-year poor or non RKN-host crop such as asparagus could be coupled with developing direct selling for the commercialization of this minor crop (n°26). Besides, from the exchange on boot disinfection arose a disruptive concept: developing a shoe with an embedded system that disinfects it regularly and using it on the farm to avoid cross-contamination between fields (n°28).

➤ Complex coupled innovations

In this group, the participants agreed on the compatibility of all the solutions designed by considering as alternative options: the increase of strawberry production (n°19), the introduction of *S. Torvum* (n°16) and the introduction of long cover crop production during summer (n°22). Indeed, the introduction of those three solutions in the same cropping system is incompatible because of two constraints: (i) the overlap of production periods and (ii) the lack of farm profitability if combined. Also, solutions n°20 and 28 are alternatives, as well as n°24, 25 and 26, as they concern respectively the same barriers: no centralized place to access RKN-free plots, which make it difficult to disinfect systematically boots and lack of equipment to spread bulk amendment. Considering this, the participants agreed that the different solutions proposed should be combined to effectively manage RKN. As for the diversified group, we expect effective management if the three mechanisms of RKN management would be combined in the new cropping system.

3.1.3. Concepts and knowledge spaces exploration

In the first two workshops, most of the solutions designed were at field or farm level which is consistent with the focus of this step on the exploration from the farm perspective. The participants proposed innovative solutions but mainly within the current fixations. For instance, most solutions proposed were not requiring cooperation between the “witness” farmer and other stakeholders, despite examples given from tracking of innovations. The solutions proposed were mainly related to knowledge provided by the technical presentation and examples from the innovation tracking at the

³¹ RKN are inactive during the winter period, generally from mid-October to end of February. Early salad is planted before mid-October.

farm-level (amendment auto-production, moveable shelter). The solutions based on cooperation were in majority quickly rejected by farmers. This highlights the fixation among farmers that collaboration is not possible between farming actors in Provence. As a result, only a few disruptive concepts were proposed. Yet, the workshop participants explored beyond the fixation of considering soil only as a growing medium and looked for soil ecosystem management (e.g., diversifying crop rotations, bringing digestible amendments). New sets of knowledge were opened with knowledge provided by participants (e.g., farmers' experience), and interrogations rising from the discussion of the concepts proposed (e.g., sheltered structure, the biology of *Arundo donax*). Regarding these, specific knowledge was required:

- (i) on technical aspects: RKN-soil-plant biology, agroecological techniques, soil functioning, boots and sole engineering, shelter structures
- (ii) on organizational aspect: how to organize solutions at farm level, how to organize cooperation between farmers and with marketing firms

See Appendix M for two C-K diagrams representing the C-K exploration for workshops 1a and 1b.

3.2. Step 2: codesigning of solutions based on the serious game experience with a focus on the STAFS level

Step 2 was subdivided into 2 phases: 1. game session with *Soilh&co* and 2. design phase. I showed in chapter 3 that the serious game *Soilh&co* enabled (i) sharing and discussing the sociotechnical analysis and (ii) preparing the solutions' design by fostering joint knowledge management, creativity and collaboration of participants. In this section, I show the outcomes of this workshop in terms of solutions and complex coupled innovation design. I show how they facilitate agroecological RKN management and how different knowledge sets were used and questioned during the design process. I do not detail the knowledge gap identified in step 2. I come back to step 2's knowledge gaps in the discussion (section 4.1).

3.2.1. Designed solutions

During the workshop of step 2, participants designed solutions at several phases of the workshop: (i) during the game session when confronted with virtual challenges, and then during the debriefing when reflecting on it, (ii) during the design phase when proposing, discussing and describing the proposed ideas. The different solutions are summed up in Tables 19 (STAFS-level coupled innovations) and 20 (Field-level solutions). In the following sections, the numbers in parentheses refer to the solutions presented in Tables 19 and 20 which are described in detail in Appendice N.

➤ Simple coupled innovations designed and knowledge produced during the game session and the debriefing

During the game, participants stepped out of the initial game configuration to find innovative solutions to the barriers they faced. **They developed two types of coupled innovations: services between farmers (J2, J3, J6) and collaborations between farmers and marketing organizations (J1, J4, J5)** (Table 19). In the mixed group, a player of a knowledgeable farmer provided knowledge on

agroecological techniques (biofumigation, minor crop introduction) to another one against payment (J3), so that he could implement those techniques. In the same group, a player of a large farmer specialized in fennel, shared the costs from losses of products with a smaller farmer producing the same crop when the market was saturated (J2), enabling good coordination to maintain the production of this poor host crop by smaller producers. In the organic group, the wholesaler gave a loan to a farmer to allow her to invest in two devices: a radish seeder and a scallion's bundling machine, in exchange for her fidelity in the provision of her production (J4).

During the debriefing, these solutions initiated knowledge exchange based on their comparison with the perception of reality from various actors. This process allowed us to specify how solutions could be implemented. For instance, when the mixed marketing firm mentioned the solution n°J2, the first reaction of the farmers was *"it does not exist in reality"*. Yet, organic farmer 8 gave an example to show that it was not that unrealistic: a large farmer selling millions of lettuces to a major supermarket started to buy lettuces from his smaller neighbors to resolve tensions around him because he had saturated the market. Discussions revealed that production planning between farmers and marketing firms is not commonly done in Provence. This lack of coordination explained part of production losses during the game but also in reality. **It was consequently identified as a serious option for better managing poor or non RKN-host crop production and marketing. This idea was developed in the design phase.**

➤ **Mono-level solutions and simple coupled innovations designed during the design phase**

In total, 30 concepts of solutions were proposed during the design phase, 8 by the mixed group and 22 by the organic group. 26 STAFS-level coupled innovations were designed where 8 were considered as attainable and 12 as disruptive, based on the related knowledge set. Besides, 4 field solution concepts were proposed, where 1 was considered as attainable and 2 as disruptive. I classified the solutions in Table 19 depending on (i) the concerned technique: introduction of poor or non RKN-host commercial crop (7 solutions), introduction of service crops (3), spreading of high-quality amendment and soil stimulants (2), prophylaxis (1), multiple techniques and their combination (17), (ii) the sociotechnical levers they mobilize: knowledge diffusion (8 solutions), knowledge and method development (4), action financing (6), stakeholder cooperation to facilitate access to resources (9), paid services to provide access to resources (2) and no sociotechnical levers (4). When proposing solutions, participants expressed that they referred to their own knowledge, to knowledge acquired during the game and during the debriefing (Chap. 3).

Solutions for the introduction of **poor or non RKN-host commercial** crops focused on stakeholder cooperation. Participants proposed farmers' cooperation to develop new outlets for minor crops that are poor or non RKN-host (n°1, 1bis, 11). They suggested that the cooperation would favor the allocation of these minor crops to farmers with soil health issues. Later, participants proposed cooperation with input providers and marketing firms to ensure development, distribution and farmers' knowledge access to poor and non RKN-host crops, especially of rootstocks adapted to their needs (n°17, 29, 29bis). For instance, they proposed to trigger adaptation of nurseries to their needs by developing grouped ordering of plantlets in order to have these plantlets made with the cultivar

and rootstocks requested for an agroecological RKN management (n°29bis). It would be coupled with the introduction of commercial poor or non RKN-host crops. One solution based on knowledge diffusion was also proposed: communication campaigns from marketing firms towards consumers exposing the value for them (e.g., health) and for the soil by buying and eating more minor crops that are poor or non RKN-hosts (n°10).

The solutions proposed specifically for **service crop introduction** were mainly at the field level: developing a service crop to feed the soil with a high biomass production that is also marketable, in partnership with downstream value chain actors (n°18); recreate a balanced soil ecosystem with regenerative plants (n°4); and growing a RKN-suppressive cover crop on the walking path normally bare or with a plastic cover (n°25). The **action financing solutions** n°7, 8, 30 and 30bis, aimed to compensate farmers for practices that impose non-productive periods on their shelter fields. In that sense, these solutions are particularly adapted to the implementation of service crops, although they could also help to introduce other techniques (e.g., solarization, spreading of massive amounts of amendments). Several sources of financing were imagined: existing territorial development budgets (n°8&10), a new ecotax on vegetables (n°7) and the mobilization of the downstream value chain margins (n°30bis). The willingness of consumers to pay more and the monetization of soil quality could also give more economic leeway to farmers to implement agroecological practices (n°9&31).

Participants proposed specific solutions for the **spreading of high-quality amendment and soil stimulants**, and for **prophylaxis** that was already known and operational (Tables 19 and 20).

Participants proposed numerous solutions to mobilize more generic levers for the implementation of several techniques and their combinations. Near half of them related to **dissemination of knowledge** towards farmers (n°26, 27, 31), towards farmers and advisors (n°22) and towards all stakeholders (n°6, 14 19, 20). The last four are the most disruptive considering the fixation that value chain stakeholders focus on the commercial aspect and do currently not take into account farmers' needs, constraints and options (section 2.1). The last four solutions consist in disseminating information to all stakeholders of the value chain (including consumers) on the challenges of farmers regarding soil health, the agroecological practices needed to manage them and what it means regarding input and commercialization. The stakeholders should be accompanied to bring down resistance to change and to develop tools for change. Regarding dissemination towards farmers, two solutions were proposed: the public R&D advisors visit all farms to inform them in a personalized manner on agroecological soil management, whereas currently a large share of farmers are only advised by input suppliers (n°27). Another proposal was to monetize soil quality in field transactions, including soil health (n°31). It could serve as a basis to make farmers realize their soil status and its importance. This last solution is disruptive, as no reliable method so far enables to give such an evaluation. Participants also proposed to develop a soil health diagnostic methodology accessible to and applicable by farmers. The organic marketing firm representative made the hypothesis that it would motivate farmers to change practices and invest time and money in soil quality (n°28). With this last proposition and n°23, 24, participants stressed the need to **develop more knowledge (see 3.4.) and methods**.

Finally, participants proposed two solutions based on **stakeholder cooperation to facilitate access to resources**. The first one is the creation of a cooperative for equipment sharing for vegetable farmers

in Provence (n°12, organic technical advisor) that would facilitate access to specific machinery currently lacking such as manure spreaders. The second idea is to establish a multi-stakeholder network around a common plan for “healthy soils” and communicate around it (n°14). The involvement of marketing firms and input suppliers would help to open or adapt outlets to the production following agroecological principles and would improve accessibility to the required inputs for farmers? It could also finance and stimulate networks of R&D-pioneer farmers. The techniques concerned are mainly based on soil amendments and stimulants but also involve the introduction of poor or non RKN-host commercial and service crops.

Table 19 –STAFS-level coupled innovations designed during Workshop 2. The STAFS-level coupled innovations are represented by the coordination of the implementation of new agroecological techniques (1st column) and of the STAFS-level solution facilitated it (2nd column, except gray cells). The 3rd column indicates the sociotechnical levers that are mobilized in those coupled innovations. The numbers refer to the solution concepts in the text and in the Appendix N where more details are given on each solution from the design phase. Solutions from the game session are indicated by the letter J followed by a number. The group that designed the solution is indicated in brackets: G1 for the “mixed group” and G2 for the “organic group”. Numbers appear twice when the solutions can be related to multiple categories. The novelty in each of the attainable (blue) and disruptive (purple) solutions is indicated **in bold**.

STAFS-level coupled innovations		Sociotechnical levers mobilized
New agroecological techniques implemented	STAFS-level solutions	
Introduction of poor or non RKN-host commercial crop	10- Downstream value chain communicates to consumers the benefits of a diet with a diversity of vegetables (health, environment) and especially the minor crops (+ ancient species and varieties) to open outlets for them, facilitating crop diversification (G2)	Knowledge dissemination
	1&11- Farmers pool minor crop products marketing (G2&G1) ; 1bis- Collaboration between producers with and without RKN issues to access the market for minor crops (G1) ; 17- Coordinate a cluster of R&D, upstream, production and downstream to develop resistant major commercial crops with resistance to nematodes that the upstream can deliver, the producer cultivates and the downstream buys and retails (G2) ; 29- Nurseries accompany farmers on the varieties choices, especially of rootstock, to adapt their crops to RKN issues (G2) 29bis- Farmers group plantlets orders with or without the support of their marketing firm, to foster nursery production and distribution of rootstock adapted to RKN issues (G2) J1- Producers regroup and organize production of minor crops to better commercialize it, mutualizing losses of the season if the market is saturated (G1); J2- A large producer specialized in a minor crop shares the losses with a smaller producer if the market is saturated (G1) ;	Stakeholder cooperation to facilitate access to resources

	J4- Marketing firm gives a loan to farmers to allow them to invest in productive resources (e.g., radish seeder, scallions' bundling machine) in exchange for fidelity for providing production (G2)	
Introduction of service crop	18- Developing with downstream value chain actors cover crops with commercial outlets in sheltered vegetable production as for sorghum in the open field (G2)	Stakeholder cooperation to facilitate access to resources
Spreading of high-quality amendment and soil stimulant	16- R&D develops more knowledge on amendments and fertilizers' effect on RKN antagonists (G2)	Knowledge and method development
	J4 (see above); J5- Wholesaler pays technical service (e.g., manure spreading) for farmers (G1)	Stakeholder cooperation to facilitate access to resources
	J6- Service between a farmer with specialized machinery (manure spreader) to another one without. (G1)	Paid services to provide access to resources
Several agroecological techniques for RKN management and their combinations	6- R&D lists the different technical approaches to manage soil health and sensitize all stakeholders of the value chain (including consumers) to the challenges and the solutions of agroecological management of soil health, so they can adapt their actions to promote the implementation of those practices (G1) 19- Sensitize stakeholders for the reasons for the need for change, bring down resistance to change and develop infrastructure for the changes (G2) 20- Develop competencies in the value chain thanks to R&D with sensitizing to soil health challenges , training to increase knowledge and skills required for change, lead concrete experiments and disseminate experiments' results (G2) 22- Technical institutes develop a website with all the knowledge on RKN management (G2)	Knowledge dissemination

	26- Diffuse knowledge towards farmers on integrated agroecological soil health management considering other bioagressors³² than RKN (G2) 27- R&D visits systematically all farms to inform them on soil health management techniques adapted to their system (G2) 31- Monetize soil quality in field transactions (including soil health-organic matter percentage, pest and disease pressure) (G2) J3- One farmer sells his knowledge on techniques for agroecological soil health management to another vegetable farmer in Provence (G1)	
	J3 (see above)	Paid services to provide access to resources
	23- Develop fundamental knowledge on bioagressor-soil life-crop interactions 24- Develop more K on the effectiveness of agroecological techniques and their combinations on RKN 28- R&D develop a method of soil diagnosis that the farmers can easily implement themselves to realize the soil health status of their soil and implement adapted practices (G2)	Knowledge and method development
	7- Ecotax on vegetables to help producers invest in agroecological techniques for soil health management (G1) ; 8&30- Use state, region, territorial collectivities' subsidies to help farmers implement agroecological techniques for soil health management, e.g., compensate for farmers' production losses when farmers implement non-productive techniques for agroecological soil health management (as cultivated fallow), time for learning (G1&G2) 9- Consumers accept to pay more to get agroecological products (G1); 30bis- Downstream value chain compensates for farmers' production losses when farmers implement non-productive techniques for agroecological soil health management (e.g., cultivated fallow) (G2) 31 (see above)	Action financing

³² Bioagressor regroupes pests, diseases and weeds

	12- Create cooperatives of equipment for vegetable farmers in Provence, guaranteeing tool cleaning (G2) 14- Develop a soil regeneration plan (5-7 years) at the level of the vegetable farming sector in Provence , including input production, distribution, knowledge production and dissemination, to increase soil organic matter and improve soil life in the producers' soils. Support this by an improved valorization of production downstream (G2)	Stakeholder cooperation to facilitate access to resources

Table 20 – Field-level solutions designed during Workshop 2. *The numbers refer to the solution concepts in the text and in the Appendice N where more details are given on each solution from the design phase. The group that designed the solution is indicated in brackets: G1 for the “mixed group” and G2 for the “organic group”. The novelty in each of the attainable (blue) and disruptive (purple) solutions is indicated **in bold**.*

New agroecological techniques implemented	Field-level solutions
Introduction of service crop	4- Farmers regenerate soil ecosystem with regenerative plants (G1) 25- Farmers grow cover crops decreasing RKN pressure on the sheltered fields' walking path (G2)
Spreading of high-quality amendments and soil stimulants	5- Organic fertilizers are extracted, then used by farmers instead of mineral ones (G1)
Prophylaxis	13- Clean tools systematically to avoid transmission of RKN (G2)

3.2.2. The exploration of concepts and knowledge spaces

Compared to step 1, in the exploration phase mainly STAFS-level coupled innovations were developed, which is consistent with the focus of the workshop on an exploration from a STAFS perspective and goes beyond the fixation around designing solutions only at field and farm levels. Besides, many concepts were explored beyond the “non-cooperation” fixation (2.1). Coupled innovations were explored in cooperation between farmers, with the upstream value chain, the downstream value chain, policymakers or implementers and between all those stakeholders together. Besides, innovations were suggested to enable the implementation of more costly practices, going beyond the fixation considering production for the mass market as the only option (2.1). As a result, we designed a high variety of concepts of coupled innovations (Table 19). Besides, the proposed concepts opened new sets of knowledge. For instance, monetizing soil health (n°31) and considering non-productive agroecological techniques as investments (n°7, 8, 30, 30bis) opened new sets of knowledge on the criteria and methods to evaluate soil health. A set of knowledge on collective public good management and cooperation was opened by the concepts of training all stakeholders on-farm sustainability issues as well as sharing an action program and developing infrastructure for sustainable vegetable production and marketing (n°1, 1bis, 6, 12, 29bis, 11, 14, 17, 18 19, 20, 29).

Regarding the differences between the two groups, fewer solutions outside of the initial game configuration were proposed in the organic group. It is likely related to the fact that an alternative and cooperative outlet was already present, the barriers to agroecological RKN management were less strong than in the mixed group, and the time limits were more respected in the organic group. For instance, the regional policy implementer stressed that the time limit in the game prevented her developing collaborative solutions during the session. **Conversely, the organic group proposed more than twice more ideas than the mixed one during the design session.** They developed the service branch much more, especially services around knowledge. They also developed more ideas on the cooperation between farmers and between all stakeholders. This could be related to the fact that the organic group was more numerous (8 against 6 participants).

See Appendix O for a C-K diagram representing the C-K exploration for workshops 1a and 1b.

3.2.3. Towards complex coupled innovation to unlock agroecological RKN management

At the end of the design phase, the participants designed four complex coupled innovations, i.e., coupled innovations combining multiple solutions at different levels to tackle a large part of the whole complex problem (Fig. 23). They addressed part of the lock-in identified in Chapter 1. We designed three complex coupled innovations in the group of mixed stakeholders and one in the group of organic stakeholders. We started from sometimes

unrealistic solutions presented above and designed solutions that participants could see implemented in a near future. I detail the complex coupled innovations in the following sections.

➤ **Multi-stakeholder coordination around a label for minor crop introduction (Group mixed)**

The complex coupled innovation of multi-stakeholder coordination around a label favoring the introduction of minor crops arose from the development of the solutions n°1 and 1bis. It aims at facilitating the introduction of minor poor or non RKN-host crops at the Provençal level, by coordinating farmers and policymakers with a marketing organization. The principle is as follows:

The market gardeners, with and without soil health issues, mutualize the production of minor poor or non RKN-host crops via the marketing firm, a cooperative, an agricultural development group or a producer organization (PO). Such a collective organization makes it possible to organize the production and group limited yields per farmer in order to improve access to the market (n°1, 1bis). In the case of the PO, the vegetable farmers establish the initiative: the PO plans the crops on all the farms respecting an agro-ecological specification chart leading to a public label that the PO creates (n°S1). The annual planning takes issues regarding soil health into account. It can be adjusted over years according to the evolution of the bioagressor pressure. It is done with the agreement of producers and the technical support of a technician or advisor (R&D). A state-accredited organization validates and controls the label. The marketing firm valorizes it (n°S1) with consumers who agree to pay a higher price (n°9). Public subsidies support the PO through funding via operational programs (n°8). The PO and State's institutions communicate on the advantages of healthy soil (lower damages from soil-born pests and diseases, less CO₂ emission) based on an R&D program studying it (n°S2 or 6). Vegetable farmers without soil health problems help those with problems (e.g., by adapting the crop plant species they produce), while receiving support from the PO on other aspects or at other times (e.g., if they later face soil health problems) (n°1bis). The PO facilitates the pooling of surfaces between its members in order to increase the surface of rotation (n°S3) thanks to a profit-sharing contract. Input suppliers (including nurseries) adapt their offer to the demands of sheltered vegetable farmers.

Participants highlighted several challenges for this complex coupled innovation: (i) organizational complexity of taking into account issues of soil health in crop planning, (ii) gaining the willingness of consumers to pay for soil health, through a new label for consumers, (iii) gaining the support of public institution for a new label as private ones were considered as less reliable, and guaranteeing the reliability of certification, (iv) avoiding contamination when pooling surfaces, (vii) satisfying producers economically so that they stay in the organization.

➤ **Development of soil regenerating cropping systems within a R&D-farmers tight network (Group mixed)**

This complex coupled innovation focused on soil regenerating cropping systems arose from the development of the solution n°4. It aims at fostering the development and implementation

of cropping systems creating and maintaining a balanced soil ecosystem. The principle is as follows:

R&D develops simple, fast and inexpensive soil regeneration practices (permanent cover cropping, e.g., with legumes, green manure/regenerative plants, crop mixtures, mycorrhization, reduced or even zero tillage (n°6). R&D experiments evaluate and adapt these practices in cooperation with vegetable farmers over time, on small areas of their farms (n°S4). Once experimented, the vegetable farmers implement these practices. They potentially face decreased crop yields in the short term, the time to fully master the new techniques and that the soil needs to evolve in quality, but they gain in the long term. This gain allows them to implement the techniques without a more important valorization in their sales. Suppliers sell the required inputs (e.g., seeds for green fertilizers). Public authorities at the European and national level finance the development by financing the experimentations, in particular those, which aim to generalize these practices on a national and European scale (n°S5).

Participants raised several challenges for this complex coupled innovation: (i) the time needed for farmers to invest in new practices, (ii) the risk of higher workforce costs for these new practices (e.g., managing crop mixes could decrease mechanization options), (iii) the risk of lower crop yields with these practices.

➤ **Develop the knowledge and skills of the entire Provençal sheltered vegetable agrifood system on agroecological soil management (Group organic)**

This complex coupled innovation consists in developing the knowledge and skills of the entire Provençal sheltered vegetable agrifood system on agroecological soil management. It arose from the development of the solution n°20. It aims at convincing stakeholders of the benefits of practice change and providing them with key skills to achieve it. The principle is as follows:

R&D develops skills and knowledge throughout the value chain. This starts with raising awareness (general and recurring background noise across all communication channels) so that everyone understands why it is important. Then training technicians and the actors with whom the producers exchange the most: the purchase managers from marketing firms and the nurserymen (n°20, 29), so they take soil health issues from farmers into account in their work and provide this knowledge to farmers. This allows reaching a wide range of farmers. Farmers should be given real examples from producers showing that agroecological management of soil health is effective to reduce RKN pressure and efficient in resource use. The input supplier and marketing firm have an interest: that their clients and suppliers stay/become sustainable and loyal. The training allows preparing experimentation (in the broadest sense: technical and organizational) and the dissemination of the knowledge resulting from these experiments (n°20). The downstream value chain finances this training operation with their gain because public institutions will reduce funding. They could do it via a contribution paid to an independent R&D organization, such as the inter-branch mandatory contribution financing the research institutes (n°S10). Another example is the model of the NGO promoting soil conservation mainly financed

by the downstream actors and that seeks to raise awareness and train all stakeholders of the value chain on soil management issues (n°S11). The marketing firms, via the NGO, are supported by people who know the production systems (private R&D) to carry out a project from the field to the plate.

Participants of the organic group did not raise specific challenges for this complex coupled innovation.

➤ **Disseminate information on the stakes and constraints of agroecological management of soil health across all components of Provençal sheltered vegetable agrifood system (Group mixed)**

This complex coupled innovation focused on disseminating information on the stakes and constraints of agroecological management of soil health. It arose from the development of the solution n°6. It aims at fostering farming practice change by bringing knowledge on agroecological techniques to farmers through all the stakeholders they interact with, helping them co-designing alternative cropping systems and raising awareness of the other stakeholders on farmers' issues. Details on the principles of this innovation are given in Appendice P.

To conclude, the workshops in Step 2 enabled us to identify some mono-level solutions, but mainly simple coupled solutions. Four complex coupled solutions also emerged, but they were not studied in deep due to a lack of time. This was the aim of Step 3 to deepen the design of a few complex coupled solutions, which we consider as the solutions most likely to manage RKN pests in the long term.

3.3. Step 3: designing complex coupled innovations based on priority themes to unlock agroecological RKN management

During the workshop of step 3, participants designed three complex coupled innovations aiming at overcoming barriers to widespread implementation of three sets of agroecological practices: (i) the integration of techniques to achieve agroecological RKN management (section 3.3.2) and (ii) poor or non RKN-host crop integration (3.3.3) and (iii) high-quality amendment and soil stimulant spreading (3.3.4). Finally, these complex coupled innovations were evaluated thanks to the evaluation grid based on stakeholders' indicators presented before the workshop results (3.3.1). As in the former workshops, the coupled innovations were developed in interaction with knowledge exchange that I will not detail here. On the other hand, when presenting the complex coupled innovation, I will show how the work of former workshops was reused by indicating in brackets the number of solution concepts being combined, i.e., WkXn°Y will refer to the workshop X (1 or 2) and the solution concept number Y. New solutions were designed in the complex coupled innovation design process. They will be indicated by mentioning in brackets Wk3n°Y.

3.3.1. Evaluation of the coupled innovations

Three categories of criteria arose from the multiple exchanges with the stakeholders: resource availability for implementing the complex coupled innovation, the effects the stakeholders expect from these innovations and the compatibility of the innovations in the current context. Then, I structured the criteria in the preceding three categories, and the three levels: field, farm and STAFS. As workshop duration was limited, I selected 5 criteria that were discussed in priority during workshop 3:

- **At field level:** (1) effect on RKN pressure, (2) effect on other soil-borne pest and disease pressure. Those criteria aimed at evaluating the impact of the complex coupled innovation on soil health in vegetable farms considering the whole set of soil-borne pests and diseases in order to avoid generating new issues with other pests and diseases when reducing RKN pressure.
- **At farm level:** (3) economic farm balance, (4) quality of working conditions. The criteria (3) aimed at evaluating the effect we can expect from the complex coupled innovation on the farm's economic viability. The criteria (4) aimed at identifying the impact we can expect from the complex coupled innovation on features such as time, mental load pressure, the comfort of the work, social interactions.
- **At STAFS level:** (5) the economic balance of companies besides farms, in order to identify the expected impact of the complex coupled innovation on the profit and viability of the other STAFS' stakeholders.

The whole list of the criteria is available in Appendice Q.

3.3.2. Complex coupled innovation for poor or non RKN-host crop introduction

Participants of the "Diversification" group accepted the goal "In 2030, 80% of farms contaminated with RKN have at least 20% of their cropping surface under shelter occupied with poor or non RKN-host commercial crops". The facilitator presented them the complex coupled innovation from workshop 2 "Multi-stakeholder coordination around a label for minor crop introduction" (3.2.3.1.). The participants amended this proposition to propose the following complex coupled innovation (Fig. 29):

➤ **Complex coupled innovation**

At the field level, minor and/or major crops that are RKN-poor or non RKN-host would be introduced (Fig. 29). The susceptible crops would be planted at a period that limits RKN damages: either when the RKN are inactive (winter period, technique of escape cropping) or when the crop starts growing vigorously which limits RKN damages. At STAFS level, they proposed the adaptation of an existing public certification: High Environmental Value (HEV) certification by adding elements on agroecological management of soil health and especially on crop diversification (Wk3n°9). This proposal replaced the initial proposition of the creation of an existing label from workshop 2. The adaptation of the HEV label could be supported by FranceAgriMer, a French institution with a role of favoring collaboration in the value chains,

building prospective strategy and allocating subsidies. Then, at least one large vegetable marketing group (e.g., a large retailer) could decide to sell mostly HEV products, accelerating the transition of the vegetable sector towards respecting the new HEV specifications (Wk3n°10), including crop diversification. The HEV label would then first foster practice change by better valuing farmers who comply with its requirements, but quickly it will become a mandatory label to access the mass market (e.g., super- and hypermarkets). This should facilitate the opening of outlets for minor crops that are poor or non RKN-host. In parallel, participants stressed that they should win back markets for these specific minor crops (e.g., Provençal onion, lamb's lettuce, leek), especially those for which the production capacity in Provence is high (Wk3n°11). This could be fostered by an existing intermediary organization for developing new markets (the GEFEL). Finally, participants proposed that marketing firms guarantee a constant price throughout the season to farmers for RKN-host crops to encourage the farmers to plant them when they are the least vulnerable to RKN (Wk3n°13). Additionally, participants proposed that R&D informs farmers on the existing techniques (Wk2n°4) and especially provides personalized advice on species and rootstock choice adapted to farmers' soil issues (adaptation of Wk2n°29).

➤ **Evaluation**

The facilitator of this group did not conduct the whole evaluation, because she found that the criteria did not suit the complex coupled innovation designed. Yet, the participants stressed that the complex coupled innovation should be beneficial to the economic health of the non-farm firms (+1,5). Participants stressed the issue of making the label visible with the mandatory suppression of vegetable packaging in 2021. They pointed out the risk to develop new farms specialized in these new crops. They also stressed that the downstream value chain should find an interest in taking a role in the innovation, for instance by being able to communicate around the local origin of the products to consumers for better sales. A knowledge gap to explore is: which poor or non RKN-host crops have a high production potential in Provence?

Target : In 2030, 80% of farms contaminated with RKN have at least 20% of their cropping surface under shelter occupied with poor or non-host commercial crops

Title: Improve the coordination between producer, first marketing firm and retailer and knowledge access

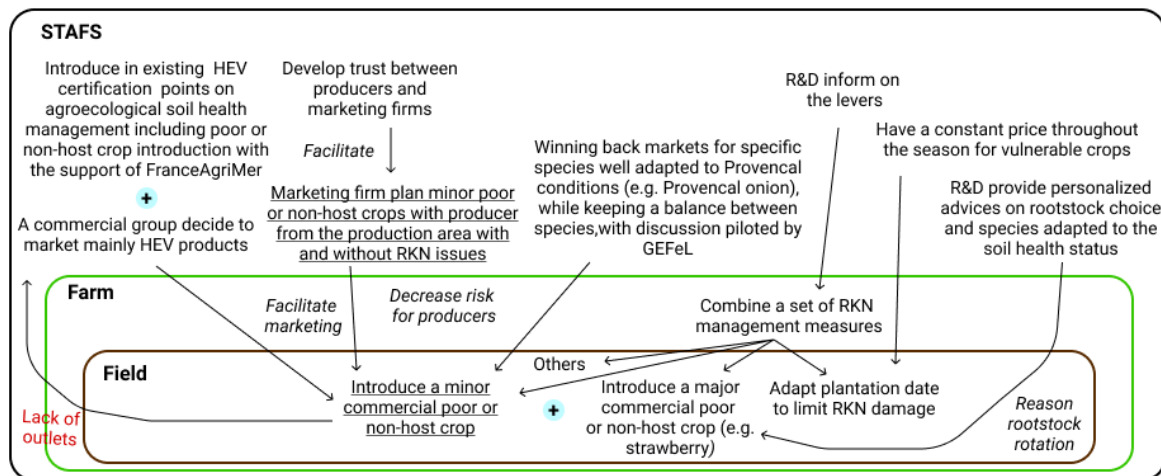


Figure 29 - Step 3 multi-level complex coupled innovation on the **introduction of poor or non RKN-host crops**. The initial solution from workshop 2 is underlined. Each text unit refers to a solution. The + in blue shows the combination of several solutions. The interactions between solutions are shown by the arrows. The element in red shows the issue that arose from the field level and conducted participants to propose solutions at the STAFS level.

3.3.3. Complex coupled innovation for high-quality amendment spreading

Participants of the “Amendment” group amended the initial goal, mentioning the target of 3% organic matter rate in the soil, into “In 2030, 80% of farms contaminated with RKN spread high-quality organic amendment and soil stimulants on their farm to attain **an adapted level of soil organic matter and a good soil life**”. The facilitator presented them the solution from workshop 2 n°14 “Structure a soil regeneration plan at the level of the vegetable farming sector in Provence” combined with spreading of high-quality amendments and high-quality soil stimulants or biocontrol products at field level. The participants detailed this soil regeneration plan (Fig. 30).

➤ Complex coupled innovation

At the field level, participants proposed to start with a regular and complete soil analysis (Wk3n°1), which was not regularly being done by most farmers of the territory (Fig. 30). Then, they suggested defining the type, the rate and the period of spreading of soil amendments based on soil analysis and the farmer’s objective (e.g., balance a C:N ratio too low to stimulate specific organisms) and spread the amendment accordingly. In order to achieve this at the field level, they proposed STAFS-level solutions: combining the development of a soil analysis method accessible to vegetable farmers (Wk2n°28), the training for advisors to support farmers on soil quality evaluation and management (Wk3n°14) and a proactive approach of the advisors on this topic. Indeed, the advisor participant said “*it is not really the case today, we need to do this type of [soil quality] follow-up. Today we are more tackling short-term issues such as aphids*”. In order to ease access to bulk amendment sources by farmers, they proposed either that the input

companies organize an equipment loan service (Wk3n°15) or that producers or entrepreneurs propose service delivery (Wk2n°J6) to do the crop operation with the specialized equipment required and the equipment sterilization. Then, they proposed two alternative options for amendment sources to current providing companies (considered as too expensive and with a poor biological action). The first option was the structuring of the local offer at STAFS-level in order to guarantee high-quality amendment supply to farmers (e.g., local green waste compost) (Wk3n°16), for instance from territorial collectivity composting platforms, horse or sheep farms. The regional agricultural chamber stressed that the resources at the Provençal level are sufficient. The second option was the self-production of high-quality amendments at farm-level (Wk1n°5) which could be partly composed of vegetable crop residues with a composting method adapted to the risk for the health of the subsequent crop. These residues are currently often spread in the open field or burned for sanitary reasons. Finally, studying the effect of a diversity of amendments would contribute to easing the implementation of this complex coupled innovation.

➤ Evaluation

The participants assessed this complex coupled innovation as follows:

- **At the field level:** they considered that **RKN pressure** would be effectively decreased but that still other techniques should be combined with the one proposed (+1,5). They also considered that **other soil-borne pest and disease's pressure** would be decreased, as a better soil ecosystem balance should be found (+1).
- **At the farm level:** they estimated that the **economical balance of the farms** should be improved thanks to lower RKN damages (+1), but only a little due to amendment and analysis costs. Regarding the **working conditions**, they considered that the difficulty of this adaptive management would worsen it first (e.g., higher mental load). However, later, the farmers would have fewer soil issues to manage that would counterbalance the initial worsening (-1 then 0).
- **At the STAFS level:** participants considered that it would improve the **other organizations' economic balance**, e.g., amendment companies that will develop specialized products, advisory organizations that will benefit from more profitable and sustainable farms (+2).

One new challenge was mentioned for this complex coupled innovation: the risk of soil contamination from the amendments and the difficulty for a farmer to manage the production of its own compost (requires knowledge, time and space).

We also revealed collective knowledge gaps:

- Where is the amendment resource and how to find it for organic and conventional farmers?
- What is the current level of soil organic matter in the sheltered vegetable soil in Provence? Which level to target depending on soil texture in order to develop suppressive soils?
- What type of amendment should be used for best effects on RKN (e.g., C:N ratio)? Which volume, frequency and period of spreading? Are packed amendments less effective than bulk ones to improve soil ecosystem balance? Are they more expensive?

- What are the measurable characteristics of a “balanced soil ecosystem” that suppress RKN (biological diversity, populations)?

Target : In 2030, 80% of farm contaminated with RKN spread high quality organic amendment and soil stimulant on their farm to attain an adapted level of soil organic matter and a good soil life

Title: Which organic matter ?

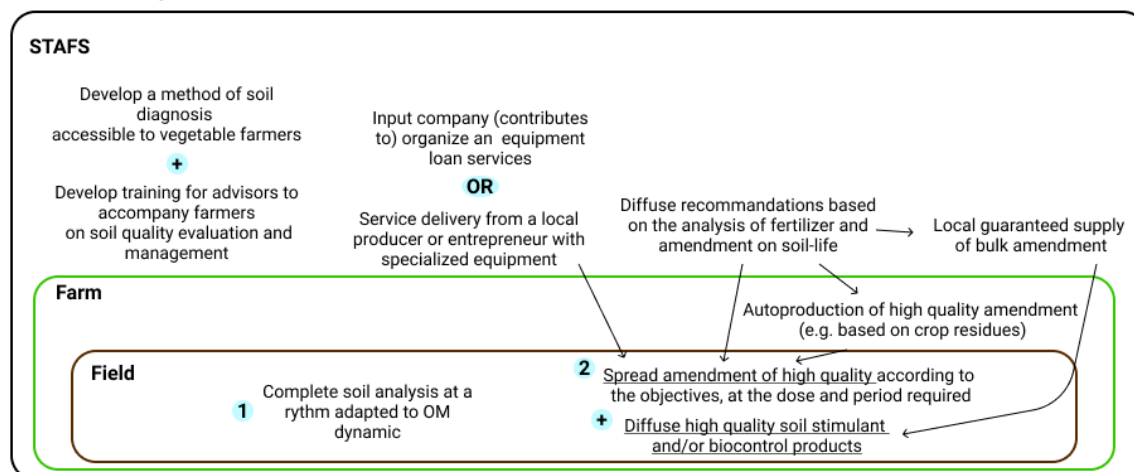


Figure 30 - Step 3 multi-level complex coupled innovation on the **spreading of high-quality amendment**. The initial solution from workshop 2 is underlined. Each text unit refers to one solution. The elements in blue show the order of the implementation of solutions (numbers) and the combination of several solutions (+). The interactions between solutions are shown by the arrows.

3.3.4. Complex coupled innovation to tackle the whole complex problem

Participants of the “Integration” group accepted the predefined goal “In 2030, 80% of the farms contaminated with RKN limit their damages below 5% of yield loss, with combining at least 3 mechanisms³³”. The complex coupled innovation concept from workshop 2 “Development of soil regenerating cropping system within a R&D-farmers tight network” was therefore presented (3.2.3.2.). Participants completed it, designing the complex coupled innovation as described below (Fig. 31).

➤ Complex coupled solution

Starting from this complex coupled innovation, they proposed first a combination of 3 successive actions: soft soil disinfection (with solarization), soil analysis to identify biological and chemical imbalances (Wk3n°1), and implementation of agroecological practices adapted to the soil analysis (Fig. 31). The goal was both, restoring a soil ecosystem favoring RKN antagonists (Wk2n°4) and stimulating crop growth to limit RKN damages. Participants proposed to add

³³ Refers to the technique triangle chap1, the three mechanisms are destroying present individuals, stimulating in-soil competition, preventing reproduction and spreading of pests and diseases.

prophylactic measures specifically targeting RKN such as removing infected roots with a potato harvester or subsoiler (Wk1n°13, field level) and cleaning systematically tools coming from outside of the farm (Wk2n°13, farm level). Participants also proposed to split farm fields in two: the RKN-free fields should be protected by a strict application of prophylactic measures, whereas RKN-infected fields should receive both prophylactic measures and a curative cropping system as described above (Wk3n°3). At the farm level, participants proposed that farmers auto-produce organic amendments capable of favoring RKN control to guarantee their accessibility and quality (Wk1n°5). Commercial high-quality organic amendment for RKN control was considered too expensive. At the STAFS level they proposed to exchange organic amendment with neighbors for the same goals and reasons (Wk3n°3bis). Besides, for accessing minor and major poor or non RKN-host crops, currently rare, the nematologist researcher suggested adapting resistant rootstocks such as *Cucurbit Metulifera* for Cucurbitaceae (e.g., for cucumber) available in South Africa (Wk3n°5), and/or support the development of new varieties by *in vitro* interspecific hybridization. Then, participants proposed to engage in the R&D public network the two thirds of Provençal vegetable farmers that were reported to be out of this network (Wk3n°7), to improve their technical knowledge and facilitate agroecological technique implementation. Finally, the Provençal sheltered vegetable production was expected to globally decrease due to the development of unproductive techniques occupying cropping areas (service crops, solarization). The participants then proposed to remobilize part of the surface of vegetable production lost in the last years to compensate for the production losses for the territory (Wk3n°8).

➤ Evaluation

At the end of the design session, participants evaluated the designed complex coupled innovation. They considered that the complex coupled innovation will be very **effective to manage RKN** (+3) and **effective to manage the other soil-borne pest and diseases** (+2). They considered that besides an initial cost in time, investment and mental load, the **work quality** would not be affected at the middle term (-1 at the start, then 0). Besides, **farm viability** should not be negatively affected by this complex coupled innovation, as long as the benefits of the techniques mainly cover the additional costs (0). They also considered that **other firms should strongly benefit from the complex coupled innovation** (+3), e.g., the seed companies with new varieties, the labs for the soil analysis.

Yet, participants stressed several issues or problems for implementing the complex coupled innovation on the Provençal area:

- At **field level**: unsuitable material (shelter equipment for solarization), adverse effects on other pests (service crops that host bioagressors of commercial crops, such as *Sclerotinia spp.* that can be transmitted from *Brassicaceae* service crops such as radishes to lettuces) and amendments costs
- At **farm level**: lack of material for spreading of amendments
- At **STAFS level**: lack of solutions to valorize practice change, uncertain profitability of new crops, lack of known resistance genes in wild plant population, high grafting cost

We collectively identified the following knowledge gaps:

- To what extent is the removal of the infected roots effective?
- What type of amendment should be used for best effects on RKN (e.g., C:N ratio)?
- What are the risks at the rotation level (e.g., sanitary risks) with the introduction of new service crops (e.g., *Crotalaria*)?
- Why is the resistant rootstock *Cucurbit Metulifera* not on the market in France?
- What is economically, for the farmer, the cost-benefit ratio of the combination of techniques proposed compared to the conventional practice?

Target : In 2030, 80% of farm contaminated with RKN limit their damages below 5% of yield loss, with combining at least 3 mechanisms

Title: Combination of technical and varietal levers for sustainable bioagressor management **Gouvernance:** Value-chain + R&D

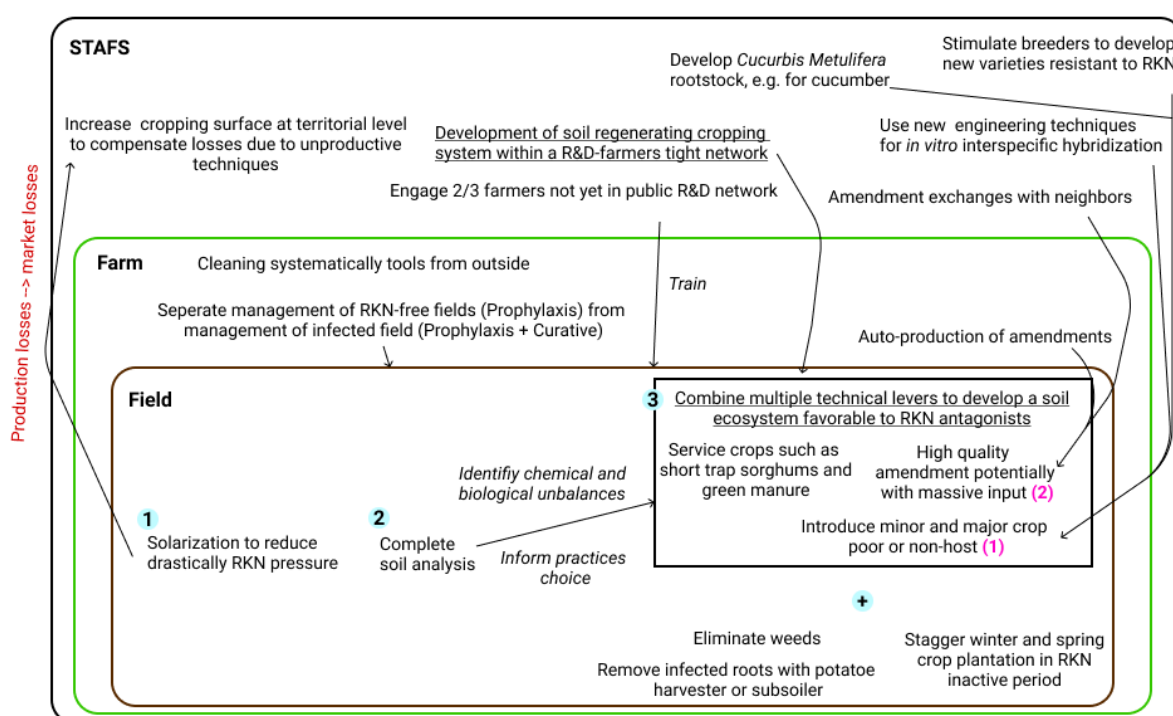


Figure 31 – Workshop 3 multi-level complex coupled innovation on the integration of several practices to achieve agroecological RKN management. The initial solution from workshop 2 is underlined. Each text unit refers to one solution. The elements in blue show the order of the implementation of solutions (numbers) and the combination of several solutions (+). The interactions between solutions are shown by the arrows. The element in red shows the issue that arose from the field level and conducted participants to propose a solution at the STAFS level. “Massive input” refers to experimental results from local R&D on positive effects of 30t/ha application of composted horse manure. Weeds need to be cautiously eliminated because most of them are hosts of RKN. The (1) means that the complex coupled innovation “Diversification” could be combined with this one to introduce minor and major crops that are poor or non-RKN hosts. The (2) means that the complex coupled innovation “Amendment” could be combined with this one to introduce high-quality amendment spreading.

The three complex coupled innovations designed are complementary and should be combined and adjusted to tackle the whole complex problem. Figure 31 indicates with which part of the complex coupled innovation “Integration” the first two complex coupled innovations could be combined. The participants coupled several existing solutions and made 16 new

propositions. They combined all solutions from the field to the STAFS level to facilitate the implementation of agroecological RKN management.

3.4. Workshops' evaluation by observers and participants

We now present an evaluation of the three steps (four workshops), i.e., not of the innovations built but of the co-design process, from the evaluation survey filled out by the participants at the end of each workshop and from workshop observers. As a whole, participants stressed that they appreciated the diversity of stakeholders present, what they retrieved from it (contacts, ideas, knowledge), and that they would like to pursue. Yet, the renewal rate between workshops was important and part of the intermediary objects should be improved.

For each workshop and especially for workshops 2 and 3, the participants appreciated very much the exchange with a **diversity of participants**. For instance, in workshop 3, 10/13 respondents said that they made useful contacts. Participants of workshop 1 were especially interested in **exchanging around the agroecological techniques**: 4/9 survey respondents appreciated very much the presentation of techniques, 4/9 appreciated it and one was neutral. Regarding workshop 2, contradictory feedback was given on the **duration of the different sub-steps**: either too long or too short. Yet, the observers noted that the attention and involvement of participants decreased significantly during the phase of cross-group discussion of the complex coupled innovations. In workshop 3, four respondents mentioned that they would like to have exchanged longer. In workshop 2, respondents stressed that they would like to develop **more precise and operational coupled innovations** and in workshop 3 that **knowledge gaps** should be explored further. According to participants and observations, **the intermediary objects were adapted to the goals** and easy enough for use, except for workshop 3's cards. The cards were overloaded with information, which made them difficult to use for the participants. Participants of workshop 3 were in majority **interested in continuing to work collectively** on this topic (10/13 respondents). Yet, we observed an **important renewal of the participants** across the 3 workshops. Participants' feedback shed light on this. Farmers and other professionals (R&D manager in input company 1 and biocontrol company) considered that the way we addressed the topic is not at the heart of their daily work, either because it is not technical enough (for farmers) or because they do not feel as key actors of the problem and cannot free up enough time.

4. Discussion

The results of this chapter are two-fold: (i) the solutions and knowledge produced on agroecological RKN management from the field to the STAFS level, (ii) the test of a specific approach for the multi-level design of solutions to facilitate farming practice change. I will discuss them successively.

4.1. Agronomic discussion of the solutions designed for agroecological management of RKN

In this section, I will discuss the relevance of the different solutions designed and the associated knowledge gaps, progressively integrating the different solution levels: solutions at the cropping system level, solutions and coupled innovations at the production system level, and coupled innovations at the STAFS level (Fig. 23, Fig. 24).

➤ Solutions at the cropping system level

I first discuss the original practices presented, then the combinations, and finally, the main knowledge gaps identified at the cropping system level.

Original practices: During the workshop of step 1, participants of the mixed group suggested several innovative practices such as soil inundation that has been proven to be effective against *M. incognita* and *arenaria* but is very water-consuming to reproduce artificially and has counter-effects on soil structure (Bridge 1996; Collange et al. 2011). The participants also proposed **tomato-garlic mixed cropping**. Alliaceous plants' exudates and residues have nematicidal effects and inhibit the hatchability of RKN's eggs (Djian-Caporalino et al. 2009; Arnault et al. 2013; HUANG et al. 2016; Li et al. 2018). Garlic, leeks and onions are poor or non RKN-host for RKN (Djian-Caporalino et al. 2009). Besides, Alliaceous can stimulate mycorrhizae, thus protecting crops against RKN (Veresoglou and Rillig 2012; Chave et al. 2014). Yet, to my knowledge, the effect of such alliaceous-tomato mix cropping against RKN still needs to be reviewed. The use of **organic mulch material** (straw and alfalfa), especially if combined with reduced tillage, can increase soil organic matter (Bucki and Siwek 2019) which has been proven to decrease damage from RKN (Wurst 2010; Gamliel and van Bruggen 2016). Yet, additional nitrogen fertilization should be provided if the C:N ratio of the mulching material is too high to compensate for nitrogen immobilization (Bucki and Siwek 2019). Effects in terms of yield, working time, cropping management and weed suppression need to be clarified (Bucki and Siwek 2019). **Living mulches** have been suggested as a potential solution during the second workshop. Little literature exists on such a practice in vegetable cropping systems, yet, results in arable systems show similar effects than for organic mulch material (Wezel et al. 2014).

Innovative combinations of practices: During the workshop of step 3, groups suggested regular soil analyses to identify biological and chemical unbalances (2.3.2) and to monitor soil organic matter evolution (2.3.4). The goal was to adjust the following practices in order to increase soil fertility and stimulate rapid crop development which limits RKN and other soil-

borne diseases' damage to the plants (Collange et al. 2011; Gamliel and van Bruggen 2016). Also, increasing stable soil organic matter has been proven to be associated with good soil disease suppressiveness (Gamliel and van Bruggen 2016), especially regarding nematodes (Bridge 1996). Gamliel and van Bruggen (2016) recommend quantifying pathogen inoculum in the soil prior to planting in order to predict the disease incidence and severity and choose the appropriate combination of preventive and curative measures. Contrary to what has been suggested in workshop 3 (2.3.2), this requires testing the soil before solarization if the RKN level is not clear at the end of the cultivation period of the previous crop. This testing appears to be little done by Provençal organic vegetable farmers, either because they do not know it and do not know where to address the samples to or because it is perceived as too costly when it is done annually as in the Netherlands according to Gamliel and van Bruggen (2016). It is especially important when diversifying crops as the crop resistance is not always the same depending on RKN species and corky root damage can be mistaken with RKN (Villeneuve et al. 2013). Then, when the RKN population is high, the "Integration" group suggested solarizing the soil in order to drastically reduce RKN population, and then provide organic amendments to restore a balanced soil ecosystem. The combination of solarization with organic amendments is reported as a very promising approach for soil-borne disease control under shelter; including of RKN (Gamliel and van Bruggen 2016). It is especially reported as effective when organic amendments are first supplied and solarization is then carried out (Gamliel and van Bruggen 2016). Soil suppressiveness, preventing re-infestation of the soil by introduced pathogens or RKN has been reported after combining biofumigation³⁴ and solarization (Klein et al. 2011, 2012) and could consequently be used instead. Additionally, cultivating the cover crop shortly allows obtaining a trap crop effect, and has been proven very effective against RKN in Mediterranean conditions (Djjan-Caporalino et al. 2019). Due to toxic compound release, a delay before planting should be respected, the duration depending on the organic material provided and the sensitivity of the following crops. This involves crop rearrangement (Gamliel and van Bruggen 2016). In line with Collange et al. (2011) and Gamliel and van Bruggen (2016), the three groups proposed to introduce other techniques such as poor and non RKN-host crop introduction, weed elimination, removing infected roots and systematically cleaning tools from outside to limit reproduction and dissemination of RKN. Combined with the previously mentioned techniques, they mobilize the three key mechanisms to suppress soil-borne pest and diseases: (i) reducing the current population in the soil by killing the individuals, (ii) limiting their dissemination and reproduction, (iii) stimulating their antagonists (Chapter 1). The same result was found in the two workshops of step 1.

Knowledge gaps:

Several collective knowledge gaps were highlighted during the workshops on (1) best amendments practice to control RKN, (2) species and varieties that are poor or non RKN-host, (3) conditions for the effectiveness of biocontrol and biopesticide, (4) impact of anaerobic soil

³⁴ correspond to the release of biocide gaz from specific plant materials tilled in the soil

disinfestation under Mediterranean conditions, (5) interest of root removal, (6) soil suppressiveness to RKN.

(1) Existing literature reviews give elements on the nature of the amendment to apply (Collange et al. 2011; Gamliel and van Bruggen 2016; Mokrini et al. 2018). The results are variable depending on the nature of the amendment, the quantity and frequency applied, the soil characteristics, and the size of the nematode population. Yet, in a nutshell, composted amendments from organic wastes with a C:N ratio between 12 and 20 appear to be the most reliable options. Neem oil cake and chicken manure are also often reported as effective options. A positive correlation between volume and frequency of applications and effectiveness against RKN is reported (Collange et al. 2011). Literature suggests that the stimulation of other microorganisms such as non-phytophagous nematodes and earthworms by organic amendment fosters the control of RKN (Nahar et al. 2006; Wurst 2010).

(2) Although scientific (Barker and Koenning 1998) and technical (Djian-Caporalino et al. 2009; Villeneuve et al. 2013) literature provides partial results regarding crop resistance to RKN, data is missing on the resistance level to *M. arenaria* and *incognita* for a wide range of species and varieties that can be cultivated by Provençal vegetable farmers for commercial and service purposes. For instance, it is still unclear if fennel is a poor or non-host to these two species, and which cover crop varieties can be used in the autumn or spring with little risk to multiply RKN. Besides, resistance genes are still very few which leads to resistance breakdown (Collange et al. 2011; S. Nilusmas et al. 2016; Expósito et al. 2019). Finally, crop resistance levels can differ depending on the RKN species (*arenaria* or *incognita*).

(3) Numerous biocontrol products and biopesticide for RKN are effective under controlled conditions but none has been reliably proven to be systematically effective in the field (Collange et al. 2011; Hoefflerlin et al. 2018).

(4) Inundation shares the same effect mechanism with biological soil disinfestation (also called “aerobic soil disinfestation”), which has been proven to be very effective against RKN, subsequent crop yield and sustain soil suppressiveness (Roskopf et al. 2015; Gamliel and van Bruggen 2016). Yet, this technique is neither tested nor used in Provençal systems so far, mainly based on the hypotheses that it would systematically degrade soil quality.

(5) Although the removal of infected roots is reported as good practice by several sources (Bridge 1996; Collange et al. 2011), they do not refer to experimental data supporting the usefulness of this practice that requires workforce and time of the farmers.

(6) Studies on soil biological, chemical and physical parameters that determine RKN suppressiveness and how to foster this suppressiveness through farming practices (for a review: Silva et al. 2018). Yet, they still need to be clarified for *M. arenaria* and *incognita* and need to be translated into indicators to follow the evolution of soils toward suppressiveness and, maybe, evaluate it economically.

Additionally, we saw above that little knowledge is available regarding the impact on RKN and soil-borne pathogens of (7) Alliaceous and RKN host crop intercropping (e.g., tomatoes), (8) organic mulching with plant materials and (9) living mulches.

➤ **Solutions at farm level and farm-level coupled innovations**

Participants mainly proposed two kinds of innovations at the **farm level**: (i) moving the shelters to restart on pest-free soil, (ii) remobilize on-farm biomass production as organic amendments in the cropping system. Moving shelters is time-consuming and costly. Yet, **moveable shelters** exist and seem to be frequently used in other countries (e.g., Netherlands - Gamliel and van Bruggen 2016). In France, the NGO “Atelier Paysan” (<https://www.latelierpaysan.org/>) developed freely available sketches to build small-scale moveable shelters. Besides the benefit of longer rotations on RKN management, it also increases the production capacity of the shelter (see Salembier et al. 2020). However, it requires a continuous space to move the shelter along the rails. This type of mechanism is not being proposed by French shelter suppliers so far but is under development (pers. com., *Station expérimentale de Bretagne Sud*, 18/10/19). **Reusing biomass produced on the farm** is often done in agriculture, for instance in mixed animal-cropping systems. Yet, in specialized shelter vegetable systems it appears innovative because most vegetable farms (especially in Provence) gave up animal husbandry. The transfer of biomass raises several issues: (i) synchronicity between biomass supply and organic amendment needs (e.g., for valorization of alfalfa in the open field), (ii) equipment availability for biomass valorization and spreading (e.g., rake, manure spreader). The first issue can be tackled by composting or drying. It would help farmers to increase autonomy for amendment supply of reliable quality, facilitates the use of a sufficient amount of amendment and assures RKN control. Equipment could be made available by cooperation at the STAFS level that I discuss hereafter.

Workshops’ participants also stressed that the **transition period** of practice change can be challenging at the beginning (Workshop 3 complex coupled innovations “Integration” and “Amendment”). It is consistent with Chantre and Cardona (2014) who showed that the change for sustainable practice in cereal cropping was progressive (around 5 years). Yet, several key elements at the farm level for the transition have not been taken into account: (i) time for vegetable farmers is often very limited (Navarrete et al. 2016), especially when a larger number of vegetable species is cropped (Dupré et al. 2017), (ii) skilled workforce is scarce (Navarrete et al. 2015), impeding the implementation of solutions (e.g., for strawberry production, which is poor or non RKN-host). Addressing these issues would probably have allowed deepening the **exploration of farm-level solutions**. In order to address these issues and go further on the design of coupled innovations for large-scale implementation, technical-economic effects of combinations of agroecological practices for soil health should be studied. What are the benefits in terms of yield gain and soil health problem reduction of the combinations proposed above (e.g., better soil structure limiting the need for tilling)?

➤ **STAFS-level coupled innovations**

STAFS-level coupled innovations, by nature, implies the coordination of several stakeholders. This coordination can happen within the current stakeholder interaction in the dominant system (e.g., R&D providing knowledge and advice, commercial relationship with a service supplier) or it can happen off these current relations (e.g., the marketing firm supplying equipment to the farmers). In the first case, the solutions proposed are not going beyond the current stakeholders' collective fixations (2.1) and are rarely innovative at STAFS level. For instance, in the third workshop (step 2) a manure spreading service or a website development with scientific and technical knowledge is not very innovative. In the last case, it implies stakeholder cooperation and is beyond current fixations, therefore much more innovative.

Farmers' cooperation was proposed for various goals: (i) to guarantee new outlets for minor crops, (ii) to share tools for spreading of organic amendments, (iii) to buy adapted inputs, (iv) to exchange fields and introduce minor crops and (v) to share knowledge. This type of collaboration between farmers exists successfully in other contexts but requires expectations' alignment, mutual trust, overcoming of cognitive barriers (fear of judgment, social status differences), formal and tacit arrangements (Chapter 2, Lucas 2019). As suggested during the game session (workshop step 2), paying pioneer farmers for their participation in peer-exchange groups could foster their participation, hence the knowledge dissemination.

The collaboration between farmers and downstream value chain actors aimed at: (i) the coordination between farmers from the same supply basin to allocate poor or non RKN-host crops depending on farmers' pressure of bioagressors, (ii) the support for material resources (e.g., investment support for equipment or for non-productive RKN management practices), (iii) a higher price for vegetables produced with agroecological practices and communication of added value to consumers through an alternative value chain, (iv) the combination of marketing through a long value chain and direct selling to consumers and (v) the engagement on stable product prices to favor the choice of planting date that optimizes crop protection. The coordination of farmers' activity by the marketing firm is a common practice (Navarrete et al. 2003; Navarrete et al. 2006) but is mainly achieved to optimize sales, without taking into account soil-borne pest and disease pressure (Navarrete et al. 2006). Marketing firms and especially retailers control communication on products to consumers and prices and often get the highest margin on products' sales in the value chain. This resource could be used to support farmers willing to change for agroecological practices. Lefèvre et al. (2020) argue that alternative value chain valuing agroecological practices must be developed in order to foster their implementation. Indeed, the authors show that current product specification of super and hypermarket is often incompatible with what agroecological management systems can achieve. Lefèvre et al. (2020) also show that short value chains such as direct selling allow for more flexibility and agroecological crop protection for vegetables. The creation of an alternative value chain that fosters practice change is well studied in the literature (Magrini and Duru 2014; Belmin et al. 2018). This creation corresponds to the building of innovative niches protected from the dominant regime by a specific claim (taste, health, environmental protection) that allows differentiation and higher prices (Meynard et al. 2017). It compensates for the lack of scale economy compared to the dominant regime. This niche can be initiated from a coupled

innovation concept by anchoring it in existing networks, institutions and technology (Elzen and Bos 2019).

Collaboration between farmers and with the upstream value chain aimed at (i) the provision of adequate inputs, (ii) support of cognitive and material resources. The provision of adequate input could be improved by a better sharing of expectations between farmers and input suppliers (workshops Steps 2 and 3). Indeed suppliers can make the effort to add a new reference to their products (input retailer) or produce other rootstocks if they can be sure to have the corresponding demand. The provision of knowledge from the input supplier is a common practice but needs to be reoriented to favor agroecological practices. As the entire power balance is often detrimental to farmers within the value chain (Meynard et al. 2017). Therefore, a common interest needs to be found between farmers and these companies to develop such collaborations.

Participants stressed the importance of **public R&D networks** over advice from the input providers (e.g., “Integration” group’s complex coupled innovation, workshop 3). The propositions of this nature, such as the creation of a tight R&D-farmer network developing innovative agroecological cropping systems focused on soil quality management (Complex coupled innovation presented in the section 3.2.3.2, workshop 2 and complex coupled innovation “Integration” workshop 3) echoes French conservation agriculture groups such as the BASE and APAD networks in France. Chantre and Cardona (2014) showed that farmers the most advanced in the ecologization of their practices were the ones participating in grouped experiments. They also stressed that the personalized support of farmers is needed as proposed in the action Wk2n°27 and the complex coupled innovation “Diversification” workshop 3. F. Goulet and C. Compagnone also showed that French conservation agriculture groups are effective for knowledge sharing and the development of innovative cropping systems (Goulet et al. 2008; Goulet 2013; Compagnone 2019). Besides, developing autonomous soil health diagnosis tools for farmers (Wk2 n°28) is a promising concept, as it should increase awareness of farmers regarding soil-borne pests and diseases and foster reflexive learning on their practices. The remaining question is: how to increase the outreach of public R&D networks to provide recent knowledge and know-how on agroecological practices to the large majority of farmers?

The contribution of **policy actors** proposed during the workshops was focused on the compensation of the risks taken and potentially of chronic economic loss when applying agroecological practices by adequate subsidies, for instance with a new ecotax on vegetable sales. This idea of compensation of farmers for ecological services is reported by Kull et al. (2015) as a lever for practice change toward more sustainable practice but not in the context of vegetable production.

Finally, **collective projects gathering all stakeholders** were proposed and mainly focused on the development of collective platforms to facilitate information circulation, negotiation and coordination (Wk2n°19, 20, 14, 17). The expectation is that such a platform would foster knowledge on each other’s roles, needs and issues, including soil health issues and would foster

collaboration between stakeholders that are not used to cooperate in order to manage this issue. This is consistent with the key role of intermediaries and network managers to foster collective innovation in the agroecosystems (Berthet and Hickey 2018) and fostering sustainability transition (Kivimaa et al. 2019a) as shown in other collective innovation processes, e.g., Bleu-Blanc-Coeur (Magrini and Duru 2014). Indeed, these intermediaries fulfill key functions such as connecting stakeholders, knowledge brokering, framing their interaction and fostering collective exploration. Participants cited several potential intermediaries: FranceAgriMer (institution) and GEDel (association). I also identified other potential local ones in both, conventional and organic farming: a cluster from the regional market platform, an NGO promoting soil conservation which is mainly financed by marketing firms; in organic mainly: CIVAM, GAB. Besides, an important limit for implementing the strategies proposed is the rejection by a large part of Provençal farmers of collaborative actions. It opens an important avenue to continue the work: exploring organization design to foster trust of farmers in the organization to suppress free riders and attain the goals they targeted. The Nobel prized work by Elinor Oström (Ostrom 1990) and more recent work on collaboration between interdependent participants in a supply chain (McCarter and Northcraft 2007) could help in this exploration.

➤ **Complex coupled innovations**

The complex coupled innovations designed (4 during step 2's workshop and 3 during step 3's workshop) can be considered as scenarios to unlock the lock-in around agroecological RKN management in Provençal sheltered systems as a whole (Chapter 1, coupled innovations described in sections 3.3.2, 3.2.3.3, 3.2.3.4) or on a specific set of techniques: introduction of poor or non RKN-host crop (3.3.3, 3.2.3.1), spreading of high-quality amendments (3.2.3.2 and 3.3.4). All these complex coupled innovations are not alternatives but can be combined.

Two complex coupled innovations were developed in detail based on specific farm case studies during workshop 1. They also correspond to scenarios, but farm-specific ones that could enable these two farms to implement agroecological practices. When contacting them few months after the workshop, they said they implemented new techniques based on the outcomes of the workshop and started negotiating with their wholesaler to introduce minor crops that are poor or non RKN-host (e.g., garlic). They did not mention any collective initiative such as taking soil health into account in a common planning or plot exchange. I see two reasons for that. First, such complex innovative concepts are far more complex to implement than new practices and take time to anchor in the social, institutional and technological system. Romera et al. (2020) mention 5 to 10 years. Second, the first workshop mainly engaged farmers and focused more on the field and farm levels of innovation.

4.2. Discussion of the approach

Normally, the design in agricultural systems is distributed (Prost et al. 2016), e.g., cropping systems are designed by farmers, sometimes with their advisors; organizational innovations in food distribution are designed by marketing firms; new varieties are designed by plant breeding

companies. Designing these different artifacts separately limits the ability to innovate for more sustainable agricultural systems (Meynard et al. 2017). Therefore, Prost et al. (2016) identified the following research avenue: *“new design organizations have to be developed. New collective design methods are required to involve not only research centers and extension services but more widely a variety of actors with heterogeneous knowledge and interests”*. The approach I presented in this chapter contributes to this research avenue, by articulating three steps in a process of multi-level codesign of solutions. I first discuss the performance of the workshops, then how the participatory feature was organized and could be done differently. Lastly, I come back to the evaluation of multi-level solutions.

➤ **Workshop design performance and suggestions of improvement**

We succeeded at each step to manage several activities in parallel: solution design, knowledge sharing, participant engagement in a collaborative atmosphere and knowledge gap identification. Yet, the remobilization of knowledge previously disseminated by participants during the **3rd step’s workshop was not fully satisfying**. In the group “Integration” and “Diversification”, mainly new ideas were proposed without revisiting previous ones. The cards were reported as little accessible and participants used them little, except when the facilitator selected them. For future use of the methodologies used in the step 3’s workshop, I suggest simplifying the cards in order to lighten the cognitive load. I also suggest presenting the most promising solutions previously designed to participants at the beginning of the session. The step 3 was aiming to initiate the P-phase by using the ideas from the former workshops, combine and detail them on implementable complex coupled innovations. Yet, this ambition was too high, and it only produced concepts of coupled innovations without a selection and without important build on the preceding workshop, likely for the reasons given above.

We observed three factors that strongly influenced the outcome of the workshops. The first two are the facilitators and the intermediary object used, as found by Berthet et al. (2015) in their comparative study of three design methodologies of agroecological innovations. The third one is the number and diversity of participants. Indeed, workshops of steps 2 and 3 have shown significant differences between the subgroups in interaction with the facilitator. For instance, in workshop 3, the group “Diversification” did not evaluate the complex coupled innovation, considering the evaluation inadequate to the innovation designed whereas another facilitator found it adequate. All the facilitators did exchange before the workshops to agree on how to proceed with the facilitation. Besides that, I suggest doing training sessions beforehand with all facilitators to practice the facilitation for real and adjust collectively the method. The explicit representation of the three levels for all intermediary objects (except the design phase of step 2’s workshop – Fig. 26) and the diversity of stakeholders facilitated the emergence of pieces of solutions at multiple levels and their coordination, hence the design of coupled innovations (Meynard et al. 2017). This was striking during the first two workshops (step 1), especially in the mixed group between conventional and organic farmers. For instance, a conventional farmer spoke about his plot exchange with his neighbor, which is more difficult in organic farming but inspiring, and learned from an organic farmer about the conditions for effective crop diversification. Besides, the number of participants also had an influence, for instance on the

number of simple coupled innovations and complex coupled innovation design in the workshop of step 2. Few stakeholders were absent and could have provided interesting contributions: nurserymen, vegetable crop breeders (the one present was focused on cover crops), consumers. The intermediary objects also fostered expansion thanks to the flexibility of their structure and the clean cards available to bring new elements when needed. This is different from approaches of model-based design, which tend to constrain the exploration by predefined indicators and non-flexible representations (Berthet et al. 2015)

Yet, we have identified heterogeneity between steps. Step 1 involved mostly farmers working with an intermediary object leaving a large room to the field and farm level (Fig. 25). It resulted mainly in solutions proposed at those two levels. Step 2, with heterogeneous stakeholders, was based on the game representation (Fig. 18, 19, 20, Chap. 3) and the stakeholder sheet (Fig. 26) and focused mainly on the STAFS-level interactions. It produced mainly solutions at this level linked with the target of including agroecological practices. Finally, step 3 involved a heterogeneous set of participants working on an intermediary object combining the three levels. It produced complex coupled innovations, but with less attention to the farm level (see explanation 3.1). Therefore, throughout the process, we explored solutions at the three levels (cropping system, farming system, STAFS, Fig. 1, Chap. 1) and integrated them within complex coupled innovations.

The design process combined step-by-step and *de novo* design (Meynard et al. 2012). The *de novo* design was particularly achieved in step 2 thanks to the defixation based on the game and the following creative design session. It was also done in step 1 based on the examples given from the tracking of innovations (Chap 2). Step-by-step design was achieved when discussing their implementation on a real farm (step 1) and combining the solutions designed into complex coupled innovations (steps 2 and 3). Managing jointly both design types is complementary (Prost 2019) and resulted in several complex coupled innovation options both, original and realistic. Besides, it allowed characterizing a part of the challenges to take care of for the implementation. Yet, the workshops' program could be organized differently to improve the articulation between *de novo* and step-by-step. First, one could start with the step 2's workshop to generate innovative ideas of solutions at STAFS level coupled with practices at field level. Then, the articulation between the three levels could be deepened with a step 3's workshop. We could finish with the step 1's workshop to build prototypes adapted to farm archetypes. This organization is promising, but should be adapted to the constraints of engaging the participants, such as the farmers, who can have difficulties to be directly involved in a multi-stakeholder arena around objects that are not focused on farming practices.

➤ **Focus on participatory features for multi-level design**

Unlike Prost et al. (2018) and ComMod approaches (Étienne 2013), we did not share the decision power with **the participants on the goals** and the approach of this design process. This is likely responsible for issues regarding the participant's mobilization (Barreteau et al. 2010). Yet, similarly to methods presented by Berthet et al. (2015), the proposed workshops fostered the articulation of heterogeneous knowledge sources, especially knowledge from the organic

sector and the conventional sector, and generic and local knowledge. They also provided an “equilibrium between embeddedness in the situation and distance from it is an important element for managing exploration.” (Berthet et al. 2015). We, researchers, acted as facilitators (Ingram 2008) or systemic intermediaries (Agogué et al. 2013; Kivimaa et al. 2019a) or network manager (Berthet et Hickey 2018) of the design process with combining grounding, the definition of ambitious design goal, fundamental knowledge, tools and representations (Prost et al. 2018). As Prost et al. (2018), ComMod approaches (Étienne 2013) and RIO approaches (Elzen and Bos 2019), we acknowledged the legitimacy of actors and their knowledge to design by themselves and consider ourselves as learners among others. The participation could have been extended to other scientific disciplines (e.g., management, economy, sociology) to get more insight on the value chain stakeholders and the way to organize trustful cooperation. It could also have taken into account more the role and profession of the participants within their organization. Indeed, each stakeholder, even in the same company has its own views, competencies and power of actions (Duru and Therond 2014; Romera et al. 2020), but we were limited by the availability of the participants.

For instance, to have an actual impact, firm managers should be involved. This is part of what Elzen and Bos (2019) called the anchoring process, taking several steps: “(i) *communicating the designs*, (ii) *developing networks*, (iii) *creating space for niche formation*, (iv) *stimulating the uptake of partial innovations* and (v) *create an exemplary system (a full-blown pilot)*”. It enables facilitating the emergence of a new innovation niche (Geels 2002) based on the innovations designed. Another option would be to accompany existing initiatives of coupled innovation design such as Bleu-Blanc-Coeur (Magrini and Duru 2014). This would allow facilitating the anchoring of the innovation created and speed up the process by accompanying an existing niche in its development.

➤ **Focus on the evaluation of multi-level solutions**

The approach presented in this study could have been enriched if it had combined the soft approach with a hard approach based on a computer model as suggested by Martin (2015). Indeed, if we do not have strong technical information to provide to farmers, it will strongly impede the changes in farming practices (Mawois et al. 2019). This model could help to evaluate the innovations. It would at least allow evaluation of the results in terms of soil health. Yet, the indicators should not limit ideation. Thus, such evaluation should be used in the last step 3 workshop or be used between the steps. Yet, this “hard approach” with a model needs to be developed along with biotechnical and techno-economic knowledge on sheltered vegetable production systems, which is currently incomplete for RKN management.

➤ **Perspectives**

In this work, we widely explored a diversity of solutions to overcome the lock-in around agroecological RKN management. Yet, we did not develop any in detail and none was implemented at the end of this work, except new techniques that were compatible with the current constraints of the farmers. As Romera et al. (2020) put it: “*This is not a failure*”. The precision and implementation of new concepts take time and can also be supported. For that, I

suggest taking the following steps: (i) communicating the knowledge gaps to researchers that can work on them and launch projects to fill them (Berthet et al. 2015); (ii) initiating a P-workshop starting from the solutions designed to develop consistent strategies to go from the concepts to innovation prototypes (Hatchuel et al. 2009); (iii) anchoring these prototypes within a network of motivated stakeholders to initiate a niche, then link it with existing networks (network anchoring), institutions (institutional anchoring) and technology (technological anchoring) (Elzen and Bos 2019). Finally, the 3-step approach and the tools I developed should be further tested after applying the improvements presented above. It would allow to further improve them, for instance by improving the usability of the intermediary objects for other facilitators than the initial designer.

Partie C -Discussion générale

Discussion générale

Je débute cette discussion générale par une synthèse des principaux résultats produits dans ma thèse (section 1), avant de les discuter transversalement dans les sections suivantes. En section 2, j'aborde les enseignements que je tire de ma thèse pour mon cas d'étude. En section 3, j'aborde les enseignements méthodologiques de ma thèse pour la conception multi-échelle de solutions. En section 4 je traite des apports théoriques de ma thèse à l'agronomie système.

1. Résultats principaux de la thèse

Chapitre 1 : J'ai proposé un cadre d'analyse multi-échelle des déterminants des pratiques et des processus sous-jacents. En l'appliquant à mon cas d'étude, j'ai montré et caractérisé un verrouillage sociotechnique du secteur agri-alimentaire maraîcher provençal autour de la désinfection radicale des sols, avec des structurations différentes mais convergentes du secteur bio et conventionnel. Ce verrouillage, fragile mais encore présent, est lié à quatre fixations collectives : (i) pour nourrir le maximum de personnes, la meilleure manière de produire consiste en une production massive à un faible coût (ce qui freine l'implémentation de pratiques alternatives avec un coût plus élevé) ; (ii) chaque partie prenante doit rester indépendante et se focaliser uniquement sur son propre rôle (freine la coopération) ; (iii) l'innovation doit être faite au niveau du système de culture voire de production, sous contrainte des autres acteurs du système agri-alimentaire territorial et sectoriel (SATS), en particulier de l'aval de la filière ; (iv) le sol est uniquement un support de culture qu'il faut adapter aux besoins de la plante, quitte à le désinfecter. J'ai également identifié des ressources et leviers potentiels pour dépasser ce verrouillage et faciliter le changement de pratiques vers la gestion agroécologique des NàG, plus prometteuse en termes de durabilité.

Chapitre 2 : J'ai conçu et mis en œuvre une démarche de traque aux innovations à l'échelle du SATS, basée sur une analyse des leviers techniques et de leurs conditions de mise en œuvre. Ces innovations peuvent être des innovations couplées (coordination entre SATS et pratiques), ou des innovations qui influent fortement sur les pratiques et peuvent nourrir la conception d'innovations couplées dans d'autres contextes. L'application de cette démarche à l'échelle nationale sur la gestion des bioagresseurs en cultures légumières a permis d'identifier 40 cas d'innovations, regroupées en 5 types d'innovations mobilisant les mêmes combinaisons de leviers sociotechniques. Ces différents types d'innovations sont : (i) le développement d'infrastructures de connaissances conjoint ou non avec celui d'intrants adaptés, (ii) la facilitation d'échanges entre pairs pour les agriculteurs, (iii) la (re)structuration de filières agro-alimentaires permettant la valorisation de modes de production alternatifs, (iv) la mise en commun de ressources par un ensemble d'agriculteurs, (v) l'échange ou la location de parcelles entre agriculteurs. Leur étude montre que les facteurs humains (ex : confiance, communication), l'implication des agriculteurs dès l'initiation du projet et le rôle des intermédiaires sont des clés de succès. Les innovations identifiées permettent de répondre à des freins récurrents identifiés dans l'analyse des verrouillages au changement de pratiques (ex : manque de débouchés pour

les cultures de diversification, intrants nécessaires peu accessibles), dont ceux identifiés dans l'analyse sociotechnique (chapitre 1).

Chapitre 3 : J'ai créé le jeu sérieux *Soilh&co* qui a permis de partager le résultat de l'analyse sociotechnique (chapitre 1) et d'initier la conception en facilitant conjointement la gestion des connaissances, la créativité et la collaboration des participants. Les caractéristiques essentielles qui lui permettent de remplir ces fonctions sont : (i) l'inclusion des connaissances issues de l'analyse sociotechnique dans la structure du jeu, (ii) l'immersion des participants dans le rôle des acteurs du problème étudié, (iii) l'inversion des rôles, (iv) le fait d'aménager un espace d'exploration ouvert et sans risque, (v) son caractère multi-échelle, (vi) son caractère multi-acteur, (vii) sa capacité à représenter de nouvelles idées de solution. Ces caractéristiques sont partagées avec de nombreux autres jeux sérieux, mais la combinaison des trois derniers items (v à vii) constitue, à ma connaissance, une spécificité de ce jeu qui le rend particulièrement bien adapté à l'accompagnement de la conception d'innovations couplées.

Chapitre 4 : J'ai animé 4 ateliers successifs basés sur des objets intermédiaires. Les deux premiers avec principalement des agriculteurs, les deux suivants avec des représentants des parties prenantes du problème, à l'exception des pépiniéristes et des sélectionneurs de variétés légumières. Ces ateliers ont permis de conduire conjointement (i) l'exploration de connaissances et de solutions innovantes au problème étudié, (ii) l'identification de trous de connaissance, (iii) l'engagement de parties prenantes dans un processus de gestion commune des BT en maraîchage sous abris. Ils ont produit 9 innovations³⁵ mono-échelles, 32 innovations couplées « simples » et 9 innovations couplées « complexes ». Les innovations couplées complexes, complémentaires entre elles, ont le potentiel de lever le verrouillage identifié en chapitre 1 si elles sont combinées et implémentées. Cependant un travail d'affinage des concepts conçus et d'ancrage (« *anchorage* ») en termes de réseau, ainsi qu'en termes technologique et institutionnel reste nécessaire pour rendre ces idées opérationnelles.

2. Contributions à la gestion durable des bioagresseurs telluriques en maraîchage sous abris provençal

Dans cette section, je présente d'abord l'évolution des pratiques de gestion des BT en maraîchage sous abris provençal, et des déterminants les influençant aux échelles supérieures pendant la durée de ma thèse (2.1.). Cet état des lieux me permet ensuite de présenter mes recommandations pour l'accompagnement du changement de pratiques vers une gestion agroécologique des BT en maraîchage sous abris sur la base des résultats de ma thèse (2.2 à 2.4). Comme précisé dans la problématique, les techniques de gestion des NàG et des champignons pathogènes telluriques sont essentiellement les mêmes. Or, les champignons pathogènes telluriques sont les autres principaux BT problématiques au sein des systèmes maraîchers provençaux sous abris. C'est pourquoi, quand les techniques concernées sont les mêmes, je me

³⁵ Par « innovations » j'entends les concepts identifiés comme « atteignables » et « disruptifs ». Je n'inclue pas les concepts communs.

permettrai d'élargir mes recommandations à la gestion des BT dans leur ensemble. Je présente ces recommandations échelle par échelle, tout en précisant dans chaque section, les interactions avec les autres échelles.

2.1. Évolution des pratiques de gestion des BT en maraîchage sous abris entre 2017 et 2020

La gestion des NàG en maraîchage sous abris a évolué pendant ma thèse, indépendamment de celle-ci. Le Métam sodium, dernier fumigant chimique réellement utilisé (contrairement au Dazomet) fut interdit en 2018. Les techniques alternatives ont progressé auprès des producteurs accompagnés par la R&D publique, en particulier la solarisation et l'utilisation du Sorgho en culture sensible piège et biofumigante (com. pers. C. Goillon et L. Camoin). D'un autre côté, des producteurs conventionnels se sont tournés vers le Velum Prime® (nématocide en goutte à goutte) et une nouvelle technique d'ozonation de l'eau d'irrigation *a priori* biocide et non sélective (Msayleb and Ibrahim 2011). Le système agri-alimentaire a lui aussi évolué avec un mouvement fort initié par l'association *Pour une agriculture du vivant* et un conseiller privé pour coordonner les efforts de R&D sur l'application des principes de l'agriculture de conservation des sols (Palm et al. 2014; Henneron et al. 2015) au maraîchage en plein champs et sous abris. En parallèle, le cluster du MIN a initié une démarche collective, avec des producteurs, mais sans agronomes, de demande d'adaptation du cahier des charges HVE aux cultures en "pleine terre" (par opposition aux cultures "hors sol"), en particulier de tomates.

2.2. Contributions au niveau du système de culture sous abris

Les principaux apports de ma thèse à cette échelle sont l'identification de trous de connaissances (Chap. 4, section 4.1). J'insisterai ici sur l'attente forte des producteurs et des acteurs du développement vis-à-vis de deux trous de connaissances :

- (i) Quels sont les effets des amendements organiques sur les bioagresseurs telluriques en maraîchage sous abris en fonction de leur nature (rapport C:N, niveau de compostage), de la période, de la fréquence et du dosage de l'apport ? Quels sont les rapports coûts-bénéfices ?
- (ii) Quels systèmes de culture en agriculture de conservation des sols (couvert temporaire et permanent, réduction du travail du sol) peuvent permettre de gérer les BT ? Quels sont les rapports coûts-bénéfices, en particulier en matière de complexité organisationnelle et d'augmentation du temps de travail ?

Sur le point (i), certains acteurs provençaux tendent à penser que les amendements en vrac sont plus intéressants pour la gestion des BT que les amendements conditionnés, ce qui est contredit par les producteurs d'amendements. Des éléments objectivés doivent être apportés par la R&D pour éclairer cette question. Sur les deux points, des recherches doivent être réalisées, en s'appuyant sur les travaux existants (Janvier et al. 2007; Mateille et al. 2008; Bonanomi et al. 2010; Klein et al. 2012; Klein et al. 2013; Stirling 2013; Silva et al. 2018), afin de

mieux comprendre les pratiques conduisant à former des sols suppressifs des BT sur le long terme et en contexte provençal.

Enfin j'ajouterai un élément qui me paraît important même si les participants de la démarche ne l'ont pas souligné : tester la technique de désinfection biologique des sols (aussi appelée « désinfection anaérobie des sols »). En effet, la R&D locale semble l'avoir mis de côté sans avoir objectivé ce choix, malgré sa capacité reportée dans la littérature à stimuler durablement la capacité des sols à supprimer les BT, sans impacter le rendement des cultures, voire en l'améliorant (Roskopf et al. 2015; Gamliel and van Bruggen 2016). De plus, cette pratique est déjà en circulation parmi les maraîchers sous la forme d'une inondation des sols sur plusieurs semaines, *a priori* moins efficace et plus coûteuse.

2.3. Contributions au niveau de l'exploitation maraîchère

À l'échelle de l'exploitation, mes travaux permettent d'identifier différentes options pour améliorer la gestion des BT. L'utilisation de serres mobiles peut être une solution intéressante dans le cas d'installations (Gamliel and van Bruggen 2016; Salembier et al. 2020), si les porteurs de projet ont la surface nécessaire. Elle pourrait permettre d'allonger la rotation avec des périodes où aucune culture hôte des BT n'est produite. Cependant, la conversion de serres existantes est probablement trop coûteuse.

La valorisation de la biomasse produite sur l'exploitation me paraît prometteuse, si le type d'amendement produit permet effectivement la gestion des BT. Le couplage avec une CUMA pourrait permettre d'amortir le matériel nécessaire comme montré par Lucas et al. (2018). La biomasse peut venir de plantes de services produites sous abris ou en plein champ, des résidus de cultures principales ou des haies. L'évaluation technico-économique de cette solution doit être réalisée de même que l'évaluation agronomique de son impact sur les autres facteurs de production (ex : impact sur la disponibilité en azote).

Réaliser des analyses biologiques fréquentes des sols pourrait permettre d'adapter les pratiques (Gamliel and van Bruggen 2016), dans la mesure des possibilités financières des exploitations.

Afin d'acquérir les connaissances nécessaires manquantes, faire appel à un conseiller indépendant des fournisseurs d'intrants et participer à des réseaux d'échange entre pairs sont des options à privilégier (Chantre and Cardona 2014; Mawois et al. 2019).

Enfin la combinaison de circuits de commercialisation aux exigences différentes, bien qu'elle génère de la complexité organisationnelle, peut permettre de plus grandes marges de manoeuvres quant aux choix de pratiques. Par exemple, elles peuvent permettre une récolte échelonnée et une diversification des cultures (Lefèvre et al. 2020).

2.4. Contributions au niveau du système agri-alimentaire maraîcher provençal

2.4.1. Favoriser la coopération dans le secteur maraîcher

Au niveau du système agri-alimentaire territorial, le principal frein pour améliorer la gestion des BT est la difficulté des parties prenantes à prendre en compte les besoins et contraintes des autres acteurs et à coopérer. Une manière de faciliter la coopération entre les acteurs du secteur agri-alimentaire maraîcher provençal autour de la santé des sols est de la poser comme un bien commun (Ostrom 1990) de l'ensemble du secteur maraîcher provençal, essentiel à l'activité de toutes les parties prenantes du secteur. Actuellement, la santé des sols semble considérée comme relevant de la seule responsabilité des agriculteurs, auxquels les autres parties prenantes ne donnent pas les moyens d'une gestion durable.

De plus, mettre en avant des « *success stories* » de coopération qui fonctionnent, telles que celles identifiées dans la traque aux innovations, en particulier des exemples provençaux, peut aider à convaincre les parties prenantes du secteur. Ces témoignages peuvent être réalisés dans les différentes arènes de communication des acteurs du secteur : congrès, salons agricoles, magazines agricoles, newsletters de fédérations (Interfel, Terralia), etc.

Enfin, je recommande de donner des clés aux parties prenantes du terrain pour construire des organisations collectives qui garantissent la confiance (ex : modes de fonctionnement limitant le problème de « *free riding* » dans les organisations - McCarter and Northcraft 2007). Ces clés pourraient s'inspirer des travaux d'Elionor Ostrom sur la formation d'organisations collectives pour gouverner des communs (Ostrom 1990) ou des travaux de sciences de gestion à l'échelle de la filière (McCarter and Northcraft 2007).

Dans tous les cas, l'enjeu est de favoriser une évolution culturelle des acteurs du secteur maraîcher provençal vers plus de coopération.

2.4.2. Des leviers inter-agriculteurs

Différentes idées de coopération me semblent prometteuses pour lever les freins au changement de pratiques. La mobilisation de coopératives de matériel agricole (CUMA) **entre maraîchers** ou entre maraîchers et autres agriculteurs peut permettre d'accéder au matériel nécessaire à la mise en œuvre d'apports d'amendements organiques (2.3). Ces coopératives seraient aussi le siège d'échanges de connaissances entre producteurs et de montage de nouveaux projets, comme le montre Lucas (2019). De nombreux exemples existent et peuvent servir d'inspiration. Néanmoins, une attention particulière doit être donnée au nettoyage des outils. S'il est *a priori* aisé d'éviter le transport de morceaux de terre hébergeant des BT pour du matériel d'épandage, de fauche, ou d'andainage, il est moins aisé pour des outils de travail du sol. On peut imaginer les solutions suivantes : (i) un protocole de nettoyage strict partagé, (ii) limiter les CUMA à des outils peu à risque. La mise en commun de ressources et l'échange ou la location de parcelles peuvent également être ponctuellement des leviers intéressants, si les

agriculteurs sont à une distance suffisamment courte, partagent une forte relation de confiance et, pour l'échange de parcelle, ont des systèmes de culture compatibles. Pour les échanges ou la location des parcelles, là aussi, la garantie du nettoyage des outils est clé.

2.4.3. Des leviers impliquant agriculteurs et metteurs en marché

Concernant la coopération entre **maraîchers et metteurs en marché**, un prérequis semble être la planification partagée entre les metteurs en marché et les producteurs, avec une prise en compte des spécificités agronomiques de chaque producteur. On a vu que le terroir provençal est constitué d'une diversité de conditions pédo-climatiques (Chapitre 4, Atelier 3, groupe « Diversification »). Les metteurs en marché pourraient s'appuyer sur ces différences naturelles afin de répondre à leurs besoins commerciaux tout en respectant les besoins d'une production ne désinfectant radicalement ses sols. Par exemple, ils pourraient tenir compte des dates de plantations optimales pour éviter les attaques de bioagresseurs (Collange et al. 2011), et du caractère suppressif de certains sols par rapport aux BT (Janvier et al. 2007). Cela faciliterait la production d'espèces sensibles. Des conseillers agricoles (en interne ou en externe) peuvent accompagner cette prise en compte des problèmes agronomiques comme observé dans les innovations de la 3^{ie} catégorie dans la traque "(Re)structuring of the food value chain to support the implementation of agroecological farming practices" (Chap. 2). Cette planification partagée ouvre ensuite la porte à de multiples coopérations possibles, par exemple l'échange d'espèces cultivées entre producteurs selon les problèmes de BT rencontrés (Chap. 4).

2.4.4. Des leviers impliquant agriculteurs et fournisseurs d'intrants

Entre **maraîchers et fournisseurs**, une meilleure communication autour des besoins techniques des producteurs paraît nécessaire. Par exemple, un échange entre producteurs et pépiniéristes autour des bioagresseurs principaux auxquels les producteurs font face et les variétés résistantes correspondantes pourrait permettre un meilleur choix variétal de la part des maraîchers. Des conseillers agricoles indépendants des fournisseurs peuvent accompagner les deux parties, par exemple en formant les pépiniéristes et en sensibilisant les producteurs à l'importance et aux critères des choix variétaux. Un achat coordonné entre plusieurs producteurs partageant les mêmes problématiques pourrait faciliter le travail des pépiniéristes. En effet, cela leur permettrait de réaliser des économies d'échelle, rendant ainsi la production de nouvelles espèces et variétés acceptable pour les pépiniéristes. Il en est de même pour les coopératives distribuant les intrants, qui ne peuvent rendre accessibles de nouvelles références que si elles ont connaissance d'une demande suffisamment importante de la part des maraîchers (ex : disponibilité du Sorgho *Piper*, Sorgho *Jumbo Star*). Des exemples de ce type d'organisation existent à petite échelle (Chap2) et peuvent servir d'inspiration.

2.4.5. Des leviers impliquant l'ensemble des parties prenantes

Afin de faciliter le montage de ce type de projet collectif multi-acteurs, des intermédiaires sont nécessaires (Prost et al. 2016; Berthet and Hickey 2018; Kivimaa et al. 2019a). Ces intermédiaires peuvent être de différentes natures : chambre d'agriculture régionale, cluster, fédération, association, programmes agri-alimentaires des collectivités territoriales, des entreprises privées. Pour le maraîcher provençal, j'ai identifié plusieurs acteurs pouvant d'ores et déjà jouer ce rôle : le cluster du marché d'intérêt national de Châteaurenard dont le rôle est de coordonner des projets multi-acteurs pour la production légumière et fruitière du territoire ; l'association *Pour une Agriculture du Vivant* qui cherche à fédérer les acteurs de la filière et la R&D autour d'une dynamique de transition vers l'agriculture de conservation des sols centrée sur le maintien d'une bonne santé des sols ; ou encore la GEFEL, fédération des organisations de producteurs, chargée entre autre des bonnes relations commerciales dans la filière, de l'ouverture de marché, d'aider à la production durable de produits de qualité, de la communication et de la promotion des produits (Faburel 2020).

Certains aspects de collaboration entre parties prenantes n'ont pas été abordés et mériteraient d'être creusés comme la possibilité d'une coordination entre sélectionneurs, pépiniéristes, metteurs en marché et R&D afin de développer des variétés répondant à un compromis satisfaisant entre qualité commerciale et qualité agronomique (en particulier résistances) qui permettent de diminuer l'usage de produits phytosanitaires.

2.4.6. Rôle de la R&D publique

De nombreux maraîchers sont encore en dehors des réseaux de la R&D publique qui produit et diffuse les connaissances sur la gestion des BT de manière indépendante des intérêts commerciaux (Atelier 3, Chapitre 4). Il y a donc un enjeu à comprendre pourquoi ces maraîchers ne mobilisent pas cette source de connaissances techniques et y remédier de manière à assurer une meilleure circulation des connaissances. Enfin, il est clair que des données technico-économiques comparatives entre l'usage des nématicides et des techniques alternatives permettraient une meilleure diffusion de ces dernières (Mawois et al. 2019). Une première étape serait de sensibiliser l'ensemble des maraîchers aux conséquences des problèmes causés par les BT, souvent moins visibles et donc moins prioritairement pris en compte que les bioagresseurs aériens. Comme suggéré au cours des ateliers, leur fournir des outils de suivi des BT dans leur sol leur permettrait probablement de gagner en autonomie et de mieux anticiper ces problématiques.

2.4.7. Rôle des politiques publiques

D'après les résultats de ma thèse, les politiques publiques pourraient intervenir à plusieurs niveaux : (i) soutenir les projets collectifs sus-cités, (ii) inciter les maraîchers à mettre en œuvre des techniques agroécologiques de gestion des BT. Concernant le premier point, les politiques publiques soutiennent déjà en partie les projets collectifs, à travers, par exemple, les groupes opérationnels du PEI-agri. Concernant le second point, les maraîchers pourraient être

indemnisés pour la mise en œuvre de pratiques agroécologiques alternatives aux pesticides. Cette indemnisation pourrait être établie sur le long terme si ces pratiques impliquent une perte économique sur le long terme. C'est la logique du financement des agriculteurs pour service environnemental. Si ces pratiques permettent une rentabilité économique supérieure ou similaire à celle des nématicides, l'indemnisation pourrait être transitoire, le temps de la maîtrise par l'agriculteur de ces nouvelles pratiques. Dans ce cas l'indemnisation aiderait les agriculteurs ayant une aversion pour la prise de risque à tester ces nouvelles pratiques. La source de financement pourrait être une écotaxe sur les légumes (Chap. 4) ou bien la Politique Agricole Commune, dont l'orientation au financement par hectare du premier pilier met les maraîchers produisant sous abris hors de portée des mesures incitatives du second pilier.

3. La reconception multi-échelle de systèmes agricoles pour accompagner le changement de pratiques : apports méthodologiques

Cette thèse propose des apports méthodologiques pour l'identification des freins, ressources et leviers pour le changement de pratiques (Chap. 1), la caractérisation d'innovations couplées (Chap. 2) et la coconception multi-échelle de solutions pour faciliter le changement de pratiques (Chap. 3&4). Ces apports sont discutés individuellement dans les chapitres correspondants. Je propose ici de revenir sur l'articulation des différents dispositifs méthodologiques pour alimenter le processus de coconception multi-échelle de solutions (3.1). Puis, je discute la manière dont j'ai organisé la participation des parties prenantes tout au long de ma démarche (3.2). Je reviens ensuite sur l'évaluation des innovations couplées (3.3). Je continue en proposant des pistes méthodologiques pour poursuivre ce travail de conception jusqu'à l'implémentation (3.4). À la lumière de ces discussions, je formalise une nouvelle proposition de démarche, tel que je la mettrais en œuvre si je devais refaire ce travail (3.5).

Dans les sections suivantes, j'indique les pistes de recherche que je recommande de creuser en *italique*.

3.1. Articulation des dispositifs

3.1.1. Apports de l'articulation des dispositifs

L'articulation des quatre principaux dispositifs méthodologiques mis en œuvre dans ma thèse est résumée Figure 32. **L'analyse sociotechnique** a permis de constituer une base de connaissances nous permettant d'initier d'une part la **traque aux innovations** et d'autre part la **démarche de coconception**. En effet, elle a permis de caractériser : (i) les pratiques et techniques conventionnelles et agroécologiques de gestion des NàG, (ii) les freins au changement de pratiques, (iii) les ressources existantes sur le territoire pour lever ces freins, (iv) les parties prenantes jouant un rôle dans l'évolution des pratiques, (v) les relations systémiques entre les précédents éléments et les processus sociotechniques sous-jacents, (vi) les leviers

sociotechniques potentiels pour dépasser les freins et le verrouillage identifiés. Nous avons ainsi pu identifier et caractérisé des innovations couplées (et non couplées) permettant *a priori* de mobiliser ces leviers (item vi) et dépasser ces freins (items ii et v), en maraîchage provençal comme dans d'autres contextes, via la **traque aux innovations**. Un **collectif de coconception** mobilisant des représentants des différentes parties prenantes a également pu être réuni sur la base des parties prenantes identifiées (item iv). Les connaissances acquises ont pu être traduites et partagées **avec ce collectif** *via* divers supports : (a) posters techniques, (b) représentation multi-échelle d'exploitations maraîchères et leur environnement sociotechnique, (c) jeu de rôle sérieux *Soilh&Co*. Les **ateliers de coconception** (chapitre 4) ainsi organisés ont permis de préciser et valider **l'analyse sociotechnique**. La **traque aux innovations** a permis de produire des connaissances mobilisées de trois manières dans le **processus de coconception** : (i) la conception du jeu sérieux en apportant des éléments pour le rendre rapidement et facilement adaptable, (ii) en aidant les animateurs à guider l'activité de coconception lors des échanges, (iii) en suggérant des idées décalées aux participants à l'oral et par une présentation préalable (Ateliers 1) ou *via* les cartes-concepts (Atelier 3) (Fig. 32). A noter cependant que seulement une partie de la **traque** a pu être remobilisée dans les **ateliers de conception**, la formalisation des connaissances qui en sont issues n'ayant pu être finalisée qu'après le dernier atelier. Enfin le **jeu sérieux** a joué un rôle clé dans le **processus de conception**, en permettant la constitution rapide d'un collectif hétérogène d'acteurs travaillant dans un climat de confiance, créatif, avec une base de connaissance commune sur le problème traité.

L'ensemble de ce processus a permis plusieurs sorties opérationnelles :

- (i) l'accroissement de la compréhension de ce qui freine la gestion agroécologique des sols en maraîchage provençal pour une diversité de parties prenantes ;
- (ii) l'identification d'une diversité d'innovations existantes pouvant être remobilisées par les parties prenantes du maraîchage provençal voir au-delà ;
- (iii) la conception d'une diversité de concepts de solutions innovantes (50) incluant 32 innovations couplées simples et alimentant 9 innovations couplées complexes. Ces dernières ont pour objectif de faciliter la gestion agroécologique des NàG et de la santé des sols maraîchers et sont remobilisables par les parties prenantes du problème ;
- (iv) la mobilisation d'une diversité de parties prenantes sur ce sujet ;

L'effet de ces différentes sorties sur le SATS étudié reste à évaluer.

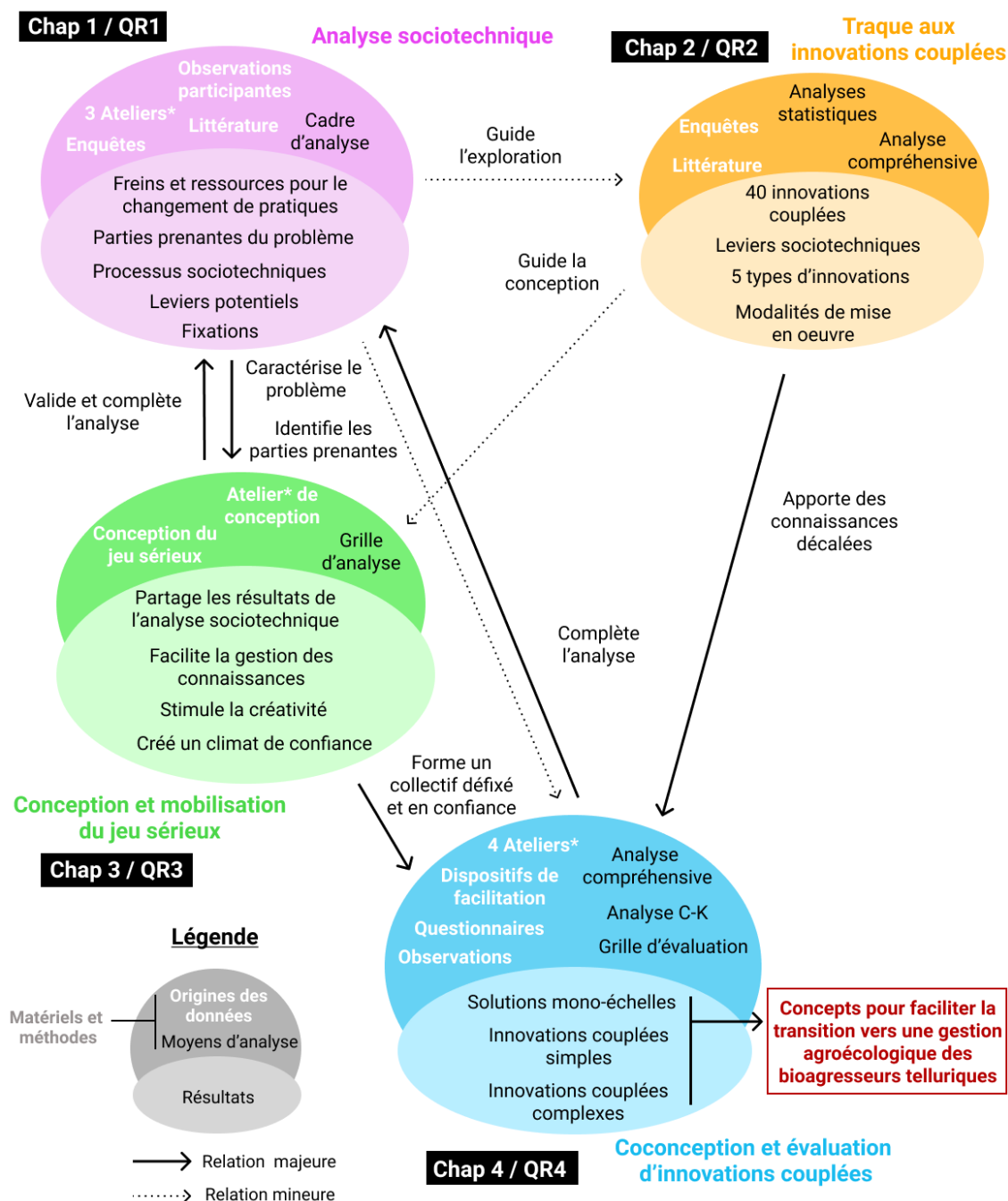


Figure 32 - Articulation entre les différents dispositifs de la thèse. L'astérisque * après la mention des ateliers signifie que ces ateliers sont les mêmes : l'atelier de conception où le jeu sérieux a été utilisé est un de ceux qui ont alimenté l'analyse sociotechnique.

3.1.2. Limites de l'articulation des dispositifs

L'articulation entre les différents dispositifs présentés en Figure 32 pourrait être améliorée. Je présente ici cinq limites :

(1) Les connaissances acquises lors de la traque pourraient être remobilisées pleinement en atelier de conception, de différentes manières : (i) par une présentation des différents types

d'innovations caractérisés au Chapitre 2 et de certains exemples par les chercheurs, (ii) par un témoignage sur le fonctionnement de ces innovations couplées réalisé par un ou plusieurs parties prenantes, (iii) par une meilleure mobilisation des cartes de l'atelier 3. *Je fais l'hypothèse, à tester dans de futurs travaux, que cela permettrait d'une part une meilleure défixation des parties prenantes, favorisant la **générativité** lors de la conception de novo (Agogué et al. 2014b; Hatchuel et al. 2017) et d'autre part que cela faciliterait la conception pas-à-pas en fournissant des témoignages d'exemples concrets de mise en œuvre des innovations (Toffolini 2016).* Cette double utilité me semble être illustrée par plusieurs interventions de participants rejetant certaines idées lors des ateliers de conception. Ils considéraient ces idées comme irréalistes. Je l'illustre par une discussion retranscrite dans l'Encadré 6 sur l'échange de parcelles pour l'introduction d'une culture mauvaise ou non-hôte, lors du second atelier. La présentation des innovations de type 4 (mutualisation des ressources) et 5 (échanges et locations de parcelles) dans les résultats de la traque aurait pu permettre de lever ce blocage à l'aide d'exemples concrets.

Encadré 6 Échange entre participants de l'atelier 2 montrant une situation où l'apport d'un témoignage sur « une situation qui marche » aurait très probablement été défixante

Facilitateur : est-ce qu'on peut penser que les 2 types de maraîchers peuvent échanger leurs parcelles. L'un produit son melon chez l'autre et inversement

Participant 1 : ça se finit à coup de fusil ça

Participant 2 : Y a un problème de surface, de rentabilité, faut penser aux compensations

Participant 1 : ça veut dire que le producteur n'est plus maître de sa terre, faudrait qu'il soit locataire de son lieu de travail

Participant 3 : c'est ce qui se fait dans l'Hérault pour le melon, ils font des locations et ils tournent sans arrêt.

Participant 4 : c'est des locations, ils échangent pas, c'est toujours la même culture qu'est faites, ça ne revient pas au même

Participant 5 : ça se fait aussi dans certains départements avec les salades

Facilitateur : et si ça passe par des locations est-ce que ce serait possible ?

[...]

Participant 1 : Je te prête ma terre, tu me prêtes ta terre, avec la communication des êtres humains, ...

(2) J'ai orienté l'exploration de solutions innovantes de manière à couvrir l'ensemble des freins au changement de pratiques. Ceci nous a conduit à explorer une grande diversité de solutions innovantes, mais a limité l'exploration détaillée des plus prometteuses. Cette stratégie d'exploration « en largeur » a l'intérêt d'ouvrir l'espace des possibles avant de choisir les pistes les plus prometteuses (Agogué et al. 2014a). Elle maximise la créativité. Une stratégie alternative aurait pu être de focaliser l'exploration autour d'une fixation identifiée (Section 1., ex : l'indépendance des parties prenantes) de manière à générer un nombre d'alternatives limitées. Nous aurions ensuite pu choisir une piste et la creuser, par exemple : une planification collective d'un bassin d'approvisionnement prenant explicitement en compte la gestion des BT. Cela aurait limité l'ouverture des possibles, mais conduit plus rapidement à un prototype opérationnalisable (Agogué et al. 2014a). Cette stratégie est illustrée par le travail de Ravier et

al. (2017) qui explicitent une stratégie de conception innovante explorant « en profondeur » (Agogué et al. 2014a), pour la conception d'une méthode de fertilisation azotée du blé.

(3) J'ai mené l'analyse de manière relativement détaillée du système de culture au SATS et paysage sociotechnique. Néanmoins, lors de la traque et de la conception, j'ai peu cherché à détailler les systèmes de culture et systèmes de productions innovants, que j'ai considéré connus par la R&D. Ma démarche s'est donc focalisée sur l'échelle du SATS et son articulation avec les échelles du système de production (exploitation) et du système de culture (parcelle). Or, lors de l'analyse sociotechnique, nous avons identifié des pratiques ou systèmes de culture innovants peu étudiés par la R&D locale. Par exemple, plusieurs agriculteurs pratiquaient l'inondation et d'autres le « traitement de choc », qui est une combinaison de pratiques agroécologiques mises en place (ex : solarisation, culture non hôte, engrais vert biofumigant) lorsqu'ils ont identifié pour la première fois des dégâts de NàG. Elle a permis, selon eux, d'éliminer durablement la pression de NàG. *Je pense donc qu'il y aurait une synergie fructueuse à combiner une traque aux innovations à l'échelle du SAT telle que décrite en chapitre 2 avec une traque aux systèmes de culture innovants telle que présentée par Salembier et al. (2016) et Verret et al. (2020). De même, une piste de recherche future serait d'enrichir la démarche de coconception proposée en chapitre 4 avec une démarche de conception à l'échelle des systèmes de culture et de production tels que formalisée par Reau et al. (2012) (en grande culture) et Navarrete et al. (2017) (en maraîchage) d'une part, et par Richard et al. (2020) d'autre part.*

(4) L'ensemble de la démarche a été appliqué à un cas d'étude peu spatialisé et mono-sectoriel. *Comment se traduirait en termes de méthodologie, de l'analyse à la conception, le travail sur un cas d'étude avec une forte dimension spatiale et/ou plurisectorielle ? Je peux imaginer que des outils d'analyse des relations spatiales et de représentations de ces dernières devraient venir compléter les outils proposés dans cette thèse.* Della Rossa et al. (2020) en donne une illustration, avec une démarche combinant analyse sociotechnique et coconception multi-acteurs de solutions trans-sectoriels pour limiter la pollution d'un bassin versant martiniquais. Le projet TATA-Box en donne une autre pour l'accompagnement de la transition agroécologique sur les territoires du Midi-Quercy et du Tarn-Aveyron en suivant les objectifs propres des parties prenantes mobilisées (Audouin et al. 2018).

(5) Ce travail de thèse a été mené et encadré uniquement par des agronomes systèmes, et l'essentiel de l'effort d'analyse, de traque et de conception s'est concentré sur les systèmes de culture et de production, ainsi que sur l'agriculteur et son interaction avec les autres acteurs du SATS. Un travail interdisciplinaire mobilisant par exemple des sciences de l'entreprise et des organisations pourrait éclairer les logiques internes et les actions des acteurs non-producteurs. Il enrichirait ainsi, d'une part la compréhension du problème complexe étudié et des innovations traquées, d'autre part les solutions conçues. Ce besoin d'interdisciplinarité pour traiter de problèmes complexes de changement de pratiques agricoles est souligné par de nombreuses études (ex : Meynard et al. 2017; Romera et al. 2020).

3.2. Dimension participative

L'ensemble de la démarche de thèse que je propose est un processus participatif, mais à différents niveaux. La définition du problème, l'analyse sociotechnique et la traque aux innovations ont été faites de manière consultatives (Probst et al. 2003), *i.e.*, j'ai fait les choix du problème à traiter et de la manière de le faire, j'ai tiré les conclusions sur la base des données récoltées en consultant les parties prenantes (enquêtes, observations participantes). J'ai mené la coconception durant les ateliers de manière collaborative (Probst et al. 2003), *i.e.*, en collaborant sur un pied d'égalité avec les participants des ateliers, favorisant l'échanges de connaissances et partageant les choix d'orientations des réflexions. Néanmoins, j'ai assumé le choix des objectifs de chaque atelier et des outils mobilisés avec mes encadrantes, de manière adaptative, en m'appuyant sur les connaissances récoltées dans les phases précédentes de la démarche, donc sur une démarche consultative.

3.2.1. Apports

L'approche consultative menée au cours de l'analyse sociotechnique (Chapitre 1) a permis de construire une analyse correspondant au réel perçu par les parties prenantes du problème. Cette analyse fut en grande partie validée grâce à la modélisation de ses résultats à travers le jeu sérieux et sa confrontation à de nouvelles parties prenantes (Chapitre 3). Cette pertinence du sujet traité vis-à-vis de la réalité du terrain et les apports en connaissances réalisés lors des ateliers ont permis de mobiliser les maraîchers puis les autres acteurs, comme le montrent Pluchinotta et al. (2019) et Della Rossa (2020) dans leurs propres démarches de coconception. La consultation d'acteurs innovants lors de la phase de traque a ensuite permis de décrire des exemples concrets d'innovations à l'échelle du SAT couplées à la mise en œuvre de pratiques agroécologiques ou pouvant l'être (Chap 2). Au cours des ateliers de conception (chapitre 4), la démarche de collaboration a permis l'hybridation des connaissances au sein de collectifs d'acteurs hétérogènes couvrant la diversité des types d'acteurs parties prenantes du système (à l'exception des pépiniéristes et sélectionneurs, indisponibles). L'hybridation de connaissances entre cette diversité d'acteurs a permis à la fois une générativité dans les solutions proposées et une discussion sur la faisabilité concrète de ces solutions, comme montré par Martin (2015). De plus, ce processus de conception participative et d'hybridation des connaissances a permis de faire évoluer le cadre de pensée initial des participants, en particulier de faire évoluer leur perception du rôle et des besoins des autres parties prenantes (Chapitre 4, Atelier 2). Ce bénéfice se retrouve dans les démarches de type ComMod (Becu 2020; Della Rossa 2020).

L'hybridation entre parties prenantes des secteurs bio et conventionnel était particulièrement pertinente. En effet, la structuration du secteur conventionnel autour d'un marché de masse a permis d'illustrer les freins que génère une telle structuration : spécialisation des productions, prix bas, contraintes fortes d'homogénéité et de qualité visuelle conduisant à verrouiller les systèmes de production autour de pratiques intensives souvent peu durables. Or le secteur bio, par la conversion de nombreux agriculteurs et metteurs en marché

conventionnels pour des intérêts économiques évolue progressivement vers ce type de structuration. Travailler conjointement avec les deux secteurs a donc permis de poser une meilleure analyse pour le bio, en caractérisant plus finement vers quel type de structuration le bio s'oriente, quels en sont les risques et quels sont actuellement les atouts du bio par rapport au conventionnel pour éviter ces risques. Par exemple la meilleure communication entre producteurs et metteurs en marché soucieux des problèmes agronomiques sur les exploitations me semble être un point fort du secteur bio, par rapport au secteur conventionnel, bien qu'il ne soit pas totalement absent de ce dernier (Chap. 1). De plus certains leviers conventionnels ont pu inspirer des innovations applicables au bio, par exemple l'échange de parcelles, ou l'approvisionnement local en amendement organique. La principale limite pour le secteur maraîcher bio provençal pour ce type d'innovation était jusqu'ici une limite d'échelle, de nombre d'agriculteurs convertis, limitant par exemple la proximité spatiale entre deux producteurs bios. Cette limite est en train de tomber avec l'accroissement rapide des surfaces en bio. Inversement, étudier et mobiliser le secteur bio a permis d'apporter des connaissances fortement génératives, liées par exemple aux systèmes de culture innovants (ex : cultures associées poivron-ciboulette) ou encore à la coopération entre parties prenantes (ex : souplesse de la planification metteur en marché – producteur). Nous avons donc confirmé l'hypothèse initialement posée dans la section 4.3. de la problématique (Partie A) relative à l'intérêt de mobiliser conjointement acteurs bios et conventionnels.

3.2.2. Limites

Plusieurs études mettent en avant le besoin de prendre en compte non seulement le niveau de l'organisation (ex : le metteur en marché, la ferme, l'association, la structure de recherche), mais aussi le niveau individuel (ex : le PDG de l'entreprise, le responsable du service qualité, le conseiller agricole) (Duru and Therond 2014; Schut et al. 2015a). En effet, différents individus dans l'organisation vont avoir différentes connaissances à apporter, différentes représentations du problème, différents intérêts et différentes capacités d'action. Ceci a des conséquences très concrètes pour le processus de conception, par exemple le représentant du grossiste bio et le technicien mixte ayant accompagné ma démarche depuis le début de la thèse n'ont pas pu assister au dernier atelier du fait d'une réorientation des priorités par la direction de leur structure. On imagine alors le risque de faible remobilisation des idées émises lors des ateliers suite à ces changements d'orientation provenant de la hiérarchie. Il faudrait idéalement pouvoir mobiliser les acteurs pertinents au sein des structures identifiées comme intéressantes pour la problématique, mais aussi ceux qui ont le pouvoir de mettre en œuvre les idées émises. Cela demande un engagement important de la part des dites structures qui ne peut se penser qu'en préparation du projet de coconception. Des acteurs intermédiaires peuvent pour cela être mobilisés, tels que des fédérations d'acteurs (ex : GEFel, INTERFEL) et des plateformes multi-acteurs (ex : Cluster du Marché d'Intérêt National) afin de faciliter l'engagement des organisations et individus.

De plus la question de quels acteurs mobiliser dans chaque phase est clé. Nous avons ici fait le choix de mobiliser les acteurs du régime dominant (secteur "conventionnel"), d'un régime

alternatif (secteur bio) et de niches innovantes (réseau promouvant l'agriculture de conservation, cluster du MIN) lors de l'analyse et de la conception. Les hypothèses sous-jacentes étaient que cela permettait de combiner générativité (hypothèse confirmée) et capacitation des parties prenantes du régime dominant pour le faire évoluer (hypothèse à évaluer). Meynard et al. (2017) mettent en avant l'intérêt de concevoir dans une niche d'innovation afin de s'affranchir de la pression de sélection du régime dominant ne permettant que des innovations incrémentales venant renforcer le régime dominant. Néanmoins, la différenciation entre acteurs de niches et du régime dominant n'est pas si claire dans le domaine agricole. Les innovations, même radicales, proviennent souvent de réseaux d'acteurs en forte interaction avec le régime dominant (Bui et al. 2016; Belmin et al. 2018), ce qui va dans le sens de l'approche que j'ai présenté dans cette thèse.

L'absence d'inclusion des parties prenantes dans les processus de définition du problème et de choix des objectifs et outils de travail pourrait expliquer la difficulté à conserver un collectif de coconception stable d'un atelier à l'autre d'après Barreteau et al. (2010). Cette difficulté est mentionnée dans d'autres démarches de coconception (Pluchinotta et al. 2019; Della Rossa 2020). En effet, cette implication dans le processus décisionnel renforce l'acceptabilité et la légitimité de la démarche proposée aux yeux des parties prenantes (Barreteau et al. 2010). Ce renouveau des participants renforce le problème courant de la remobilisation des connaissances issues des ateliers précédents. Ce fut le plus flagrant entre l'atelier 2 qui a produit de nombreuses idées et l'atelier 3 qui devait permettre de les approfondir (Chap. 4). Les connaissances capitalisées lors des phases précédentes devraient alors être rappelées par une présentation et des objets intermédiaires aisément accessibles.

Un équilibre doit être trouvé entre participation des acteurs, ressources disponibles de l'équipe de facilitation et des participants, et atteinte des objectifs. Cet équilibre n'a pas toujours été atteint dans la démarche que j'ai proposée. Par exemple, j'ai peu retravaillé les idées des parties prenantes entre ateliers de manière à rassurer leur légitimité et à renforcer leur accessibilité au cours de l'atelier suivant. Or, après s'être construit une connaissance fine et systémique du problème, l'agronome système a une légitimité à retravailler ces idées pour les trier, les améliorer et les combiner au vu de ses connaissances, au-delà de la simple formalisation. De plus, le renouvellement des participants a rendu peu pertinente l'hypothèse que des idées « familières » des ateliers précédents soient facilement remobilisées par les participants de l'atelier suivant. Les idées, les modifications éventuelles réalisées et leur logique sous-jacente doivent être communiquées de manière claire et transparente aux (nouveaux) participants afin de garantir leur légitimité et leur accessibilité (Barreteau et al. 2010).

3.3. L'évaluation des solutions multi-échelles

L'évaluation des innovations couplées a été faite *a minima* lors de la traque comme lors de la démarche de conception. Lors de la traque, une auto-évaluation a été faite par les parties prenantes des innovations caractérisées (Chapitre 2). Lors de la conception, les innovations couplées conçues ont été discutées par les concepteurs et les participants des autres groupes (pour les ateliers 2 et 3). En atelier 3, cette évaluation s'est basée sur une grille réunissant les

critères des parties prenantes identifiées grâce aux données de l'analyse sociotechnique et des ateliers précédents. De telles évaluations permettent d'avoir une réflexivité par rapport aux solutions proposées ou étudiées, mais ne permettent pas d'établir une évaluation robuste sur leur impact agronomique, écologique, économique et social aux différentes échelles. Je rejoins donc Romera et al. (2020) : « L'élargissement des limites du système [...], par rapport à une focalisation plus classique sur le terrain ou au niveau de l'exploitation, nécessite la mise à l'échelle d'outils d'analyse et de modélisation ».

Pour pallier cette limite je propose pour la traque comme pour la conception de mobiliser les outils d'évaluation développés pour l'évaluation des systèmes de culture innovants (Reau et al. 2012). Dans la perspective d'une traque et d'une conception détaillant les systèmes de culture mis en jeu (2.1), ces outils devraient permettre d'évaluer l'impact de l'ensemble des innovations couplées ou des stratégies conçues sur le problème agronomique traité (dans cette thèse : la pression en BT et en particulier en NàG). Pour le cas de la gestion des BT en maraîchage sous abris, le modèle d'évaluation qualitatif multicritère DEXi (Navarette et al. 2010; Bages 2011) en cours de finalisation par Romain Roche (Écodéveloppement INRAE) pourrait être utilisé. Cependant, deux problématiques doivent être traitées.

La première est que l'intégration de ces évaluations au niveau du système de culture et de l'exploitation à l'ensemble d'un territoire n'a rien d'évident. Reprenons l'exemple d'un échange de cultures entre deux producteurs : le producteur A, touché par les NàG, échange une culture de tomate contre une culture de cébette mauvais ou non-hôte avec le producteur B, non touché. L'effet sur les NàG pour le producteur A peut être facilement évalué, mais qu'en est-il de l'effet sur le système du producteur B ? Si cet échange résulte en une augmentation de la pression pour un autre BT, comment intégrer ces effets ? Si on ne les intègre pas comment présenter ces différents effets quand il ne s'agit plus de 2 producteurs, mais de 30 producteurs livrant à un même metteur en marché qui décide de prendre en compte les problèmes agronomiques rencontrés par ses producteurs dans la planification des espèces cultivées ? La seconde problématique est de concilier robustesse de l'évaluation et générativité dans l'exploration des innovations (Meynard et al. 2012; Berthet et al. 2015). Je suggère de tester la réalisation d'une évaluation réflexive au cours de l'atelier, telle que celle proposée en atelier 3, et une analyse robuste après l'atelier restituée ultérieurement aux participants. Cela reste une piste de recherche à explorer.

3.4. La génération de concepts et puis ?

Je présente dans la discussion du chapitre 4 une proposition de poursuite de la démarche de conception en trois étapes : (i) partager les trous de connaissances pour initier des projets de recherche, (ii) sélectionner les concepts d'innovations les plus prometteurs et établir une stratégie collective pour passer de ces concepts à des prototypes (Atelier P de la méthode KCP - Hatchuel et al. 2009), (iii) ancrer ces prototypes au sein du système agri-alimentaire maraîcher provençal dans un réseau d'acteurs motivés afin de constituer une niche d'innovation, puis lier cette niche aux réseaux, institutions et technologies existantes (Bui et al. 2016; Elzen and Bos 2019). S'inspirant de Della Rossa (2020), ce prototypage pourrait être aidé par le jeu *Soilh&co*

en simulant la mise en œuvre des concepts d'innovations complexes qui seront sélectionnés. L'utilisation d'une stratégie d'évaluation telle que décrite ci-dessus serait également utile à un tel processus. J'ajouterais ici qu'il serait intéressant de suivre l'effet de cette démarche de conception sur le SAT et la gestion des BT. Cela pourrait se faire en réalisant des enquêtes semi-directives avec les parties prenantes impliquées dans la démarche afin de comprendre ce qu'elles ont retiré de cette expérience et comment cela influence aujourd'hui leurs actions. Cela permettrait non seulement d'évaluer l'effet opérationnel du travail réalisé, mais aussi de suivre comment les parties prenantes poursuivent la conception dans l'usage au sein du SAT (Béguin and Cerf 2004; Romera et al. 2020).

3.5. Et si c'était à refaire ? Proposition d'une démarche de coconception multi-échelle de solutions pour faciliter le changement de pratiques

Sur la base des limites identifiées ci-dessus je propose une révision de la démarche décrite dans ma thèse afin de proposer une démarche générique pour nourrir d'autres travaux souhaitant faciliter le changement de pratiques dans une situation a priori verrouillée (ex : de chercheurs, d'institution publique, association ou cabinets de conseil). Les étapes de cette démarche seraient mises en œuvre en partie simultanément, comme montré dans ma thèse, voire de manière itérative, comme pour la méthode RIO (Romera et al. 2020).

Étape 0 : Connaissance initiale du contexte du problème étudié. Cette connaissance peut être liée à une expérience préalable du terrain d'étude par les facilitateurs ou à un diagnostic initial rapide. Ce diagnostic rapide pourra être réalisé par la consultation de la littérature scientifique et grise existante, quelques enquêtes ciblées auprès de parties prenantes ayant une vision d'ensemble. Il doit permettre d'identifier les principales parties prenantes du problème initial posé et ses contours, i.e., pratiques concernées, principaux systèmes de culture, niveau de dommage réalisé. Pour plus d'information, l'Annexe A correspondant à mon guide d'enquête initial peut être consulté.

Étape 1 : Coconstruction du problème traité. Le problème initial posé peut venir des facilitateurs (c'est le cas dans ma thèse) ou de parties prenantes du problème (ex : Romera et al. 2020). Dans les deux cas, un premier atelier avec les parties prenantes identifiées doit permettre de coconstruire le problème qui sera traité dans la suite de la démarche, et, dans les grandes lignes, le dispositif pour le traiter. Cet atelier doit également permettre d'identifier les parties prenantes manquantes à mobiliser dans la suite du processus. Les travaux du groupe ComMod (Etienne 2009; Étienne 2013) et du projet TATA-Box (Audouin et al. 2018) peuvent être inspirant pour cette phase.

Étape 2 : Analyse sociotechnique. Je propose de reprendre la démarche présentée chapitre 1, mais en proposant d'abord un atelier intégrant tous les types de parties prenantes, inspiré de l'atelier « étape 1 » de ma thèse. Il serait structuré en trois temps : (1) présentation des pratiques agroécologiques alternatives, (2) échange sur l'intérêt de ces pratiques et les freins à

leur mise en œuvre avec les différents groupes de parties prenantes, (3) exploration de solutions basées sur une représentation du système de culture, de l'exploitation et de son système sociotechnique environnant. Cette représentation serait basée sur l'étape 0 éventuellement complétée par quelques enquêtes d'agriculteurs pour préciser des points d'intérêt. Suivant les recommandations de Schut et al. (2015a), cet atelier pourrait comporter des phases de groupes homogènes (ex : groupe agriculteur, groupe aval de la filière, groupe amont, groupe R&D ; temps 1 et 2) et hétérogènes (temps 3). Comme le suggère Barrett et al. (2017), débiter par ce type d'atelier collectif devrait permettre d'explorer une grande partie du problème et ainsi de mieux cibler les enquêtes et les réunions auxquelles participer, dans un second temps. Il permettrait aussi, comme l'atelier « étape 1 » de ma thèse, d'initier le partage de connaissances et la conception. Au final, cela devrait accélérer la démarche. Cette analyse devrait également permettre d'identifier des systèmes de culture innovants et des innovations techniques, organisationnelles ou institutionnelles au niveau de l'exploitation et du SAT facilitant leur mise en œuvre.

Étape 3 : Traques aux innovations. La traque aux innovations peut ainsi se baser sur les innovations repérées lors de l'analyse sociotechnique (étape 2) et l'étendre par la méthode « boule de neige », ou encore par une recherche dans la littérature grise et scientifique (Chap. 2). Si possible elle doit mener de front la caractérisation des systèmes de culture innovants et des innovations aux échelles supérieures qui y sont liées. Cette double entrée devrait faciliter le repérage des innovations, la caractérisation de l'ensemble du système et une meilleure évaluation (voir 3.4).

Étape 4 : Conception du jeu sérieux. Cette étape, qui peut être menée en parallèle de la traque, consiste à modéliser les résultats de l'analyse réalisée afin de les partager avec les acteurs et d'initier le processus de conception. L'objectif est alors de favoriser conjointement la gestion des connaissances, l'exploration créative de solutions et la collaboration entre les parties prenantes. Elle peut s'inspirer de la démarche proposée dans le Chapitre 3 et de la démarche ComMod (Etienne 2009; Étienne 2013).

Étape 5 : Coconception et évaluation. Cette étape est composée d'une succession d'ateliers. L'atelier 1 est présenté dans la description de l'étape 2. L'atelier 2 correspond au jeu sérieux suivi d'une séance de coconception qui peut reprendre la démarche proposée dans les chapitres 3 et 4 pour l'atelier « étape 2 ». L'atelier 3 restitue les idées des ateliers précédents, retravaillées par l'équipe de facilitation, ainsi que les résultats de la traque. Il propose ensuite une démarche d'intégration de ces idées dans des stratégies de manière à répondre à des objectifs précis et choisis collectivement. Cet atelier peut être basé sur l'atelier « étape 3 »³⁶ décrit chapitre 4. Les objets conçus seraient discutés lors des ateliers, comme présenté lors de la thèse. Cependant ils seraient évalués de manière robuste entre les différents ateliers. Lors de la présentation des résultats des ateliers précédents et de la traque, l'évaluation serait aussi présentée. Un atelier de type P (P pour Projet) (Hatchuel et al. 2009) serait ensuite réalisé afin de préciser la stratégie

³⁶ Je suggère une simplification des cartes en ne conservant que le titre et l'objectif sur une face, et le reste des informations au dos, pour que les participants puissent rentrer dans le détail si besoin.

de conception pour la suite. Les concepts d'innovations couplées complexes sélectionnés pourraient ensuite être explorés plus en détail sur la base soit de l'objet intermédiaire de l'atelier « étape 1 » ou celui de l'atelier « étape 2 ». Dans le premier cas, il s'agirait de travailler sur la représentation d'une exploitation, cette fois-ci fictive et générique, afin de prendre de la distance, de mieux préciser et ancrer les concepts développés dans le réel. Dans le second cas, l'idée serait de remobiliser le jeu sérieux pour simuler la mise en œuvre des concepts d'innovations aux différentes échelles (3.4). Dans les deux cas l'objectif serait l'élaboration de prototypes d'innovations couplées complexes.

Étape 6 : Implémentation. Cette phase consiste à passer du prototype d'innovation à l'innovation implémentée. Elle consiste au triple ancrage décrit dans la section précédente (réseau, institution, technologie, 3.5) et dont la mise en œuvre pourrait s'inspirer des travaux de Elzen and Bos (2019) sur la méthode de conception interactive et réflexive (méthode RIO).

Cette nouvelle proposition de démarche devrait être testée sur des problèmes de changement vers des pratiques agroécologiques confrontés à un verrouillage du régime sociotechnique dominant. Je fais l'hypothèse qu'elle pourrait être applicable à des problématiques agronomiques de protection des cultures autres que la gestion des BT (adventices, bioagresseurs aériens), à d'autres types de pratiques (ex : les pratiques de fertilisation) et à d'autres systèmes de productions végétales assolées (ex : céréaliculture).

Enfin, les outils utilisés comme objet intermédiaire (représentation évolutive de l'exploitation et son environnement sociotechnique de l'atelier 1 ; jeu sérieux de l'atelier 2 ; tableau de structuration des innovations couplées complexes avec les cartes « solution » utilisées en l'atelier 3) pourraient être remobilisés pour d'autres usages. Par exemple, la représentation évolutive de l'exploitation pourrait être mobilisée dans le cadre d'ateliers d'accompagnement des producteurs par des conseillers agricoles (intérêt manifesté de la part de l'ITAB). Le jeu sérieux peut être utilisé pour l'éducation (trois cours déjà réalisés basés sur *Soilh&co*). La réalisation d'un guide d'utilisation et d'une vidéo explicative est prévue.

4. Apports théoriques à l'agronomie système

Dans cette partie, j'explicite les apports théoriques pour la conception multi-échelle en agronomie système, appliquée aux problèmes de changement des pratiques agricoles pour une amélioration de leur durabilité. Je contribue à trois niveaux : (i) l'analyse du problème agricole complexe comme base à la reconception, (ii) l'analyse des systèmes innovants pour créer des connaissances remobilisables en conception et (iii) la coconception de systèmes innovants adaptés à un contexte agricole précis.

Dans les sections suivantes, j'indique les pistes de recherche que je recommande de creuser en *italique*.

4.1. Apports pour l'analyse des pratiques et leur évolution comme un problème agricole complexe

Dans la suite des travaux de Belmin (2016), je propose un **cadre conceptuel et analytique** multi-échelle centré sur les pratiques agricoles prenant en compte l'ensemble des déterminants et processus sociotechniques jouant un rôle direct ou indirect important dans le choix des pratiques. Ce cadre participe ainsi au **renouvellement des approches d'analyse** existantes en agronomie, essentiellement mono-acteurs et mono-échelles (Schut et al. 2014; Belmin 2016) (détaillées Partie A, section 1.). Je conceptualise ainsi les pratiques agricoles comme résultant d'un ensemble d'interactions opérant au niveau de la parcelle (au sein du système de culture), de l'exploitation (au sein du système de production), du territoire (au sein du système agri-alimentaire territorial) et au-delà (paysage sociotechnique) (Fig. 1, Problématique). Ce cadre sert de base pour toute la suite du processus de conception.

Dans ce cadre j'ai proposé le concept de « **système agri-alimentaire territorial et sectoriel** » comme un concept intégrateur, permettant de désigner l'ensemble des parties prenantes du problème de changement de pratiques au niveau territorial (échelle clé des systèmes agricoles) et au-delà (filières, institutions, recherche). Il permet aussi de délimiter ce système d'acteurs afin d'en exclure les acteurs du système agri-alimentaire territorial ne prenant pas part à la production, à la transformation, à la R&D, à la régulation et au transport du secteur étudié (ex : production de légumes sous-abris, blé panifiable). Néanmoins, il présente deux limites : (i) il ne permet pas de traiter de problématiques trans-sectorielles et/ou (ii) les problématiques fortement spatialisées (ex : pollution aux herbicides d'un bassin versant par des productions légumières, de canne à sucre et de bananes - Della Rossa et al. 2020). Néanmoins je pense qu'il pourrait être adapté pour dépasser ces limites. Concernant les problématiques trans-sectorielles, le retour au concept de système agri-alimentaire territorial (Lamine 2012) permettrait de tenir compte de l'ensemble des acteurs des différents secteurs concernés. Concernant la spatialisation, le problème est double. Il renvoie d'une part à la dimension spatiale des relations entre les parties prenantes (ex : distance entre agriculteur limitant l'échange de matériel) et d'autre part à celle des dynamiques paysagères du territoire (ex : flux de ravageurs aériens). Dans les deux cas, la prise en compte de la dimension biophysique aux différentes échelles dans la classification des déterminants que j'ai proposé (Chap 1, Table 3) permet de prendre en compte des éléments sociaux favorisant ou limitant le changement de pratiques. *Il pourrait être complété au niveau méthodologique par des outils cartographiques pour l'étude des dynamiques paysagères. Afin d'affiner ce cadre d'analyse et de confirmer sa pertinence, il doit être de nouveau testé, sur des cas d'études proches de celui de ma thèse et sur des problèmes trans-sectoriels et spatialisés.*

4.2. Apports pour l'étude d'innovations à l'échelle du SAT permettant de dépasser les freins au changement de pratiques

Je propose également d'étendre l'étude des pratiques innovantes à l'échelle du SATS ou SAT, en identifiant et caractérisant des innovations techniques, organisationnelles ou institutionnelles couplées à la mise en œuvre de pratiques agroécologiques. Pour ce faire, je mobilise les concepts de **levier sociotechnique** et de **condition de mise en œuvre**. Cela me permet de formaliser l'analyse de ces innovations en réalisant conjointement (i) l'identification des **actions clés** qui influent sur les déterminants des pratiques agricoles et permettent de lever les freins identifiés au changement de pratiques et (ii) la caractérisation de leurs **conditions concrètes de mise en œuvre** dans les exemples étudiés. Ces concepts permettent ainsi de donner à voir la logique interne de ces innovations, de les catégoriser, de les comparer, et ainsi, d'en tirer des enseignements génériques permettant d'alimenter la conception de nouvelles innovations couplées, pour dépasser les freins au changement de pratiques dans d'autres contextes. Cette approche vient ainsi compléter celle de l'étude des pratiques innovantes à travers les traques aux systèmes de culture innovants (Salembier et al. 2016; Verret et al. 2020). En effet ces dernières permettent de caractériser les **leviers agronomiques** mobilisés et leur **logique agronomique** sous-jacente dans le contexte particulier des objectifs de l'exploitant et des caractéristiques de son exploitation. Elle permet ainsi de produire des connaissances remobilisables pour concevoir de nouveaux systèmes de culture adaptés aux objectifs et aux conditions d'exploitation d'autres producteurs. Verret et al. (2020) soulignent que parmi les facteurs déterminant l'introduction de la culture de certains mélanges d'espèces, les débouchés pour ces cultures et la question du tri des récoltes sont clés. J'en conclus deux pistes de recherche sur l'étude des pratiques innovantes. *Premièrement, ces deux approches de traque, aux innovations couplées et aux systèmes de culture innovants, pourraient être menées conjointement afin d'identifier non seulement les leviers et logiques agronomiques permettant de répondre aux objectifs des producteurs, mais également les leviers sociotechniques et leur condition de mise en œuvre, qui permettent, à l'échelle du SAT, la mise en œuvre de ces systèmes innovants. Enfin ces deux approches peuvent être complétées par une troisième : l'analyse des innovations techniques et organisationnelles à l'échelle de l'exploitation permettant la mise en œuvre de nouvelles pratiques. Pour cela, Salembier et al. (2020) fournit un exemple inspirant de ce type de traque en montrant la conception conjointe de nouveaux équipements agricoles et de systèmes de culture innovants.*

Ce travail de thèse montre également l'intérêt de distinguer les concepts de « levier sociotechnique **spécifique** » et « levier sociotechnique **générique** ». Le premier désigne les leviers permettant d'agir spécifiquement sur le changement de pratiques visé, ex : intégrer dans la certification HVE des points sur la gestion agroécologique de la santé du sol). Le second permet de mettre en capacité les parties prenantes de faire évoluer les pratiques de manière générale, ex : développer ou renforcer les plateformes multi-acteurs permettant d'échanger connaissances et de construire des projets collectifs. Cette distinction, mobilisée également par

Schut et al. (2015a), permet d'identifier différents niveaux d'action et d'impact des solutions proposées lors de la conception : limitées au niveau du problème étudié ou dépassant ce dernier.

4.3. Apports pour l'accompagnement du changement de pratiques par la coconception

Dans cette thèse, je remobilise et adapte à mon problème de recherche le concept **d'innovation couplée**, initialement défini comme le résultat de la conception d'innovations dans le domaine de la production, de la commercialisation, de la transformation et de la consommation d'aliments, en tenant compte d'emblée et explicitement des synergies et antagonismes entre ces différents maillons de l'aval de la filière (Meynard et al. 2017), le tout dans un objectif d'accroissement de la durabilité des différentes composantes du système agri-alimentaire. Salembier et al. (2020) ont ensuite étendu ce concept à la conception conjointe de systèmes de culture et d'intrants (incluant les outils), i.e., à l'amont de la filière. Dans cette thèse, je propose d'étendre ce concept à **l'ensemble des maillons du système agri-alimentaire** : aux acteurs de la filière sus-cités, mais aussi aux acteurs de la R&D et des politiques publiques, autrement dit, à l'ensemble des acteurs susceptibles d'influer directement ou indirectement sur le choix des pratiques agricoles, de freiner leur changement, comme de le favoriser. Le processus de conception d'innovations couplées devient donc un moyen d'accompagner le changement de pratiques en concevant des artefacts **permettant de lever les verrouillages sociotechniques** au changement vers des pratiques agricoles durables et impliquant l'ensemble des parties prenantes du système agri-alimentaire. Ces verrouillages ont été caractérisés par de nombreuses études dans une diversité de contexte (Cowan and Gunby 1996; Lamine et al. 2010; Hammond Wagner et al. 2016; Magrini et al. 2016; Meynard et al. 2018; Della Rossa et al. 2020). Cette vision de l'innovation couplée l'ancre également fortement dans **l'agroécologie** comme discipline d'intégration orientée vers l'étude, la conception et la gestion des systèmes agri-alimentaires durables (Gliessman 2017). Le concept d'innovation couplée me paraît ainsi un objet de conception plus adapté à l'accompagnement au changement de pratiques que des concepts alternatifs tels que ceux de scénario (Hossard et al. 2013; Chantre et al. 2016; Delmotte et al. 2016), de transitions agroécologiques (Duru et al. 2015a), d'innovations territoriales (Soulard et al. 2018), d'innovations rurales (Pyburn and Woodhill 2014), d'innovations sociotechniques (Torres 2018) et de niches d'innovations (Schot and Geels 2008). En effet le principal apport du concept « d'innovation couplée » est cette dimension de couplage, qui oriente directement la conception vers une approche multi-échelle coordonnée incluant l'échelle du système de culture où sont les pratiques, mais aussi les échelles supérieures du système de production et du SAT pouvant freiner ou, au contraire, favoriser le changement de pratiques. *A contrario*, les autres concepts (transition agroécologique, innovation territoriale, innovation rurale), orientent principalement sur une échelle supra-exploitation et en particulier territoriale.

J'ai montré dans le chapitre 4 que **le processus de conception multi-échelle** produit d'autres types de solutions que des innovations couplées au sens strict (défini ci-dessus) : des solutions

partielles à une seule échelle (parcelle ou exploitation) et des innovations couplées au sens large, i.e., des innovations combinant différents éléments dont la combinaison est innovante sans que les solutions couplées ne le soit forcément individuellement. Produire cette diversité d'objets à cette diversité d'échelle me semble important. En effet, malgré le verrouillage identifié, on ne peut pas totalement exclure qu'une innovation agroécologique à l'échelle de la parcelle ou de l'exploitation permette le changement vers des pratiques agroécologiques sans nécessiter de changements importants aux autres échelles. Par exemple, en maraîchage sous abris, l'utilisation de plantes pièges hôtes, récemment identifiée comme une technique efficace (Djian-Caporalino et al. 2019), répond en bonne partie aux contraintes des producteurs. L'avenir nous dira si cette technique, accompagnée d'éventuels autres ajustements à l'échelle de la parcelle et de l'exploitation, s'avère suffisante.

Enfin dans les chapitres 2 et 4 j'ai montré que certains éléments jouent **un rôle clé pour la conception et la mise en œuvre de ces innovations couplées** : le facteur humain (confiance partagée, bonne communication, capacité au compromis), le besoin d'arènes d'interconnaissances et le rôle clé des intermédiaires ou animateurs de réseaux. Ce dernier élément est en cohérence avec les résultats de travaux sur les intermédiaires en conception (Kilelu et al. 2013; Berthet and Hickey 2018; Kivimaa et al. 2019b) montrant également l'importance de ces intermédiaires pour connecter les acteurs, cadrer le projet commun, faciliter l'échange de connaissances et l'exploration de solutions. L'agronome peut jouer ce rôle d'intermédiaire quand un besoin de production de connaissances est également requis. Sur le terrain, d'autres acteurs jouent ce rôle, comme par exemple des associations, des entreprises ou encore des institutions (voir 1.3).

References

- Agogué M, Ystr m A, Le Masson P (2013) Rethinking the role of intermediaries as an architect of collective exploration and creation of knowledge in open innovation. *International Journal of Innovation Management* 17:1–24
- Agogué M, Hooge S, Arnoux F, Brown I (2014a) An introduction to innovative design-Elements and applications of CK theory. Mines Presses, Paris
- Agogué M, Kazak i A, Hatchuel A, Le Masson P, Weil B, Poirel N, Cassotti M (2014b) The Impact of Type of Examples on Originality: Explaining Fixation and Stimulation Effects. *J Creat Behav* 48:1–12. <https://doi.org/10.1002/jocb.37>
- Agogué M, Levillain K, Hooge S (2015) Gamification of Creativity: Exploring the Usefulness of Serious Games for Ideation. *Creativity and Innovation Management* 24:415–429. <https://doi.org/10.1111/caim.12138>
- Alvarez J, Libessart A, Haudegond S (2014) Le « jeu non sérieux », une activité improductive ? *Interfaces numériques* 3:391–408. <https://doi.org/10.3166/rin.3.391-408>
- Arnault I, Fleurance C, Vey F, Du Fretay G, Auger J (2013) Use of Alliaceae residues to control soil-borne pathogens. *Industrial Crops and Products* 49:265–272. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.05.007>
- Arthur WB (1988) Competing technologies: An overview. G. Dosi, C. Technical Change and Economic Theory. London: Pinter:590–607
- Arthur WB (1989) Competing technologies, increasing returns, and lock-in by historical events. *Econ J* 99:116–131. <https://doi.org/10.2307/2234208>
- Aubry C, Michel-Dounias I (2006a) Systèmes de culture et décisions techniques dans l'exploitation agricole. In: Doré T, Martin P, Le Bail M, Ney B, Roger-Estrade J (eds) *L'agronomie aujourd'hui*. Ed. Quae, Versailles, pp 57–75
- Aubry C (2007) La gestion technique des exploitations agricoles, composante de la théorie agronomique. Mémoire pour le diplôme d'Habilitation à la direction de recherche d'agronomie. Ruralia
- Aubry C, Michel-Dounias I (2006b) Systèmes de cultures et décisions techniques dans l'exploitation agricole: et autres chapitres. In: Doré T, Martin P, Le Bail M, Ney B, Roger-Estrade J (eds) *L'agronomie aujourd'hui*. Ed. Quae, Versailles, pp 57–76
- Aubry C, Paillat J-M, Guerrin F (2006) A conceptual representation of animal waste management at the farm scale: The case of the Reunion Island. *Agric Syst* 88:294–315. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2005.06.006>
- AURAV (2015) Rencontre Inter-SCoT Rhône-Durance-Vaucluse: Les dynamiques du territoire Rhône-Durance-Vaucluse
- Barker KR, Koenning SR (1998) Developing sustainable systems for nematode management. *Annual review of phytopathology* 36:165–205

- Barreteau O, Bots PWG, Daniell KA (2010) A Framework for Clarifying “Participation” in Participatory Research to Prevent its Rejection for the Wrong Reasons. *Ecol Soc* 15. <https://doi.org/10.5751/ES-03186-150201>
- Barrett T, Feola G, Krylova V, Khusnitdinova M (2017) The application of Rapid Appraisal of Agricultural Innovation Systems (RAAIS) to agricultural adaptation to climate change in Kazakhstan: A critical evaluation. *Agric Syst* 151:106–113. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.11.014>
- Becu N (2020) Les courants d’influence et la pratique de la simulation participative : contours, design et contributions aux changements sociétaux et organisationnels dans les territoires. Géographie, La Rochelle Université
- Béguin P, Cerf M (2004) Formes et enjeux de l’analyse de l’activité pour la conception des systèmes de travail. *Activités* 1
- Belmin R (2016) Construction de la qualité de la clémentine de Corse sous Indication Géographique Protégée. Analyse des pratiques agricoles et du système sociotechnique. PhD dissertation, Université de Corse-Pascal Paoli
- Belmin R, Meynard J-M, Julhia L, Casabianca F (2018) Sociotechnical controversies as warning signs for niche governance. *Agron Sustain Dev* 38:32. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0521-7>
- Benoît M, Rizzo D, Marraccini E, Moonen AC, Galli M, Lardon S, Rapey H, Thenail C, Bonari E (2012) Landscape agronomy: A new field for addressing agricultural landscape dynamics. *Landscape Ecol* 27:1385–1394. <https://doi.org/10.1007/s10980-012-9802-8>
- Bernard de Raymond A (2013) En toute saison. Le marché des fruits et légumes en France. Presses universitaires de Rennes
- Berthet E (2013) Contribution à une théorie de la conception des agro-écosystèmes: Fonds écologique et inconnu commun
- Berthet ET, Hickey GM (2018) Organizing collective innovation in support of sustainable agro-ecosystems: The role of network management. *Agric Syst* 165:44–54. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.05.016>
- Berthet ETA, Barnaud C, Girard N, Labatut J, Martin G (2015) How to foster agroecological innovations?: A comparison of participatory design methods. *Journal of Environmental Planning and Management* 59:280–301. <https://doi.org/10.1080/09640568.2015.1009627>
- Bio de Provence (2012) La filière maraîchage biologique en PACA
- Bio de Provence (2016) La filière maraîchage biologique en PACA
- Bonanomi G, Antignani V, Capodilupo M, Scala F (2010) Identifying the characteristics of organic soil amendments that suppress soilborne plant diseases. *Soil Biology and Biochemistry* 42:136–144. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.10.012>

- Boulestreau Y, Casagrande M, Navarrete M (accepted) Analyzing barriers and levers for practice change: a new framework applied to vegetables' soil pest management. *Agron Sustain Dev*
- Boulestreau Y, Casagrande M, Navarrete M (2019) Co-designing crop diversification strategies from plot to sociotechnical system to manage root-knot nematodes in Mediterranean market gardening systems. <https://zenodo.org/record/3784275#.XrP6WJ4zapo>. Accessed 7 May 2020
- Bouttes M, Bancarel A, Doumayzel S, Viguié S, Cristobal MS, Martin G (2020) Conversion to organic farming increases dairy farmers' satisfaction independently of the strategies implemented. *Agron Sustain Dev* 40:107. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00616-5>
- Bridge J (1996) Nematode management in sustainable and subsistence agriculture. *Annu. Rev. Phytopathol.*:201–225
- Brossier J (1987) Système et système de production : note sur ces concepts
- Brougère G (2012) Le jeu peut-il être sérieux?: Revisiter Jouer/Apprendre en temps de serious game. <https://doi.org/10.3828/AJFS.2012.3>
- Buck D, Christina G, Guthman J (1997) From Farm to Table: The Organic Vegetable Commodity Chain of Northern California. *Sociologia Ruralis* 37
- Bucki P, Siwek P (2019) Organic and non-organic mulches – impact on environmental conditions, yield, and quality of Cucurbitaceae. *Folia Horticulturae* 31:129–145. <https://doi.org/10.2478/fhort-2019-0009>
- Bui S, Cardona A, Lamine C, Cerf M (2016) Sustainability transitions: Insights on processes of niche-regime interaction and regime reconfiguration in agri-food systems. *J Rural Stud* 48:92–103. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2016.10.003>
- Burger-Leenhardt D, Murgue C, Therond O (2015) Une approche agroécologique de la gestion quantitative de l'eau en zone de déficit chronique. *Innovations Agronomiques* 43:57–70
- Capillon A (1993) Typologie des exploitations agricoles, contribution à l'étude régionale des problèmes techniques
- Caron P (2005) À quels territoires s'intéressent les agronomes ? : Le point de vue d'un géographe tropicaliste. *Nat. Sci. Soc.* 13:145–153. <https://doi.org/10.1051/nss:2005021>
- Casagrande M, Dogliotti S, Groot J, Aguerre V, Abbas A, Albín A, Claassen F, Chilbroste P, Rossing W (2010) Exploring options for sustainable farming systems development for vegetable family farmers in Uruguay using a modeling toolkit. 9th European IFSA Symposium
- Catalogna M (2018) Expérimentations de pratiques agroécologiques réalisées par des agriculteurs: Proposition d'un cadre d'analyse à partir du cas des grandes cultures et du maraîchage diversifié dans le département de la Drôme

- Cerf M, Le Bail, Lusson JM, Omon B (2017) Contrasting intermediation practices in various advisory service networks in the case of the French Ecophyto plan. *The Journal of Agricultural Education and Extension* 23:231–244. <https://doi.org/10.1080/1389224X.2017.1320641>
- Chantre E, Cardona A (2014) Trajectories of french field crop farmers moving toward sustainable farming practices: Change, learning, and links with the advisory services. *Agroecol Sustain Food Syst* 38:573–602. <https://doi.org/10.1080/21683565.2013.876483>
- Chantre E, Guichard L, Ballot R, Jacquet F, Jeuffroy M-H, Prigent C, Barzman M (2016) Co-click'eau, a participatory method for land-use scenarios in water catchments. *Land Use Policy* 59:260–271. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.09.001>
- Chave M, Tchamitchian M, Ozier-Lafontaine H (2014) Agroecological Engineering to Biocontrol Soil Pests for Crop Health. In: Ozier-Lafontaine H, Lesueur-Jannoyer M (eds) *Sustainable Agriculture Reviews 14: Agroecology and Global Change*. Springer International Publishing, Cham, pp 269–297
- Chesbrough H, Vanhaverbeke W, West J (eds) (2014) *New Frontiers in Open Innovation*. Oxford University Press
- Clément C, Perrin C, Soulard C-T (2019) Les arrangements pour l'accès au foncier agricole périurbain. [developpementdurable. https://doi.org/10.4000/developpementdurable.15933](https://doi.org/10.4000/developpementdurable.15933)
- Collange B, Navarrete M, Peyre G, Mateille T, Tchamitchian M (2011) Root-knot nematode (Meloidogyne) management in vegetable crop production: The challenge of an agronomic system analysis. *Crop Prot* 30:1251–1262. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2011.04.016>
- ComMod C (2005) La modélisation comme outil d'accompagnement. *Nat. Sci. Soc.* 13:165–168. <https://doi.org/10.1051/nss:2005023>
- Compagnone C (2019) Sociologie des changements de pratiques en agriculture: L'apport de l'étude des réseaux de dialogues entre pairs. *Quae*
- Cowan R, Gunby P (1996) Sprayed to death: Path dependence, lock-in and pest control strategies. *Econ J* 106:521–542. <https://doi.org/10.2307/2235561>
- Craheix D, Bergez J-E, Angevin F, Bockstaller C, Bohanec M, Colomb B, Doré T, Fortino G, Guichard L, Pelzer E, Méssean A, Reau R, Sadok W (2015) Guidelines to design models assessing agricultural sustainability, based upon feedbacks from the DEXi decision support system. *Agron Sustain Dev* 35:1431–1447. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0315-0>
- Darnhofer I, Sutherland LA, Pinto-Correia T (2015) Conceptual insights derived from case studies on 'emerging transitions' in farming. In: Sutherland L, Darnhofer I, Wilson GA, Zagata L (eds) *Transition pathways towards sustainability in agriculture: case studies from Europe*. CABI, Wallingford, pp 189–203

- David PA (1985) Clio and the Economics of QWERTY. *Am Econ Rev* 75:332–337. <https://doi.org/10.2307/1805621>
- Debaeke P, Munier-Jolain N, Bertrand M, Guichard L, Nolot J-M, Faloya V, Saulas P (2009) Iterative design and evaluation of rule-based cropping systems: Methodology and case studies. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 29:73–86. <https://doi.org/10.1051/agro:2008050>
- Deguine J-P, Gloanec C, Laurent P, Ratnadass A, Aubertot J-N (eds) (2016) Protection agroécologique des cultures. Savoir faire. Éditions Quae, Versailles
- Deguine J-P, Ratnadass A, Robin M-H, Sarthou J-P, Aubertot J-N (2020) Protection agroécologique des cultures: Définition. <https://dicoagroecologie.fr/encyclopedie/protection-agroecologique-des-cultures/>. Accessed 17 November 2020
- Della Rossa P (2020) Conception collective d'organisations territoriales innovantes pour une évolution coordonnée de systèmes de production agricoles: Cas d'une réduction de la pollution herbicide d'une rivière en Martinique
- Della Rossa P, Le Bail M, Mottes C, Jannoyer M, Cattani P (2020) Innovations developed within supply chains hinder territorial ecological transition: The case of a watershed in Martinique. *Agron Sustain Dev* 40:32. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-0613-z>
- Delmotte S, Barbier J-M, Mouret J-C, Le Page C, Wery J, Chauvelon P, Sandoz A, Lopez Ridaura S (2016) Participatory integrated assessment of scenarios for organic farming at different scales in Camargue, France. *Agric Syst* 143:147–158. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2015.12.009>
- den Haan R-J, van der Voort M (2018) On Evaluating Social Learning Outcomes of Serious Games to Collaboratively Address Sustainability Problems: A Literature Review. *Sustainability* 10:4529. <https://doi.org/10.3390/su10124529>
- Djian-Caporalino C (2010) Nématodes à galles, des ravageurs de plus en plus préoccupants: Résultats de trois ans d'enquêtes dans quinze régions françaises. *PHYTOMA - La Défense des Végétaux*:43–49
- Djian-Caporalino C (2018) Méthode de lutte alternative contre les nématodes à galles, Avignon
- Djian-Caporalino C, Védie H, Arrufat A (2009) Gestion des nématodes à galles : lutttes conventionnelles et lutttes alternatives: L'atout des plantes pièges. *PHYTOMA - La Défense des Végétaux*:21–25
- Djian-Caporalino C, Mateille T, Bailly-Bechet M, Marteu N, Fazari A, Bautheac P, Raptopoulou A, van Duong L, Tavoillot J, Martiny B, Goillon C, Castagnone-Sereno P (2019) Evaluating sorghums as green manure against root-knot nematodes. *Crop Prot* 122:142–150. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2019.05.002>

- Dogliotti S, Rossing WAH, van Ittersum MK (2004) Systematic design and evaluation of crop rotations enhancing soil conservation, soil fertility and farm income: A case study for vegetable farms in South Uruguay. *Agric Syst* 80:277–302. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2003.08.001>
- Dogliotti S, van Ittersum MK, Rossing WAH (2005) A method for exploring sustainable development options at farm scale: A case study for vegetable farms in South Uruguay. *Agric Syst* 86:29–51. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2004.08.002>
- Dogliotti S, Abedala C, Monvoisin K, Groot J (2010) A model-aid procedure to design and evaluate cropping plans to improve sustainability of farm systems. *Agro* 2010:839–840
- Doré T, Meynard JM (2006) Itinéraires technique, système de culture: de la compréhension du fonctionnement du champ cultivé à l'évolution des pratiques agricoles: Introduction. Doré T, Le Bail M, Martin P, Ney B, Roger-Estrade. J. *l'agronomie aujourd'hui* Ed. Quae:33–56
- Doré T, Jeuffroy MH, Tourdonnet S de (2006) La connaissance du fonctionnement du champ cultivé, base de l'évolution des systèmes de culture. *L'agronomie aujourd'hui*. E. Quae. Versailles:43–56
- Dupré L, Lamine C, Navarrete M (2017) Short Food Supply Chains, Long Working Days: Active Work and the Construction of Professional Satisfaction in French Diversified Organic Market Gardening. *Sociologia Ruralis* 57:396–414. <https://doi.org/10.1111/soru.12178>
- Duru M, Therond O (2014) Un cadre conceptuel pour penser maintenant (et organiser demain) la transition agroécologique de l'agriculture dans les territoires. *Cahiers Agricultures* 23:84-95 (1)
- Duru M, Therond O, Fares M'h (2015a) Designing agroecological transitions; A review. *Agron Sustain Dev* 35:1237–1257. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0318-x>
- Duru M, Therond O, Martin G, Martin-Clouaire R, Magne M-A, Justes E, Journet E-P, Aubertot J-N, Savary S, Bergez J-E, Sarthou JP (2015b) How to implement biodiversity-based agriculture to enhance ecosystem services: A review. *Agron Sustain Dev* 35:1259–1281. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0306-1>
- El Bilali H (2019) The Multi-Level Perspective in Research on Sustainability Transitions in Agriculture and Food Systems: A Systematic Review. *Agriculture* 9:74. <https://doi.org/10.3390/agriculture9040074>
- Elzen B, Bos B (2019) The RIO approach: Design and anchoring of sustainable animal husbandry systems. *Technological Forecasting and Social Change* 145:141–152. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2016.05.023>
- Elzen B, Geels FW, Green K (2004) System innovation and the transition to sustainability: Theory, evidence and policy. Edward Elgar Publishing

- Etienne M (2009) Co-construction d'un modèle d'accompagnement selon la méthode ARDI : guid méthodologique
- Étienne M (ed) (2010) La modélisation d'accompagnement: Une démarche participative en appui au développement durable. Éditions Quae
- Étienne M (2013) Companion modelling: A participatory approach to support sustainable development. Springer Science & Business Media
- Expósito A, García S, Giné A, Escudero N, Sorribas FJ (2019) *Cucumis metuliferus* reduces *Meloidogyne incognita* virulence against the Mi1.2 resistance gene in a tomato-melon rotation sequence. *Pest Manag Sci* 75:1902–1910. <https://doi.org/10.1002/ps.5297>
- Faburel P (2020) La GEFEL, l'association des associations de produits. <https://www.interfel.com/decouvrez-nous/mieux-nous-connaître/a-propos-interfel/gefel/>. Accessed 8 December 2020
- Faure G, Chiffolleau Y, GOULET F, Temple L, Touzard J-M (eds) (2018) Innovation et développement dans les systèmes agricoles et alimentaires, Quae. Synthèse / INRA. Quae, Versailles
- Feike T, Chen Q, Graeff-Hönninger S, Pfenning J, Claupein W (2010) Farmer-developed vegetable intercropping systems in southern Hebei, China. *Renew. Agric. Food Syst.*:272–280
- Ferrand N, Abrami G (2015) Cooping innovative tools for sharing change in socio-environmental systems (CoOPLaGE): Comprehensive methodology to accompany change in sociotechnical systems. <https://lms.agreenium.fr/mod/folder/view.php?id=1628>
- Furnion C (2014) Assessing the acceptability of alternative cropping systems limiting the pressure of root-knot nematodes: A case study with market gardeners of South-Eastern France
- Gaitán-Cremaschi D, Klerkx L, Duncan J, Trienekens JH, Huenchuleo C, Dogliotti S, Contesse ME, Benitez-Altuna FJ, Rossing WAH (2020) Sustainability transition pathways through ecological intensification: An assessment of vegetable food systems in Chile. *Int J Agric Sustain* 17:1–20. <https://doi.org/10.1080/14735903.2020.1722561>
- Gamliel A, van Bruggen AHC (2016) Maintaining soil health for crop production in organic greenhouses. *Sci Hortic* 208:120–130. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.12.030>
- Garcia C, Dray A, Waeber P (2016) Learning Begins When the Game Is Over: Using Games to Embrace Complexity in Natural Resources Management. *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society* 25:289–291. <https://doi.org/10.14512/gaia.25.4.13>
- Gauvrit D (2008) Maraichage sous serre et sous abri: Fiche Technique

- Geels FW (2002) Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: A multi-level perspective and a case-study. *Res Policy* 31:1257–1274. [https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(02\)00062-8](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(02)00062-8)
- Geels FW (2004) From sectoral systems of innovation to socio-technical systems: Insights about dynamics and change from sociology and institutional theory. *Res Policy* 33:897–920. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2004.01.015>
- Geels FW (2011) The multi-level perspective on sustainability transitions: Responses to seven criticisms. *Environmental Innovation and Societal Transitions* 1:24–40. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2011.02.002>
- Geels FW, Schot J (2007) Typology of sociotechnical transition pathways. *Res Policy* 36:399–417. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2007.01.003>
- Gliessman S (2017) Defining Agroecology. *Agroecol Sustain Food Syst* 42:599–600. <https://doi.org/10.1080/21683565.2018.1432329>
- Gliessman SR (2007) *Agroecology: The ecology of sustainable food systems*. CRC Press, Taylor & Francis, New York, USA
- Goulet F (2013) Narratives of experience and production of knowledge within farmers' groups. *J Rural Stud* 32:439–447. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2013.09.006>
- Goulet F, Pervanchon F, Contreau C, Cerf M (2008) Les agriculteurs innovent par eux-mêmes pour leurs systèmes de culture. In: Reau R, Doré T (eds) *Systèmes de culture innovants et durables: Quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer ?* Educagri éd, Dijon
- Hall A, Rasheed Sulaiman V, Clark N, Yoganand B (2003) From measuring impact to learning institutional lessons: An innovation systems perspective on improving the management of international agricultural research. *Agricultural Systems* 78:213–241. [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(03\)00127-6](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(03)00127-6)
- Hammond Wagner C, Cox M, Bazo Robles JL (2016) Pesticide lock-in in small scale Peruvian agriculture. *Ecological Economics* 129:72–81. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.05.013>
- Hatchuel A, Weil B (2009) C-K design theory: An advanced formulation. *Res Eng Design* 19:181–192. <https://doi.org/10.1007/s00163-008-0043-4>
- Hatchuel A, Le Masson P, Weil B (eds) (2009) *Design theory and collective creativity: A theoretical framework to evaluate KCP process*
- Hatchuel A, Le Masson P, Reich Y, Subrahmanian E (2017) Design theory: A foundation of a new paradigm for design science and engineering. *Res Eng Design* 29:5–21. <https://doi.org/10.1007/s00163-017-0275-2>
- Heiken JA (2017) *The Effects of Fluopyram on Nematodes*. Master of Science, North Carolina State University
- Henneron L, Bernard L, Hedde M, Pelosi C, Villenave C, Chenu C, Bertrand M, Girardin C, Blanchart E (2015) Fourteen years of evidence for positive effects of conservation

- agriculture and organic farming on soil life. *Agron Sustain Dev* 35:169–181. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0215-8>
- Hill SB, MacRae RJ (1995) Conceptual Framework for the Transition from Conventional to Sustainable Agriculture. *Journal of Sustainable Agriculture* 7:81–87. https://doi.org/10.1300/J064v07n01_07
- HLPE (2014) Food losses and waste in the context of sustainable food systems. A report by the High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition of the Committee on World Food Security. <http://www.fao.org/3/a-i3901e.pdf>. Accessed 10 April 2020
- Hoefflerlin P, Djian-Caporalino C, Villeneuve F, Delporte M (2018) Les nématodes à galles : Meloidogynes spp. <https://www.picleg.fr/Publications/Etudes-et-dossiers-thematiques/Hors-Serie-Ctifl-Infos-Les-nematodes-a-galles-Meloidogyne-Spp>. Accessed 22 April 2020
- Hooge S, Béjean M, Arnoux F (2016) Organising for radical innovation: The benefits of the interplay between cognitive and organisational processes in KCP workshops. *Int. J. Innov. Mgt.* 20:1640004. <https://doi.org/10.1142/S1363919616400041>
- Hossard L, Jeuffroy MH, Pelzer E, Pinochet X, Souchere V (2013) A participatory approach to design spatial scenarios of cropping systems and assess their effects on phoma stem canker management at a regional scale. *Environmental Modelling & Software* 48:17–26. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.05.014>
- HUANG Y-h, MAO Z-c, XIE B-y (2016) Chinese leek (*Allium tuberosum* Rottler ex Sprengel) reduced disease symptom caused by root-knot nematode. *Journal of Integrative Agriculture* 15:364–372. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(15\)61032-2](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(15)61032-2)
- IFOAM (n.d.) Principles of Organic Agriculture. https://www.ifoam.bio/sites/default/files/poa_english_web.pdf. Accessed 22 April 2018
- ITAB (ed) (2015) Produire des légumes biologiques: Généralités et principes techniques - Tome 1
- Janvier C, Villeneuve F, Alabouvette C, Edel-Hermann V, Mateille T, Steinberg C (2007) Soil health through soil disease suppression: Which strategy from descriptors to indicators? *Soil Biology and Biochemistry* 39:1–23. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.07.001>
- Jeannequin B (2017) Diversité des systèmes maraîchers. Séminaire TANDEM, INRA Avignon
- Kamto M, Halleson D, Ngom E, Fauvelle É, Salihovic A, Garcia C (2019) Using role-play to explore strategies for improving palm oil production and sustainability in Cameroon. *ETFRN NEWS*:139

- Kemp R, Rotmans J (2004) Managing the transition to sustainable mobility. *System innovation and the transition to sustainability: theory, evidence and policy*:137–167
- Kilelu CW, Klerkx L, Leeuwis C (2013) Unravelling the role of innovation platforms in supporting co-evolution of innovation: Contributions and tensions in a smallholder dairy development programme. *Agric Syst* 118:65–77. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2013.03.003>
- Kivimaa P, Hyysalo S, Boon W, Klerkx L, Martiskainen M, Schot J (2019a) Passing the baton: How intermediaries advance sustainability transitions in different phases. *Environmental Innovation and Societal Transitions* 31:110–125. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2019.01.001>
- Kivimaa P, Boon W, Hyysalo S, Klerkx L (2019b) Towards a typology of intermediaries in sustainability transitions: A systematic review and a research agenda. *Res Policy* 48:1062–1075. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2018.10.006>
- Klein E, Katan J, Gamliel A (2011) Soil Suppressiveness to Fusarium Disease: Following Organic Amendments and Solarization. *Plant Disease* 95
- Klein E, Katan J, Gamliel A (2012) Soil suppressiveness to *Meloidogyne javanica* as induced by organic amendments and solarization in greenhouse crops. *Crop Protection* 39:26–32. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2012.02.013>
- Klein E, Ofek M, Katan J, Minz D, Gamliel A (2013) Soil suppressiveness to Fusarium disease: Shifts in root microbiome associated with reduction of pathogen root colonization. *Phytopathology* 103:23–33
- Klerkx L, van Bommel S, Bos B, Holster H, Zwartkruis JV, Aarts N (2012) Design process outputs as boundary objects in agricultural innovation projects: Functions and limitations. *Agric Syst* 113:39–49. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2012.07.006>
- Kolb DA (1984) *Experiential learning: Experience as the source of learning and development*. Engle Wood Cliffs and NJ: Prentice Hal
- Kull CA, Arnould de Sartre X, Castro-Larrañaga M (2015) The political ecology of ecosystem services. *Geoforum* 61:122–134. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2015.03.004>
- Lamine C, Meynard J-M, Bui S, Messéan A (2010) Réductions d'intrants : des changements techniques, et après ? Effets de verrouillage et voies d'évolution à l'échelle du système agri-alimentaire. *Innovations Agronomiques* 8:121–134
- Lamine C (2012) «Changer de système»: Une analyse des transitions vers l'agriculture biologique à l'échelle des systèmes agri-alimentaires territoriaux. *Terrains & travaux*:139–156
- Lamine C (2014) Développement des marchés bios, des réseaux et des initiatives: Étude de la croissance des marchés bios porteurs de valeurs et du maintien de la confiance et l'intégrité. France - Etude de cas sur Biocoop. <https://orgprints.org/30734/>. Accessed 10 October 2018

- Lamine C, Messéan A, Paratte R, Hochereau F, Meynard JM, Ricci P (2011) La lutte chimique au cœur de la construction du système agri-alimentaire. Repenser la protection des cultures: innovations et transitions. Editions Quae:30–58
- Lamine C, Garçon L, Brunori G (2019) Territorial agrifood systems: A Franco-Italian contribution to the debates over alternative food networks in rural areas. *J Rural Stud* 68:159–170. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2018.11.007>
- Lê S, Josse J, Husson F (2008) FactoMineR: An R package for multivariate analysis. *Journal of statistical software* 25:1–18
- Le Bail M (2008) Déterminants de la qualité des produits végétaux. *OCL* 15:120–125. <https://doi.org/10.1051/ocl.2008.0174>
- Le Bail M (2012) Stratégies des acteurs des filières et évolution des assolements d'un territoire: Enseignements des travaux agronomiques sur la qualité
- Le Gal P-Y, Dugué P, Faure G, Novak S (2011) How does research address the design of innovative agricultural production systems at the farm level?: A review. *Agric Syst* 104:714–728. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2011.07.007>
- Le Page C, Abrami G, Barreteau O, Becu N, Bommel P, Botta A, Dray A, Monteil C, Souchère V (2010) Des modèles pour partager des représentations. In: Étienne M (ed) *La modélisation d'accompagnement: Une démarche participative en appui au développement durable*. Éditions Quae, pp 71–102
- Lefèvre A, Perrin B, Lesur-Dumoulin C, Salembier C, Navarrete M (2020) Challenges of complying with both food value chain specifications and agroecology principles in vegetable crop protection. *Agricultural Systems* 185:102953. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102953>
- Li T, Wang H, Xia X, Cao S, Yao J, Zhang L (2018) Inhibitory effects of components from root exudates of Welsh onion against root knot nematodes. *PLoS ONE* 13:e0201471. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0201471>
- Lobley M, Baker JR, Whitehead I (2010) Farm succession and retirement: Some international comparisons. *Journal of Agriculture, Food Systems, and Community Development* 1:49–64
- Lucas V (2019) The needed peer-to-peer cooperation for the place-based agroecological transition: Tactics to reciprocally collaborate despite the farmers' heterogeneity. *ESRS*
- Lucas V, Gasselin P, van der Ploeg JD (2018) Local inter-farm cooperation: A hidden potential for the agroecological transition in northern agricultures. *Agroecol Sustain Food Syst* 43:145–179. <https://doi.org/10.1080/21683565.2018.1509168>
- Magrini M-B, Duru M (2014) Dynamics of innovation in the nutrition of dairy cattle: An assessment of the diffusion process of the 'Bleu-Blanc-Coeur' scheme and its repercussions. *Fourrages*:79–90

- Magrini M-B, Anton M, Cholez C, Corre-Hellou G, Duc G, Jeuffroy M-H, Meynard J-M, Pelzer E, Voisin A-S, Walrand S (2016) Why are grain-legumes rarely present in cropping systems despite their environmental and nutritional benefits?: Analyzing lock-in in the French agrifood system. *Ecological Economics* 126:152–162. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.03.024>
- Magrini M-B, Martin G, Magne M-A, Duru M, Couix N, Hazard L, Plumecocq G (2019) Agroecological transition from farms to Territorialisated agri-food systems: Issues and Drivers. In: Bergez J-E, Audouin E, Therond O (eds) *Agroecological Transitions: From Theory to Practice in Local Participatory Design*. Springer, pp 69–98
- Marguerye A de, Dumas M, Carre M, Vromandt C (2018) Concevoir des ressources pour améliorer l'appropriation de systèmes de culture économes en pesticides (ECORESSOURCE) *Innovations agronomiques*
- Martin G (2015) A conceptual framework to support adaptation of farming systems – Development and application with Forage Rummy. *Agric Syst* 132:52–61. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2014.08.013>
- Martin G, Felten B, Duru M (2011) Forage rummy: A game to support the participatory design of adapted livestock systems. *Environmental Modelling & Software* 26:1442–1453. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.08.013>
- Mateille T, Cadet P, Fargette M (2008) Control and management of plant parasitic nematode communities in a soil conservation approach. In: *Integrated management and biocontrol of vegetable and grain crops nematodes*. Springer, Dordrecht, pp 79–97
- Mawois M, Vidal A, Revoyron E, Casagrande M, Jeuffroy M-H, Le Bail M (2019) Transition to legume-based farming systems requires stable outlets, learning, and peer-networking. *Agron Sustain Dev* 39:19. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0559-1>
- McCarter MW, Northcraft GB (2007) Happy together?: Insights and implications of viewing managed supply chains as a social dilemma. *Journal of Operations Management* 25:498–511. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2006.05.005>
- Meynard J-M (2014) Postface – Sociologie des grandes cultures: Une lecture d'agronome. In: *Sociologie des grandes cultures*. Editions Quæ, Versailles, pp 187–204
- Meynard J-M, Doré T, Habib R (2001) L'évaluation et la conception de systèmes de culture pour une agriculture durable
- Meynard J-M, Dedieu B, Bos AP (2012) Re-design and co-design of farming systems. An overview of methods and practices. In: Ika Darnhofer, David Gibon, Benoît Dedieu (ed) *Farming Systems Research into the 21st century: The new dynamic*. Springer, pp 407–432
- Meynard J-M, Messéan A, Charlier A, Charrier F, Fares M'h, Le Bail M, Magrini M-B, Savini I (2013) Freins et leviers à la diversification des cultures: Étude au niveau des

- exploitations agricoles et des filières. OCL 20:D403.
<https://doi.org/10.1051/ocl/2013007>
- Meynard J-M, Jeuffroy M-H, Le Bail M, Lefèvre A, Magrini M-B, Michon C (2017) Designing coupled innovations for the sustainability transition of agrifood systems. *Agric Syst* 157:330–339. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.08.002>
- Meynard J-M, Charrier F, Le Bail M, Magrini M-B, Charlier A, Messéan A (2018) Socio-technical lock-in hinders crop diversification in France. *Agron Sustain Dev* 38:54. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0535-1>
- Meynard JM, Aggeri F, Coulon JB, Habib R, Tillon JP (2006) Recherches sur la conception de systèmes agricoles innovants. Rapport du groupe de travail
- Mokrini F, Janati S, Houari A, Essarioui A, Bouharroud R, Mimouni A (2018) Management of plant parasitic nematodes by means of organic amendment. *Review of Marketing Science. Agron Vét* 6:337–344
- Morel K, Revoyron E, San Cristobal M, Baret PV (2020) Innovating within or outside dominant food systems? Different challenges for contrasting crop diversification strategies in Europe. *PLoS ONE* 15:e0229910. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0229910>
- Msayleb N, Ibrahim S (2011) Treatment of Nematodes with Ozone Gas: A Sustainable Alternative to Nematicides. *Physics Procedia* 21:187–192. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.10.028>
- Nahar MS, Grewal PS, Miller SA, Stinner D, Stinner BR, Kleinhenz MD, Wszelaki A, Doohan D (2006) Differential effects of raw and composted manure on nematode community, and its indicative value for soil microbial, physical and chemical properties. *Applied soil ecology* 34:140–151. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2006.03.011>
- Navarette M, Tchamitchian M, Aissa Madani C, Collange B, Taussig C (eds) (2010) Elaborating innovative solutions with experts using a multicriteria evaluation tool.: The case of soil borne disease control in market gardening cropping systems. Cirad-Inra-SupAgro
- Navarrete M (2009) How do Farming Systems Cope with Marketing Channel Requirements in Organic Horticulture?: The Case of Market-Gardening in Southeastern France. *Journal of Sustainable Agriculture* 33:552–565. <https://doi.org/10.1080/10440040902997785>
- Navarrete M, Le Bail M (2007) SALADPLAN : A model of the decision-making process in lettuce and endive cropping. *Agron Sustain Dev* 27:209–221. <https://doi.org/10.1051/agro:2007009>
- Navarrete M, Tordjman S, Rouby A (2003) La planification des plantations par les structures de première mise en marché dans la filière fruits et légumes.

- Comparaison des cas de la salade et de la pêche dans le sud-est de la France. *Fruits* 58:261–274. <https://doi.org/10.1051/fruits:2003014>
- Navarrete M, Le Bail M, Papy F, Bressoud F, Tordjman S (2006) Combining leeway on farm and supply basin scales to promote technical innovations in lettuce production. *Agron Sustain Dev* 26:77–87. <https://doi.org/10.1051/agro:2005062>
- Navarrete M, Dupré L, Lamine C (2015) Crop management, labour organization, and marketing: Three key issues for improving sustainability in organic vegetable farming. *Int J Agric Sustain* 13:257–274. <https://doi.org/10.1080/14735903.2014.959341>
- Navarrete M, Djian-Caporalino C, Mateille T, Palloix A, Sage-Palloix A-M, Lefèvre A, Fazari A, Marteu N, Tavoillot J, Dufils A, Furnion C, Pares L, Forest I (2016) A resistant pepper used as a trap cover crop in vegetable production strongly decreases root-knot nematode infestation in soil. *Agron Sustain Dev* 36:37. <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0401-y>
- Navarrete M, Lefèvre A, Dufils A, Parès L, Perrin B (2017) Concevoir et évaluer avec les acteurs des systèmes de culture adaptés à leurs cadres de contraintes et d'objectifs en production maraîchère sous abri.: Mise en pratique et enseignements dans les projets GeDuNem et 4SYSLEG. *CIAG Construire et diffuser des systèmes légumier multi-performants*, 14/09/17, Angers
- Niggli U, Plagge J, Reese S, Fertl T, Schmid O, Brändli U, Bärtschi D, Pöpsel G, Hermanowski R, Hohenester H (2015) Towards modern sustainable agriculture with organic farming as the leading model. A discussion document on Organic 3:36
- Ollivier G, Magda D, Mazé A, Plumecocq G, Lamine C (2018) Agroecological transitions: What can sustainability transition frameworks teach us? An ontological and empirical analysis. *Ecol Soc* 23. <https://doi.org/10.5751/ES-09952-230205>
- Ostrom E (1990) *Governing the commons: The evolution of institutions for collective action*. Cambridge University Press
- Palm C, Blanco-Canqui H, DeClerck F, Gatere L, Grace P (2014) Conservation agriculture and ecosystem services: An overview. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 187:87–105. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.10.010>
- Patrício R, Moreira AC, Zurlo F (2018) Gamification approaches to the early stage of innovation. *Creat Innov Manag* 27:499–511. <https://doi.org/10.1111/caim.12284>
- Paulus PB, Nijstad BA (2003) *Group creativity: Innovation through collaboration*. Oxford University Press
- Piller F, West J (2014) Firms, users, and innovation. *New frontiers in open innovation* 29:29–49
- Ploeg Sv (2012) *Wat-A-Game, a toolkit for building role-playing games about water management*

- Pluchinotta I, Kazakçi AO, Giordano R, Tsoukiàs A (2019) Design theory for generating alternatives in public decision making processes. *Group Decision and Negotiation* 28:341–375
- Plumecocq G, Debril T, Duru M, Magrini M-B, Sarthou JP, Therond O (2018) The plurality of values in sustainable agriculture models: Diverse lock-in and coevolution patterns. *Ecol Soc* 23. <https://doi.org/10.5751/ES-09881-230121>
- Potier O, Brun J, Le Masson P, Weil B (2015) How innovative design can contribute to Chemical and Process Engineering development?: Opening new innovation paths by applying the C–K method. *Chemical Engineering Research and Design* 103:108–122. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2015.05.040>
- Probst K, Hagmann J, Fernandez M, Ashby JA (2003) Understanding participatory research in the context of natural resource management-paradigms, approaches and typologies. *Network paper* 130
- Prost L, Berthet E, Cerf M, Jeuffroy M-H, Labatut J, Meynard J-M (2016) Innovative design for agriculture in the move towards sustainability: scientific challenges. *Res Eng Design*. <https://doi.org/10.1007/s00163-016-0233-4>
- Prost L, Reau R, Paravano L, Cerf M, Jeuffroy M-H (2018) Designing agricultural systems from invention to implementation: The contribution of agronomy. Lessons from a case study. *Agric Syst* 164:122–132. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.04.009>
- Pruett SB, Myers LP, Keil DE (2001) Toxicology of metam sodium. *J Toxicol Environ Health B Crit Rev* 4:207–222. <https://doi.org/10.1080/10937400117071>
- Pyburn R, Woodhill J (2014) *Dynamics of rural innovation: A primer for emerging professionals*. LM Publishers, Arnhem
- Rahmann G, Ardakani MR, Bàrberi P, Boehm H, Canali S, Chander M, David W, Dengel L, Erisman JW, Galvis-Martinez AC (2016) Organic Agriculture 3.0 is innovation with research. *Organic Agriculture* 7:169–197
- Ramos García M, Guzmán GI, González De Molina M (2017) Dynamics of organic agriculture in Andalusia: Moving toward conventionalization? *Agroecol Sustain Food Syst* 42:328–359. <https://doi.org/10.1080/21683565.2017.1394415>
- Ravier C, Jeuffroy M-H, Gate P, Cohan J-P, Meynard J-M (2017) Combining user involvement with innovative design to develop a radical new method for managing N fertilization. *Nutr Cycl Agroecosyst* 110:117–134. <https://doi.org/10.1007/s10705-017-9891-5>
- Reau R, Doré T (eds) (2008) *Systèmes de culture innovants et durables: Quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer ? Transversales*. Éducagri éd, Dijon
- Reau R, Monnot L-A, Schaub A, Munier-Jolain N, Pambou I, Bockstaller C, Cariolle M, Chabert A, Dumans P (2012) Les ateliers de conception de systèmes de culture pour construire, évaluer et identifier des prototypes prometteurs. *Innovations Agronomiques* (20), 5-33.(2012)

- Renaud-Gentié C, Perrin A, Rouault A, Garrigues-Quéré E, Renouf M, Séverine J, Czyrnek-Delêtre M, Jourjon F (eds) (2018) *Eco-quali-conception© : agroecological transition in viticulture through Life Cycle Assessment*
- Richard A (2018) *L'approche systémique à l'échelle de l'exploitation agricole au service de la qualité des eaux souterraines. L'expérience d'une démarche de co-conception avec et par les agriculteurs.*
- Richard A, Casagrande M, Jeuffroy M-H, David C (2020) A farmer-oriented method for co-designing groundwater-friendly farm management. *Agron Sustain Dev* 40:477. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00622-7>
- Rip A, Kemp R (1998) Technological change. In: Rayner S, Malone EL (eds) *Human choice and climate change: Volume 2: Resources and technology*, vol 2. Battelle Press, Columbus, OH (United States), pp 327–399
- Romera AJ, Bos AP, Neal M, Eastwood CR, Chapman D, McWilliam W, Royds D, O'Connor C, Brookes R, Connolly J, Hall P, Clinton PW (2020) Designing future dairy systems for New Zealand using reflexive interactive design. *Agric Syst* 181:102818. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102818>
- Rosset PM, Machín Sosa B, Roque Jaime AM, Ávila Lozano DR (2011) The Campesino-to-Campesino agroecology movement of ANAP in Cuba: Social process methodology in the construction of sustainable peasant agriculture and food sovereignty. *The Journal of peasant studies* 38:161–191
- Roskopf EN, Serrano-Pérez P, Hong J, Shrestha U, del Carmen Rodríguez-Molina M, Martin K, Kokalis-Burelle N, Shennan C, Muramoto J, Butler D (2015) Anaerobic soil disinfestation and soilborne pest management. In: K. Meghvansi M, Varma A (eds) *Organic Amendments and Soil Suppressiveness in Plant Disease Management*. Springer, pp 277–305
- Rouault A, Perrin A, Renaud-Gentié C, Julien S, Jourjon F (2020) Using LCA in a participatory eco-design approach in agriculture: The example of vineyard management. *Int J Life Cycle Assess* 25:1368–1383. <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01684-w>
- Ryschawy J, Charneau A, Moraine M, Martin G (2018) Dynamix, un « jeu sérieux » pour concevoir des scénarios d'achat-vente entre céréaliers et éleveurs: une application en Ariège. *Fourrages*:207–212
- S. Nilusmas, M. Mercat, T. Perrot, Suzanne Touzeau, V. Calcagno, C. Djian-Caporalino, P. Castagnone, Ludovic Mailleret (eds) (2016) A multi-seasonal model of plant-nematode interactions and its use for durable plant resistance deployment strategies
- Salembier C, Elverdin JH, Meynard J-M (2016) Tracking on-farm innovations to unearth alternatives to the dominant soybean-based system in the Argentinean Pampa. *Agron Sustain Dev* 36:1. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0343-9>

- Salembier C (2019) Stimuler la conception distribuée de systèmes agroécologiques par l'étude de pratiques innovantes d'agriculteurs, ABIES
- Salembier C, Segrestin B, Sinoir N, Templier J, Weil B, Meynard J-M (2020) Design of equipment for agroecology: Coupled innovation processes led by farmer-designers. *Agric Syst* 183:102856. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2020.102856>
- Schot J, Geels FW (2008) Strategic niche management and sustainable innovation journeys: Theory, findings, research agenda, and policy. *Technology Analysis & Strategic Management* 20:537–554. <https://doi.org/10.1080/09537320802292651>
- Schut M, Rodenburg J, Klerkx L, van Ast A, Bastiaans L (2014) Systems approaches to innovation in crop protection. A systematic literature review. *Crop Prot* 56:98–108. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2013.11.017>
- Schut M, Klerkx L, Rodenburg J, Kayeke J, Hinnou LC, Raboanarielina CM, Adegbola PY, van Ast A, Bastiaans L (2015a) RAAIS: Rapid Appraisal of Agricultural Innovation Systems (Part I). A diagnostic tool for integrated analysis of complex problems and innovation capacity. *Agric Syst* 132:1–11. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2014.08.009>
- Schut M, Rodenburg J, Klerkx L, Kayeke J, van Ast A, Bastiaans L (2015b) RAAIS: Rapid Appraisal of Agricultural Innovation Systems (Part II). Integrated analysis of parasitic weed problems in rice in Tanzania. *Agric Syst* 132:12–24. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2014.09.004>
- Sebillotte M (1974) Agronomie et agriculture. Essai d'analyse des tâches de l'agronome. *Cahiers Orstom, série biologie* 24:3–25
- Sebillotte M (1990a) Systeme de culture, un concept operatoire pour les agronomes. In: Combe L, Picard D (eds) *Les systemes de culture*. INRA, Paris (france), pp 165–196
- Sebillotte M (1990b) Système de culture, un concept opératoire pour les agronomes. *Les systèmes de culture*. INRA éditions:165–196
- Sebillotte M, Papy F (2010) Michel Sebillotte, agronome: Penser l'action. *Nat. Sci. Soc.* 18:446–451. <https://doi.org/10.1051/nss/2010047>
- Sebillotte M, Soler L-G (1990) Les processus de décision des agriculteurs. *Modélisation systémique et système agraire: décision et organisation*, Paris, INRA Éditions:93–118
- Silva JCPd, Medeiros FHVd, Campos VP (2018) Building soil suppressiveness against plant-parasitic nematodes. *Biocontrol Science and Technology* 28:423–445. <https://doi.org/10.1080/09583157.2018.1460316>
- Simon HA (1969) *The sciences of the artificial*. Cambridge, MA
- Souchère V, Millair L, Echeverria J, Bousquet F, Le Page C, Etienne M (2010) Co-constructing with stakeholders a role-playing game to initiate collective management of erosive runoff risks at the watershed scale. *Environmental Modelling & Software* 25:1359–1370. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2009.03.002>

- Soulard C-T (2014) Les agricultures nomades, une caractéristique du périurbain. *Pour* 224:151. <https://doi.org/10.3917/pour.224.0151>
- Soulard C-T, Perrin C, Jarrige F, Laurens L, Nougaredes B, Scheromm P, Chia E, Clement C, Michel L, Amri NH (2018) Les relations entre ville et agriculture au prisme de l'innovation territoriale. In: Faure G, Chiffolleau Y, GOULET F, Temple L, Touzard J-M (eds) *Innovation et développement dans les systèmes agricoles et alimentaires*, Quae. Quae, Versailles
- Steingröver EG, Geertsema W, van Wingerden WKRE (2010) Designing agricultural landscapes for natural pest control: A transdisciplinary approach in the Hoeksche Waard (The Netherlands). *Landscape Ecol* 25:825–838. <https://doi.org/10.1007/s10980-010-9489-7>
- Stirling GR (2013) Integration of organic amendments, crop rotation, residue retention and minimum tillage into a subtropical vegetable farming system enhances suppressiveness to root-knot nematode (*Meloidogyne incognita*). *Australasian Plant Pathol.* 42:625–637. <https://doi.org/10.1007/s13313-013-0236-9>
- Tilman D, Clark M (2015) Food, agriculture & the environment: Can we feed the world & save the earth? *Daedalus* 144:8–23
- Tilman D, Cassman KG, Matson PA, Naylor R, Polasky S (2002) Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nat* 418:671
- Toffolini Q (2016) Produire des connaissances actionnables pour la re-conception pas-à-pas de systèmes de culture vers l'agroécologie
- Torres PMdA (2018) An overview on strategic design for socio-technical innovation. *Strategic Design Research Journal* 11. <https://doi.org/10.4013/sdrj.2018.113.02>
- Vanloqueren G, Baret PV (2008) Why are ecological, low-input, multi-resistant wheat cultivars slow to develop commercially?: A Belgian agricultural 'lock-in' case study. *Ecological Economics* 66:436–446. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.10.007>
- Vanloqueren G, Baret PV (2009) How agricultural research systems shape a technological regime that develops genetic engineering but locks out agroecological innovations. *Res Policy* 38:971–983. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2009.02.008>
- Vereijken P (1997) A methodical way of prototyping integrated and ecological arable farming systems (I/EAFS) in interaction with pilot farms. *European Journal of Agronomy* 7:235–250. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(97\)00039-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(97)00039-7)
- Veresoglou SD, Rillig MC (2012) Suppression of fungal and nematode plant pathogens through arbuscular mycorrhizal fungi. *Biol Lett* 8:214–217. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2011.0874>
- Verret V, Pelzer E, Bedoussac L, Jeuffroy M-H (2019) Traque aux innovations d'agriculteurs pour la conception d'associations d'espèces incluant des légumineuses. *Innovations Agronomiques* 74:143–154

- Verret V, Pelzer E, Bedoussac L, Jeuffroy M-H (2020) Tracking on-farm innovative practices to support crop mixture design: The case of annual mixtures including a legume crop. *European Journal of Agronomy* 115:126018. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126018>
- Villeneuve F, Djian-Caporalino C, Szilvasi S (2013) Les nématodes et les cultures légumières. *Biologie et contexte réglementaire (1ère partie)*. *Infos CTIFL* 289:41–50
- Vinck D (2009) De l'objet intermédiaire à l'objet-frontière: Vers la prise en compte du travail d'équipement. *Revue d'anthropologie des connaissances* 3:51–72
- Wezel A, Bellon S, Doré T, Francis C, Vallod D, David C (2009) Agroecology as a science, a movement and a practice. A review. *Agron Sustain Dev* 29:503–515. <https://doi.org/10.1051/agro/2009004>
- Wezel A, Casagrande M, Celette F, Vian J-F, Ferrer A, Peigné J (2014) Agroecological practices for sustainable agriculture. A review. *Agron Sustain Dev* 34:1–20. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0180-7>
- Wurst S (2010) Effects of earthworms on above- and belowground herbivores. *Applied soil ecology* 45:123–130. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2010.04.005>

Annexes

Sommaire des Annexes

Annexe A.	Guide d'enquête exploratoires conseiller agricole	270
Annexe B.	Grille d'enquête agronomique et sociotechnique des maraîchers groupe mixte	271
Annexe C.	Ajout à la grille d'enquête du diagnostic agronomique et sociotechnique groupe avec un débouché commun	273
Annexe D.	Arbre C-K de référence construit sur la base de l'analyse sociotechnique	274
Annexe E.	Arbre C-K de représentation des solutions traquées	275
Annexe F.	Déroulé détaillé des ateliers	276
Annexe G.	Questionnaire d'évaluation des ateliers	297
Annexe H.	Farm characteristics of farmers involved in the two groups of workshop step 1	302
Annexe I.	Posters présentant les techniques	303
Annexe J.	Leviers présentés dans l'atelier 3.....	308
Annexe K.	Représentation des exploitations « témoins ».....	310
Annexe L.	Concepts of solutions and linked knowledge designed during workshop step 2 by the common-outlet group	313
Annexe M.	Arbres C-K de représentation des solutions conçues Ateliers étape 1	316
Annexe N.	Description des actions conçues.....	318
Annexe O.	Arbres C-K de représentation des solutions conçues Atelier étape 2	329
Annexe P.	Principle of the 4 th complex coupled innovation design in workshop 2	331
Annexe Q.	Critères détaillées d'évaluation des innovations	332

Annexe A. Guide d'enquête exploratoires conseiller agricole

Je souhaite (i) mieux comprendre le contexte du maraîchage Sud-Est de la France au contact des acteurs de terrain, (ii) connaître les différents acteurs filière maraîchère de la région et leurs relations et (iii) identifier un ou des problèmes clés pour lesquels vous sentez un besoin d'appui extérieur scientifique.

Présentation conseillers et structure de conseil

- Pouvez-vous vous présenter ?
 - o Parcours
 - o Fonctions/Responsabilités actuelles (journée type)
 - o Qui conseillez-vous ?
- Pouvez-vous présenter votre structure ?
 - o Combien d'employés ?
 - o Qui conseillez-vous (au niveau de la structure) ?
 - o Autres activités que conseil ?
 - o Financement ?

Interactions avec autres acteurs

- Travaillez-vous avec des acteurs de l'aval de la filière (/producteurs) ? Quelle est la nature de ce travail ?
- Travaillez-vous avec d'autres conseillers ? Nature du travail ? Autres interactions ?
- Travaillez-vous avec des structures de recherche ? Lesquelles ? Sur quelles thématiques/projets ?
-

Problèmes du secteur maraîcher provençal et du conseil

-
- Quelles sont les problèmes principaux auxquels le maraîchage du Sud-Est de la France font face ?
 - o Problèmes agronomiques ? (Santé végétale ? BT ? NàG ?)
 - o Problèmes futurs ? (BT ? NàG ?)
 - o Conséquences de ces problèmes (Niveau de perte de rdmt ? Niveau de perte économique en %revenu ? Mis en danger de la survie de l'exploitation ?)
 - o Bio vs Conventionnel
 - o Est-ce que les agriculteurs ont consciences de l'importance des dégâts réalisés par les BT ? Pourquoi ?
- SWOT du secteur maraîcher
- Comment les traitez-vous ?
- Quels problèmes rencontrez-vous en tant que conseiller ou au niveau de votre structure dans votre travail de soutien/recherche de solutions pour les maraîchers ?
- SWOT de la capacité de votre structure à traiter les problèmes des problèmes mentionnés
- Y a-t-il selon vous un besoin d'appui scientifique sur une ou plusieurs de ces questions ?
 - o Quel type d'appui ? Quelles sont les innovations à réaliser ?
 - o Appuis aux conseillers/agriculteurs/aux 2 ?

Annexe B. Grille d'enquête agronomique et sociotechnique des maraîchers groupe mixte

Amener feuille A3 pour représentation de la ferme et feuille avec calendriers de culture pour représentation temporelle (Attention à avoir le calendrier de culture pour chaque tunnel pour voir les décalages temporels même si c'est la même succession)

1. Rappel **objectif de l'entretien** : collecter données sur gestion NàG, freins à mise en œuvre de techniques et données générales essentielles pour envisager solutions
2. Rappel **principes** (anonymat, ...)
3. **Problèmes de NàG et autres pb agronomiques**
 - ☐ Quelles espèces NàG
 - ☐ Où ? Faire plan de l'EA
 - ☐ Dans quels sols (%Argile, %cailloux ?) ? Indiquer la diversité pédologique sur la carte
 - ☐ Comment identifiez-vous qu'il y a une attaque de NàG ?
 - ☐ Quand ? Tracer évolution, origine contamination si possible, lien à surplus d'eau ou origine plants (?)
 - ☐ Dommages sur les cultures (rendement, vigueur plantes, qualité)
 - ☐ Avec quelles cultures ? Tracer rotations sur parcelles infectées puis calendrier
 - ☐ Autres BATs ?
 - ☐ Autres pb agronomiques (ex : adventices, BAA, fertilité, sols hydromorphes)
4. **Leviers actuels mobilisés**
 - ☐ Quels moyens de contrôle employez-vous ? Partout ? Lister leviers et lier spatialement et temporellement
 - ☐ Vérifier si rien oublié (**voir Fiche TKs**) et fait partout
 - ☐ SdC sous abris non contaminés (pour chaque tunnel)
 - ☐ SdC en PC (pour chaque parcelle)
 - ☐ Autres ateliers de production
5. **Freins à la mise en œuvre d'autres leviers**
 - ☐ Comment feriez-vous pour intégrer/Est-ce réalisable, quelles conditions ? (**voir fiche TKs**)
6. **Ressources de l'EA**
 - ☐ Main d'œuvre en ETP Perm/saisonnière
 - ☐ Equipement travaux PC ? (travail du sol, épandeur, pulvé, irrig)
 - ☐ Equipement travaux sous abris ? (travail du sol, épandeur, pulvé, irrig)
 - ☐ Equipement pour conditionner ? (machine)
 - ☐ Equipement pour stocker ? (chambre froide)
 - ☐ Espace non utilisé?
7. **SST**
 - ☐ Entreprises mobilisées travaux sol ?
 - ☐ Débouchés : CL/CC, clients, %de la production, industrie/transfo
 - ☐ Fournisseurs d'intrants (dont semences) et de plants (tj ce qui est demandé ?)
 - ☐ Planification des cultures, quand comment ?
 - ☐ Conseillers
 - ☐ Collectifs
 - ☐ Autres sources de connaissance (groupe de travail)
 - ☐ Action collective, coopérative envisageable ? Causes de l'individualisme local
8. **Objectifs**

- ☐ Vous serez satisfait des solutions de gestion des nématodes si ? (penser aux contraintes d'EA aussi)
- ☐ Comment voyez-vous l'évolution de votre EA à long termes (10ans)?
- ☐ Qu'est-ce qui vous plaît dans votre activité agricole/dans votre métier ? (demander quand je vois l'opportunité)
- ☐ Approche : contrôle des NaGs ? Eradication ?
- ☐ Autres sources de revenus ?

Intéressé pour être cas d'étude avec autres producteurs ?

Je t'ai présenté les objs du projet mais ça m'intéresse de savoir quelles sont tes attentes personnelles de ce projet ?

Fait ?	Leviers TKs	Freins
	Pphy : Nettoyage outils et bottes	
	Pphy : travail zone non contaminée puis contaminée	
	Pphy : Retrait des racines	
	Pphy : gestion de l'eau	
	Pphy : décalage des calendriers de plantation	
		

Grilles complétées par une carte de l'exploitation et un calendrier de culture fourni par le maraîcher ou construit ensemble.

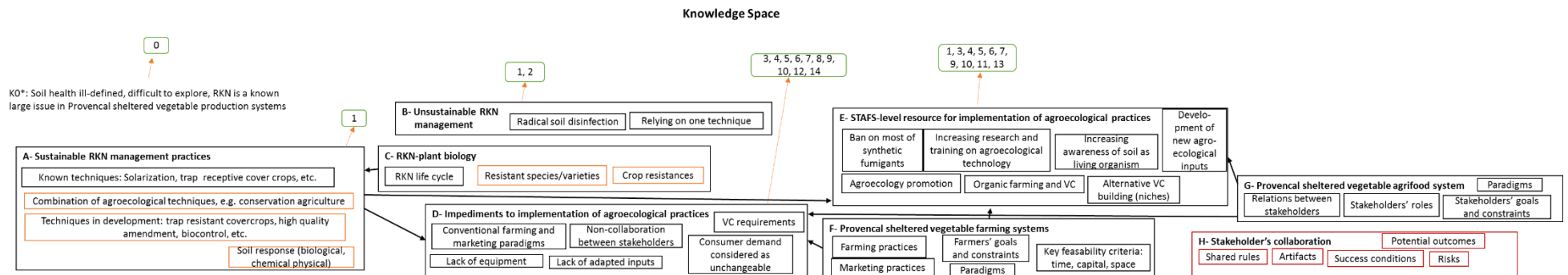
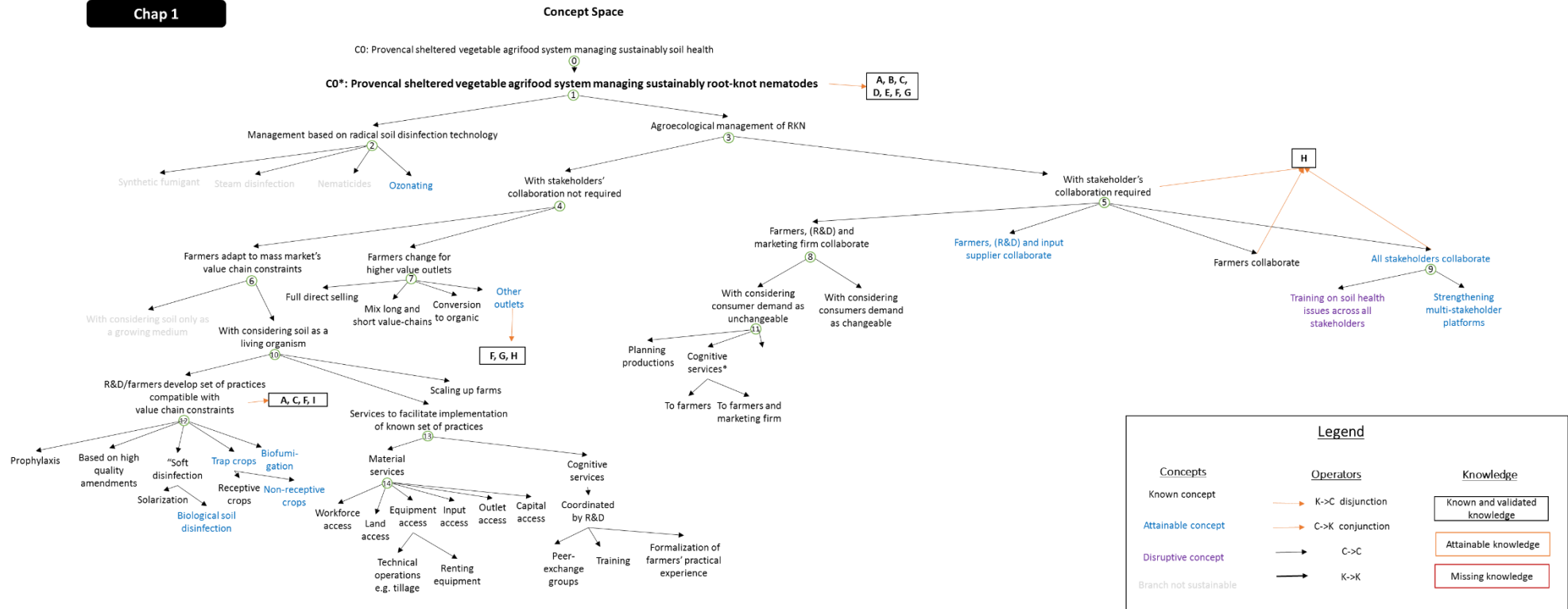
Annexe C. Ajout à la grille d'enquête du diagnostic agronomique et sociotechnique groupe avec un débouché commun

Focus ProNatura/MTB : marges d'actions qu'ils vous laissent/donnent

- Débouchés : CL/CC, **autres clients que ProNat, %des V la production**, industrie/transfo
- Comment se déroule la planification des cultures avec ProNat?
 - Quand ?
 - Qui la fait ?
 - Sur quoi : dates, quantités, espèces, variétés, qualités ?
 - Quels engagements de Pronatura : volumes ? prix ?
- Est-ce que ProNatura ou MediTerraBio vous accompagne dans la gestion de vos sols ?
 - Conseil TK/Accompagnement agronomique ? Quelle fréquence ?
 - Flexibilité sur le calendrier de production ? Arrangement avec autres producteurs (décalage/BAT) : qui décide des dates de plantations ?
 - Facilite la diversification des cultures ou le maintien de la diversité ?
 - Comment se déroule la proposition d'une nouvelle référence ? (vous ou ProNat demande ? différence ? détermination du prix)
 - Quelle marge de manœuvre avez-vous dans le choix des variétés ?
 - Programme « anti-spécialisation » de MTB ?
 - Met à disposition des fournisseurs d'amendement, de variétés, main d'œuvre, biocontrôle, matériel ? Paye des analyses de sol ? Font des expés ?
 - Quel encadrement des techniques de production par le cahier des charges/sol ? CdC écrit ? informel ?
 - Valorisation si non agréé (ex : salades + petites, tâches sur fruits)
- En saison : Respect de la planification des 2 côtés (ProNat et vous) ? Quelle détermination du prix à chaque période?
- Quelle différence entre ProNatura et un autre grossiste-expéditeur bio ?
 - **Que vous apporte les autres circuits de commercialisation/ ProNatura ?** (sécurité de la diversité ? Débouchés pour légumes spécifiques ?)
- Que vous apporte la participation à l'OP MediTerraBio ? Quelle différence si vous n'y étiez pas ?
 - **Rôle de MTB dans la relation commerciale avec ProNat ?**
 - Prime ?

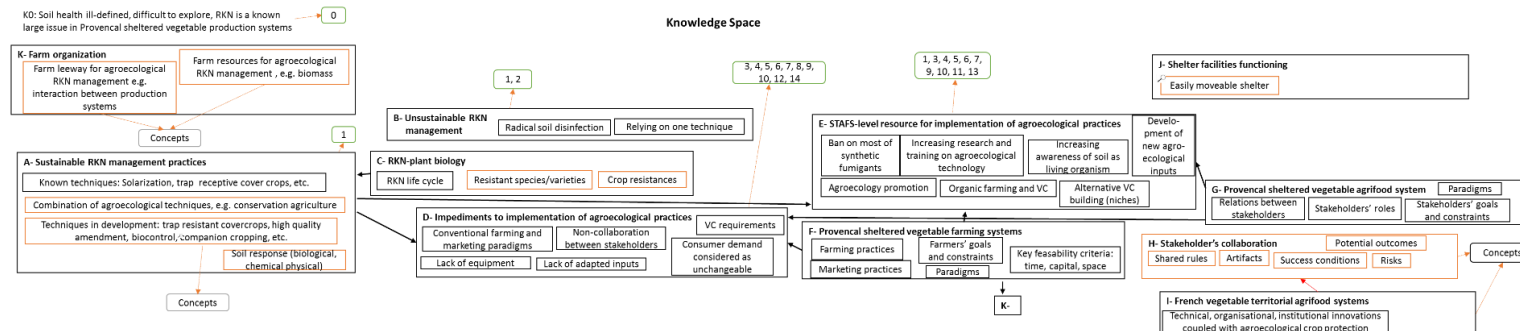
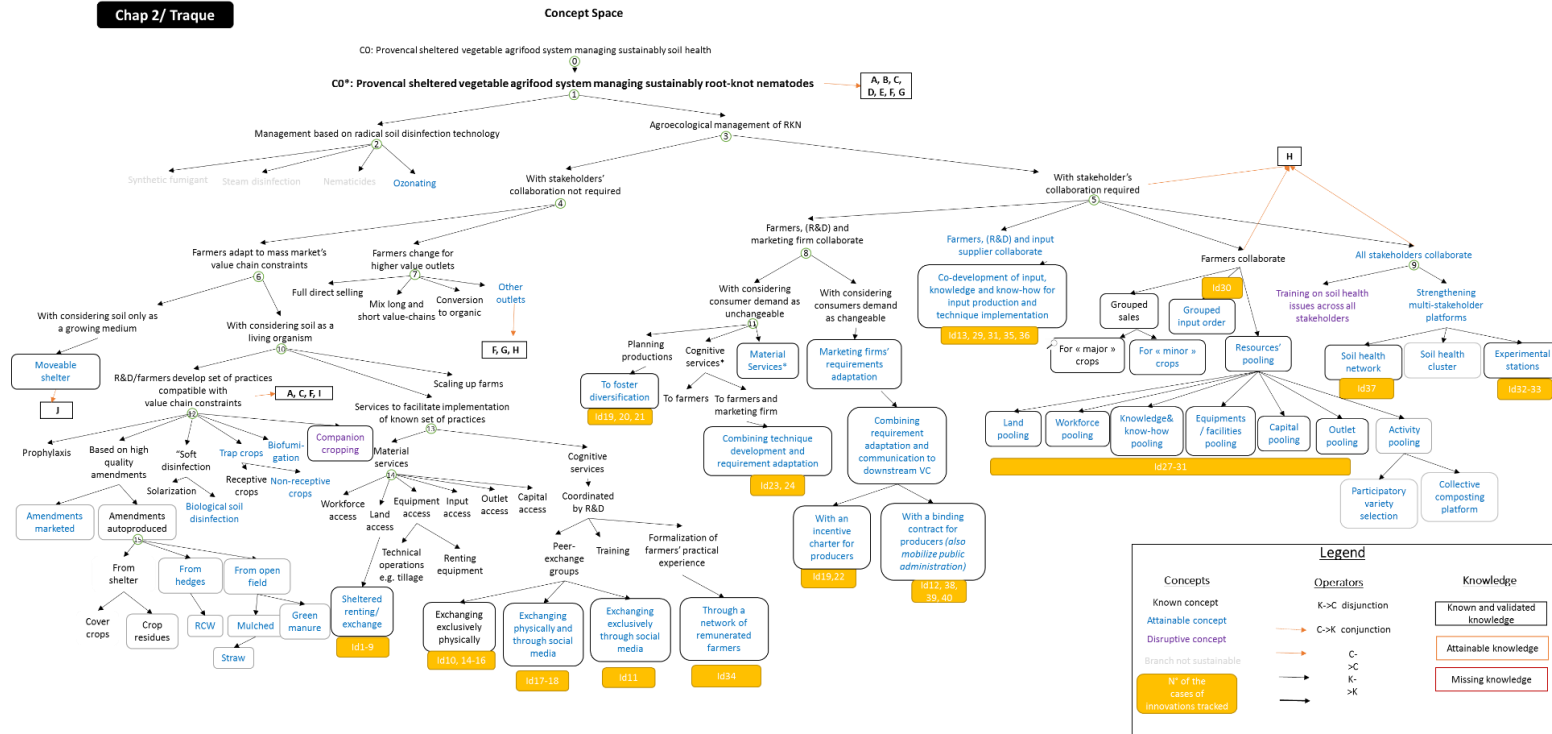
Annexe D. Arbre C-K de référence construit sur la base de l'analyse sociotechnique

Chap 1



Annexe E. Arbre C-K de représentation des solutions traquées

Chap 2/ Traque



Annexe F. Déroulé détaillé des ateliers

Atelier 1 Groupe avec débouché commun

Déroulement de la soirée 16h-20h

Durée	Cumul	Activité
20'	0h20	Accueil + Brise glace
10'	0h30	Introduction (5' prez, 5' Q)
15'	0h45	Présentation méta-poster (5') + jeu des gommettes (10')
50'	1h35	Présentation des techniques + discussion freins (5' prez/poster+ 5' questions+5' ��chge freins)
15'	1h50	Présentation des solutions innovantes (5' présentation + 10' discussion)
10'	2h00	Pause
90'	3h40	Cas d'étude (15' présentation de l'EA, 5' présentation jeu, 60' Jeu (10' de diagnostic), 10' synth des propositions)
10'	3h40	Conclusion de la soirée + évaluation de l'atelier (se positionnent : 5' +)
20'	4h	Pot

Accueil + Brise-Glace

Objectif	Briser la glace entre les participants tout en les accueillant
Durée	15 minutes
Qui ?	Tous
Méthode retenue, déroulé	• Leur laisser 5mn quand ils arrivent • Faire des binômes au fur et à mesure, avec des gens qui ne se connaissent pas, y inclure EB et HV • Chacun a une petite fiche avec les points à aborder dans la discussion + de quoi noter s'ils veulent • Café/Thé + gâteaux à dispo • 10mn avant la fin, s'assurer qu'ils ont changé et noté les attentes, 7mn avant la fin demander de présenter l'autre • Ramasser les post-its
Consignes	• Se présenter • Demander à la personne à Son travail

	○ Si maraîcher : quelle surface, type d'abris et cultures principales, est-ce qu'il/elle a des pbs de NàG, depuis combien de temps il/elle est installé(e) et où ? ○ Si non maraîcher : où elle travaille, depuis combien de temps, ses missions ○ Ses attentes de la soirée, lui demander de l'écrire sur un post-it ● Présenter l'autre à tout le monde
TO DO	● Préparer fiches consignes + feuille, post-it et stylo ● Préparer eau chaude, café + gâteaux

Introduction de la soirée

Présentation de la soirée

Objectif	Présenter le déroulement et fonctionnement de la soirée
Durée	5mn prez, 5 mn questions
Qui ?	Yann
Méthode retenue, déroulé	● Présentation en m'appuyant sur méga-post-it sur paper-board. ○ Diagnostic et objectif (sur méga-post-it) : Nématodes à Galles touchent 40% des EA maraîchères avec abris en PACA, dont vos EAs et le nombre d'exploitations touchés augmente. Pas de solutions miracle pour contrôler les nématodes, il faut combiner des leviers techniques ce qui pose un certain nombre de problème concret : commercialisation, approvisionnement, calendrier de cultures. Je travaille avec 2 groupes sur la création de stratégie durable de contrôle des NàGs. J'ai fait enquêtes, 2 d'entre vous ont des pbs de NàG, les autres pbs maîtrisés ou pas de pb mais intéressés à titre préventif, aujourd'hui on vous présente les TKs, freins, ... La fois prochaine (Mai). Et en Automne ... Nous allons donc ... ○ Déroulé de la soirée (sur méga post-it avec tps réel de la soirée) ○ Rappel de qqes règles de savoir vivre pour bien fonctionner en groupe (sur méga post-it, voir consignes) ○ Est-ce que ça vous convient ? Est-ce que vous avez des questions ? ● Je dois prendre le son (confidentiel) et j'aurais besoin de prendre des photos, ok ? ● Annoncer que je vais être gardien du temps, donc un peu chiant ● Coller méga post-its sur le mur pdt qu'ils réfléchissent à des questions
Consignes	● Respect de la parole des autres ● Expression argumentée ● Bienveillance (pas de jugement), sans complaisance (on peut débattre en argumentant)
TO DO	● M'entraîner à le faire de manière claire en 5-10' ● Préparer méga-post-its en avance + voir où les coller

Présentation des techniques

Présentation méta-poster

Objectif	● Présentation brève et globale du cycle des nématodes + des techniques sur le métaposter et sur les posters ● Leur fournir une base pour ensuite aller voir chaque poster (jeux des gommettes)
Durée	5 minutes

Qui ?	Hélène
Méthode retenue, déroulé	- On se met en arc de cercle autour du méta-poster et d'Hélène qui présente - Si questions sur ma fiche pas posée, je la pose pour les agris en précisant que ça vient des enquêtes
Consignes	Insister sur le cycle des NàGs, le fait qu'ils peuvent faire pls cycles, l'impact du réchauffement climatique pour sensibiliser les personnes qui n'ont pas trop de pb pour le moment
TO DO	Afficher méta-poster

Jeu « Quelles pratiques avez-vous ? »

Objectif	- Personnaliser la présentation des techniques (« Besoin de + de connaissances », « Fait »), donner une base pour aborder les freins (« Veux/Peux pas ») - Les faire regarder de près les posters - Délier l'expression grâce à l'anonymat initiale
Durée	10 minutes
Qui ?	Les maraîchers + en animation Hélène et moi
Méthode retenue, déroulé	- Expliquer clairement les consignes basés sur un méga post-it (à placer jsuteà gauche du premier poster (donc à droite du méta) - Laisser 8mn aux maraîchers pour lire et placer leurs gommettes en restant à proximité pour répondre à leurs questions
Consignes	- Chaque poster reprend plusieurs leviers techniques - Si vous mettez en œuvre le levier c'est-à-dire au moins une des techniques décrites, mettez votre gommette dans « je fais ». Sinon mettez « Je ne peux pas », « je ne veux pas » suivant la cause. Si vous voulez le faire mais n'avez pas encore eu l'occasion : « je veux faire ». Si vous avez besoin de plus d'informations pour pouvoir répondre : mettez « J'ai besoin de plus d'informations ». Vous pouvez mettre plus d'une gommette par poster, ex : « Je veux faire » ET j'ai besoin de plus d'informations - Il y a un poster blanc ou l'on peut rajouter des techniques oubliées et mettre des pastilles
TO DO	- Préparer et afficher méga-post-it présentation des consignes - Afficher les posters dans l'ordre, de gauche à droite : méta-poster, consignes, poster 1-4, méga-post-it « autres TKs ». - Préparer les gommettes à distribuer

Présentation des techniques et freins

Objectif	- Présenter et échanger sur les techniques possibles derrière les leviers de contrôle existant - Souligner les freins qu'ils rencontrent à leurs mises en œuvre
Durée	50 mn
Qui ?	Hélène et Yann

Méthode retenue, déroulé	- Yann présente l'obj et déroulé de cette phase : Hélène va vous présenter les TKs détaillés sur chaque poster (5mn), puis je vais partager avec vous les freins à leur mise en œuvre que vous rencontrez et qui sont ressortis lors de nos entretiens (<5mn) puis questions sur l'un ou l'autre (2-3mn) - Hélène présente les techniques en se basant sur les posters : pratique générale, méca d'action, intérêt - Yann présente au début qu'un certain nombre de freins à la mise en œuvre des différentes TKs qu'on va rebondir sur les gommettes pour aborder les freins en précisant au début - Questions des maraîchers/EB - Demander à la fin s'il y a d'autres techniques oubliées
Consignes	Poser questions
TO DO	- Préparer les posters - Imprimer les posters en A4 pour les distribuer à la fin

Présentation des solutions

Objectif	Présenter qqes solutions « décalantes »
Durée	15 mn
Qui ?	Yann
Méthode retenue, déroulé	- Yann présente l'obj et déroulé de cette phase : - Ayant identifiés un certain nb de freins → je suis allé chercher des solutions mises en œuvre pour les lever-contourner, je veux vous présenter brièvement qqes unes, qui pourrait vous inspirer lorsqu'on va réfléchir à une stratégie de gestion sur l'EA de SM après. - Donner le levier socioTK générique puis les exs à l'oral pour éviter de fixer - Yann présente basé sur un poster (5mn) - Questions-discussions (10mn) : - Est-ce que c'est envisageable sur vos exploitations ?
Consignes	Poser questions
TO DO	- Créer et faire imprimer le poster : choisir des solutions décalés/décalantes et différentes pour éviter fixation (me baser sur poster traque ?) - Imprimer les posters en A4 pour les distribuer à la fin

PAUSE (10mn) (coller les post-its « Attentes » sur un méga-post-it prévu à cet effet)

Cas d'étude

Présentation de l'exploitation et du jeu

Objectif	Familiariser les participants à la fois avec le cas d'étude et l'outil de représentation

Durée	20 minutes
Qui ?	Maraîcher témoin (SM) + Yann
Méthode retenue, déroulé	- Yann : présentation des objectifs basés sur méga-post-it, choix de l'EA de SM car présente des difficultés/NàG -> bon ex (à considérer comme tel, c'est un exercice, un jeu, on ne cherche pas à lui dire ce qu'il doit faire). - Yann : présentation du principe du jeu - Yann : préciser que représentation est issue de l'échange avec SM et représente tout ce qui peut influencer le risque de dégâts NàG en termes TKs et d'organisation (2mn) - Présentation orale de l'exploitation par le chef d'exploitation avec les points à aborder (feuille) (10mn) - Yann : présentation du déroulé du jeu et ses règles basé sur méga post-it (voir Atelier) (5mn) - Si vous avez une question TK : HV est là pour ça - Moi j'anime le jeu, je vais vous aider à représenter les idées, vous posez des questions pour vous faire expliciter ou creuser une idée - Préciser que l'idée est de partir des TKs et d'explorer comment on peut les mettre en œuvre quitte à jouer sur des éléments à l'échelle de l'EA et du supra-EA. - Questions (3mn)
Consignes	•
TO DO	- Installer la représentation de l'EA, avoir envoyé en amont une photo à SM - Préparer 2 fiches des points à aborder : une pour SM et une pour moi - Préparer sur méga-post-it/Paper-board/tableau véléda « obj, déroulé, règles »

Atelier

Objectif	- Formation : Faire appliquer le savoir acquis avec les présentations pour faire assimiler et explorer plus en détail leurs mises en œuvre - Formation : Faire assimiler un mode de raisonnement « reconception système » - Concevoir des solutions permettant de lever ou contourner les freins
Durée	70 minutes
Qui ?	Tous
Méthode retenue, déroulé	- Diagnostic (10mn) - Quelle pratique réalisée actuellement augmente le risque NàG ? - Distrib' carte levier TK : 8/pers, temps pour les lire + les expliquer - Proposition levier TK + comment le mettre en œuvre au niveau de la parcelle - Discussions sur mise en œuvre au niveau de la parcelle - Discussion sur ce que ça implique pour l'EA et sur la relation avec autres acteurs. Si je vois qu'ils bloquent, je leur distribue les cartes « inspiration échelle supra-parcellaire ». - Passer à la personne de gauche : proposition d'une TK (<7mn par idée càd points 3à5) Fin- Je ferais une synthèse des idées proposées : lister la colonne de gauche + demander qu'est-ce qui serait combinable ? (10mn) Je représente les innovations au fur et à mesure grâce aux cartes. Je note les éléments clés des idées sur un post-it pour capitaliser et y revenir à la fin (TK de contrôle, moyen de mise

	en œuvre, avantages TK/moyens et inconvénients TKs/moyens en termes de Faisab, bénéf, coût efficacité, transposabilité).
Consignes	• Règles (même qu'avant + 4ie) : ○ Respect de la parole des autres ○ Expression argumentée ○ Bienveillance (pas de jugement), sans complaisance (on peut débattre en argumentant) ○ Penser l'impensable, rouvrir le champ des possibles. donc accepter avec curiosité des propositions qui semblent infaisables mais peuvent le devenir à moyen terme ○ Nous prenons l'exploitation de SM comme exemple, pour rendre le travail concret. En aucun cas nous ne disons à SM ce qu'il doit faire. SM est par contre intéressé par avoir de l'inspiration pour gérer des pbs. Ne vous interdisez pas de proposer des choses, même farfelue. ○ 1 idée par personne sauf si on a déjà fait le tour de tous ○ Image sur la carte pour donner une idée mais toutes TKs correspondantes est valable • Je dois : ○ Lancer le diagnostic ○ Lancer la première intervention TK ○ Poser des questions pour faire expliciter/creuser sur la base du tableau ○ Relancer sur les conditions de mise en œuvre à l'échelle supra-parcellaire, des solutions, en particulier au niveau inter-EAs ○ M'assurer que les suggestions n'augmentent pas d'autres pbs agronomiques de sol (ou autres) ○ M'assurer que tout le monde parle ○ Ecrire les idées ○ Représenter les idées quand on a rempli le tableau ○ Jeter un œil au temps ○ M'assurer qu'il n'y ait pas pls conversations à la fois car je suis incapable de comprendre l'enregistrement après
TO DO	• Préparer les gommettes pour le diagnostic • Préparer les cartes+cartes vierges • Préparer mes jetons pour représenter Pour Hélène et moi • Préparer mon système pour noter les idées de manière organisé de manière à faciliter la restitution finale • Prendre des photos aux moments clés • Au cours de l'atelier : être vigilant sur le temps. Annoncer régulièrement le temps qui leur reste pour que ça les active

Conclusion+ évaluation

Objectif	• Faire le lien avec la suite • Voir quels acteurs inviter
Durée	10mn
Qui ?	Yann

Méthode retenue, déroulé	- Yann : on a vu les TKs, les freins, des ex de solutions et on a réfléchi à comment combiner tout ça sur une EA. La prochaine fois (Mai), on invite d'autres acteurs (fournisseurs, conseillers TKs, MIN, PADV, ...) (i) pour nous présenter des solutions qu'ils mettent en place, (ii) pour imaginer ensemble des solutions aux freins qu'on a commencé à toucher. Ensuite (Automne) on mettra tout ça ensemble pour créer des stratégies de prévention et/ou gestion à mettre en œuvre sur vos EAs. - Yann : Quels acteurs vous aimeriez voir ? - Yann : Dire que je vais leur envoyer un CR illustré des solutions qui ont été évoquées - Yann : Placez-vous par rapport à vos attentes - Distribuer la feuille d'évaluation, les numéros de revue « CTIFL – spécial NàG » + posters imprimés - Pendant que je prépare le pot, pouvez-vous remplir fiche
Consignes	- Remplir la fiche avant de partir - Quand vous voulez partir, prévenez-moi, faut que je vous ouvre
TO DO	Préparer le discours de fin (pts clés)

Atelier 2

Déroulement de la soirée 14h-18h30

Durée prévue	Activité
20'	Tour de table + Accueil (commun)
10	Introduction projet (contexte) (commun)
5	Présentation TKs
20	Présentation de la simulation (séparé)
60	Simulation : « diagnostic sociotechnique » (défixer-faire vivre) (séparé)
15	Pause (commun)
40'	Débriefing (Analyse-Discussion-confrontation) (commun)
60'	Que changer dans la simulation pour pouvoir mieux gérer les NàGs ? On se réunit autour de la table des maraîchers (séparé)
30'	Confrontation-discussions
10'	Conclusion-Evaluation (avec fiches) de la soirée
30'	Pot

Accueil – Introduction

Accueil + Tour de table

Objectif	- Laisser le temps aux participants d'arriver - Favoriser l'interconnaissance et la prise en compte des attentes
Durée	15 minutes
Qui ? Où ?	Tous, dans la grande salle
Méthode retenue, déroulé	• Leur laisser 5mn pour arriver, distribuer des badges avec nom • Café/Thé + gâteaux à dispo • Les mettre par binôme qui ne se connaissent pas, leur donner des fiches préparées, ils doivent demander et retenir (i) Nom, Prénom, (ii) métier et organisation, (iii) Légume préféré, (iv) attentes quant à la réunion de travail (ce qui est important pour qu'ils soient satisfait) (Tous les animateurs) • Les faire s'asseoir par binômes et démarrer un tour de table où ils doivent donner le nom et prénom de leur binôme, le métier + organisation (Yann et Mireille) • Récupérer les fiches et coller sur un poster (Arnaud, Léo) • S'assurer que tout le monde a rendu la charte (Yann et Mireille)
Consignes	• Tour de table : ils doivent dire nom et prénom de leur binôme, le métier + organisation
TO DO	• Préparer méga-post-its » attentes » • Préparer eau chaude, café + gâteaux • Préparer autant de post its/feuilles à scotcher que de participants post-its avec nom prénom, orga, métier et attentes déjà inscrits dessus

Introduction atelier + contexte

Objectif	Leur permettre de comprendre là où va les emmener cette réunion, sa logique et sa cohérence par rapport aux autres
Durée	10 minutes
Qui ? Où ?	Yann dans la grande salle
Méthode retenue, déroulé	• Présenter le projet et le contexte : (i) donner obj de réunion, (ii) replacer dans le contexte plus large du projet : pb de sols dans la région, analyse des freins, premiers ateliers et atelier potentiel à venir, (iii) donner le déroulé global sans rentrer dans les détails mais en précisant qu'on va travailler avec 2 groupes : un groupe plus axé AB et un groupe plus axé non-AB, même si on sait bien qu'en réalité ce ne sont pas 2 univers distincts. L'idée est d'ailleurs d'avoir un échange régulier entre ces 2 groupes aux moments des discussions afin de se nourrir mutuellement et faire avancer les 2 approches, (iv) le fait qu'on va tout du long s'appuyer sur une simulation participante pour échanger sur le diagnostic et concevoir, (vi) rappeler principes de la charte pour que ça se passe bien • Est-ce que ça vous convient ? Est-ce que vous avez des questions ? • Annoncer que Mireille et moi allons gérer le temps donc être un peu strict

Consignes	- Règles pour que ça se passe bien : - Voir principes charte
TO DO	- Préparer méga-post-its : (i) objectifs de la réunion, (ii) déroulé global, (iii) principes et les coller aux murs des 2 salles - Préparer speech

« Présentation rapide des leviers techniques de gestion des NàG »

Objectif	Donner un socle commun de connaissances permettant de comprendre la simulation et les discussions à venir
Durée	5 minutes
Qui ? Où ?	Yann dans la grande salle
Méthode retenue, déroulé	- Dire que je ne suis pas un expert maraîchage, si vous avez des questions adressez les à Laurent Camoin et Caroline Bouvier. Je vais vous présenter les leviers clés que nous mobiliserons dans la suite de la réunion et comment nous les avons représentés dans la simulation à venir - Expliciter les 3 grandes catégories en montrant au fur et à mesure les cartes intrants s'y réfèrent et une carte type : désinfection totale, désinfection partielle, prophylaxie, diversification des cultures avec cultures commerciales non hôtes ou mauvais hôtes, entretien de la vie du sol permettant de stimuler les antagonistes avec amendements actifs (et engrais vert voir cat préc) - Question de compréhension ? Le reste on en parlera pendant les phases de discussion après la simulation.
Consignes	Ne pas trainer dessus
TO DO	Préparer slides et speech

« Simulation participante »

Présentation

Objectif	Donner à comprendre comment fonctionne la simulation à tous les acteurs sans qu'ils aient l'impression que je leur explique les règles d'un jeu.
Durée	20 minutes
Qui ?	Mireille, Léo, Marion (salle Alvéole) et Yann, Arnaud, Clémentine (salle Mistral)
Méthode retenue, déroulé	- Déplacement du groupe 2 (5mn) - Les maraîchers jouent les non-maraîchers et les non-maraîchers jouent les maraîchers. Au sein de ces 2 groupes, la répartition des rôles se fait au hasard (commencer par les maraîchers, le plus facile) sauf R&D, au moins un acteur qui connaît bien les techniques (5mn)

	- Présentation de la simulation : l'animateur part du rôle de maraîcher et joue un tour entier. Le co-animateur joue les autres rôles au fur et à mesure qu'ils sont sollicités. Toutes les règles nécessaires pour démarrer sont explicitées point par point. Tous les participants suivent l'animateurs et peuvent poser leurs questions. L'animateur doit distinguer les réponses aux questions qui relèvent de la présentation (ex : puis-je me déplacer comme je veux dans la salle ?) et ce que les participants découvriront en jouant (ex : pourquoi il n'y a pas de cartes connaissances « biocontrôle »). - Préciser que la simulation ne représente pas parfaitement la réalité (ex : valeurs relatives des intrants) mais qu'elle représente les processus à l'œuvre freinant le changement de pratiques des maraîchers. - Préciser que seuls les intrants concernant la gestion de la santé des sols sont introduits. Il n'est pas nécessaire de gérer la fertilisation par exemple.
Consignes	Celles du Jeu (voir doc Jeu_At2)
TO DO	- Préparer et installer le jeu dans les 2 salles : 2x2 chapeaux pour le tirage au sort rôle + préparer les 2 « maraîchers démo avec 2 parcelles » - Flécher la seconde salle

Simulation

Objectif	- Faire vivre le fonctionnement du SST tel que je l'ai analysé - Défixer, faire sortir les acteurs de leur cadre de pensée habituel - Briser la glace entre acteurs
Durée	60mn
Qui ?	Même répartition des animateurs et observateurs
Méthode retenue, déroulé	- Viser de réaliser 8 tours de jeu (4 ans) de manière à avoir la phase où les acteurs voient venir les pbs puis essaient de les résoudre mais se retrouvent bloqués ET certaines tentatives de résolution sur lesquelles appuyées le démarrage de la conception - Chaque tour représente une saison (Eté/Hiver), deux tours une année. Un tour comporte 2 phases : la phase 1- « Occupation du sol » et la phase 2- « Vente et évolution du sol ». A partir de l'année 2 les durées des phases sont respectivement de 4 et 3mn. Lors de la Phase 1 les maraîchers prévoient leur occupation du sol et les techniques qu'ils veulent réaliser, vont acquérir les « savoir-faire », « intrants » et « équipements » correspondant auprès du responsable R&D et du Fournisseur et installent ces cartes sur leurs plateaux. Pendant ce temps le Grossiste vend au Marché global ce qu'il a acheté au tour d'avant. Phase 2 – Les maraîchers récoltent en tenant compte de la perte de rendement lié à l'état du sol, vont vendre au grossiste ou au marché global et reviennent à leur table pour calculer l'évolution de la contamination de leurs sols. Pendant ce temps Le respo R&D et le Fournisseur peuvent se coordonner pour développer de nouveaux intrants et connaissances dans la limite d'une de chaque par saison en allant solliciter l'animateur. - Essayer de faire respecter le temps dès le premier tour. Donner max 10mn et 8mn pour le premier tour, 6 et 5mn pour le 2nd tour en marquant à chaque fois le dépassement du temps normal pour les habituer

	• Rappeler : dans la vie réelle on court toujours après le temps également, les maraîchers encore plus que les autres • L'animateur principal gère la succession des phases et les demandes d'autorisation d'actions en dehors du cadre basique du jeu (ex : je veux monter une AMAP ou un second grossiste, je veux créer une CUMA). L'animateur principal et le co-animateur se déplacent pour observer le jeu, aider les participants qui galèrent ou font des erreurs, répondre aux questions concernant le fonctionnement du jeu et presser les acteurs par le temps (« Vite, la saison avance, il faut semer/récolter/vendre »).
Consignes	• Voir document « Règles_Simulation » • Attention le plateau ne doit pas être modifié à la fin de la simulation
TO DO	• Réaliser tous les supports de jeu + des extensions correspondant aux innovations probables (développement d'un circuit court) • Former les animateurs et co-animateurs

Débriefing

Objectif	• Partager et s'accorder sur les éléments clés du verrouillage = les blocages principaux (= les processus socio-techniques qu'il faut lever) • Mettre en regard ces processus en conventionnel et en bio
Durée	40mn
Qui ? Où ?	• Tous dans la grande salle. J'anime l'ensemble du débriefing. Mireille note les blocages au tableau (sur ordi) et peut intervenir pour relancer un ou des acteurs. Marion et Clémentine notes les réactions sur la grille.
Méthode retenue, déroulé	• Réunir tout le monde dans la grande salle (5mn) • Faire en sorte que les deux groupes puissent avoir leurs plateaux sous les yeux • Leur expliquer que nous allons maintenant débriefer sur l'expérience des freins à la mise en œuvre de techniques alternatives que vous avez vécu. • Demander à chaque groupe l'un après l'autre (15mn/groupe conventionnel puis 10mn/groupe bio en faisant l'hypothèse que ça ira plus vite pour le 2nd groupe, demander « quels points retrouvez-vous ? ») : ○ Comment s'est passé la simulation pour les maraîchers de votre groupe ? Avez-vous réussi à maîtriser la contamination de vos sols tout en commercialisant vos produits ? ▪ Oui : avez-vous réussi dès le début ? Si non, qu'est-ce qui vous en a empêché ? Comment avez-vous fait pour en sortir ? Quelles différences avec les autres maraîchers de votre groupe ? ▪ Non : qu'est-ce qui vous en a empêché ? Est-ce que d'autres maraîchers de ce groupe ou de l'autre ont réussi ? Comment ? ○ Ceux qui représentaient les autres acteurs, comment expliquez-vous ces difficultés ? Êtes-vous satisfaits de la partie ? ▪ La R&D : avez-vous réussi à accompagner les producteurs et vendre les savoir-faire ? ▪ Les fournisseurs d'intrants : avez-vous réussi à commercialiser d'autres produits que les plants/semences des cultures classiques ?

	▪ Le grossiste, avez-vous réussi à commercialiser un maximum de production à un tarif intéressant ? ▪ Finalement est-ce que les problèmes de sols des maraîchers ont touchés tous les acteurs ? Est-ce que tous les acteurs représentés ont intérêt à ce que les maraîchers gèrent efficacement leurs sols de manière agroécologique ? • Reformuler régulièrement pour faire le point sur un blocage, le traduire en levier, vérifier que tout le monde est d'accord pour dire que cela correspond à la réalité et co-animateurs vérifient qu'on aborde tous les points de la fiche. Demander s'il y a d'autres éléments concernant ce frein/levier que ce qui vient d'être évoqué. • Mireille/Yann note les freins pour le groupe qu'il n'a pas supervisé à l'aide du tableau préparé (1 colonne par groupe, autant de lignes que de freins). • Faire un point de comparaison des 2 groupes (2 docs en parallèle au tableau) (10mn). ○ Le secteur bio présente actuellement des freins moins importants dans plusieurs cas. Quelle est la tendance dans les prochaines années ? Y a-t-il un risque de mise en place des mêmes freins ? • Mireille et Yann gèrent le débrief. L'un note pendant que l'autre anime le débriefing de son groupe. Les observateurs et co-animateurs peuvent intervenir s'ils ont vu quelque chose montrant un frein qui n'a pas été évoqué par les participants. Les co-animateurs relancent sur la base de la grille d'observation si un frein analysé par Yann en amont de l'atelier, noté sur le « guide de débriefing » n'est pas ressorti. • L'animateur qui note peut compléter aussi le guide de conception si de nouvelles branches de concepts ressortent • On conclu
Consignes	• Respect de la parole des autres • Expression argumentée (Concision) • Bienveillance (pas de jugement), sans complaisance (on peut débattre en argumentant) • Attention les plateaux ne doivent pas être modifiés pendant le débriefing
TO DO	• Préparer le « Guide de débriefing » avec les freins clés nuancés bio/conventionnels et les points de comparaison • Envoyer doc avec notes du débriefing sur l'ordinateur dans l'autre salle de manière à pouvoir le remobiliser en conception (email, clé USB)

PAUSE (10mn) : Réorganisation des salles. Coline remplace Arnaud.

On réalise un coin de table «Brain-storming » avec plusieurs post-its et 1 feutre noir par participant + paperboard. On réalise un autre coin (ou si pas la place on prépare au sol ou dans un coin la feuille craft, les feutres et les post-its de manière à pouvoir rapidement l'installer)

On transfère le fichier avec les leviers dans l'autre ordi.

Les animateurs qui peuvent compléter aussi le guide de conception si de nouvelles branches de concepts sont ressorties

Conception

Conception

Objectif	Coconcevoir des prototypes de stratégie de gestion durable de la santé des sols maraîchers sous abris
Durée	60mn
Qui ?	Chaque groupe dans sa salle
Méthode retenue, déroulé	- Déplacement et réorganisation de la salle (5mn) - L'animateur introduit - Nous venons de voir les différents leviers généraux pour faciliter la gestion de la santé des sols. Nous allons maintenant mettre en commun notre créativité et nos connaissances pour chercher concrètement comment agir de manière coordonnée pour faciliter la gestion agroécologique de la santé des sols (question sur le paperboard) 1ière phase (Brain storming individuel) (5mn) : - L'animateur présente les consignes - Pour cette recherche nous vous proposons de chacun commencer par réfléchir individuellement à des idées d'action pendant 5mn - Notez 1 idée de stratégie, d'action/post-it en étant concis (un post-it) et lisible par les autres. Précisez : (i) quels acteurs agissent (En vous donnant des exemples décalés pour ne pas vous influencer : Constructeur automobile, client, ...) , (ii) pour quoi faire (développer, concevoir, ...), (iii) sur quoi ils agissent (des pièces détachées, des sous-traitants, ...). - Ne vous limitez pas à des idées réalistes, des choses irréalistes au premier coup d'œil peuvent donner des innovations très utiles (la voiture autonome pour rester dans la même veine) et/ou donner des idées aux autres. Nous ferons le tri plus tard, pour le moment laissez libre court à votre imagination. - Si vous avez besoin de revoir la liste des leviers que nous venons d'évoquer, vous pouvez aller y jeter un œil sur l'ordinateur là bas. - Au bout de 5mn, nous partagerons tous ces idées. Nous chercherons ensuite à les préciser. - L'animateur et co-animateur répondent aux sollicitations. Si certains semblent avoir fini, ils vont voir ces idées, éventuellement lu demande de préciser ou peuvent leur donner des pistes basées sur le guide de conception (animateur). 2nd phase (Partage→Brain storming collectif) (20mn) : - Au bout de 5mn, les animateurs installent le poster en Craft, les feutres et cartes. Sur le poster, des zones sont représentés en fonction des types d'acteur. Les animateurs présentent la feuille et ses zones puis demandent à chaque personne de lire à voix haute une idée et de la placer. On passe au suivant (une idée par personne) et on fait des tours de tables jusqu'à ce que tout le monde ait posé ses idées. Les autres participants peuvent écrire ou dire de nouvelles idées que cela leur donne. Ils peuvent aussi dire s'ils ont la même idée et donner le post-it correspondant. Ils ne peuvent pas démarrer les débats sur les stratégies à ce stade (phase suivante). Dire : « Ecoutez-bien, l'un de vous devra présenter les idées à l'autre groupe ensuite » - L'animateur s'assure du respect des règles énoncées au point précédent en gérant la parole. Il fait préciser une stratégie si des éléments manques (ex : Acteur impliqué). Le co-animateur aide la personne à placer le post-it, ajoute des zones d'acteurs s'il en manque (Services publics, autres agriculteurs ...) et notent les nouvelles idées énoncées à l'oral.

	3ieme phase (Précision des stratégies) (25min) : • L'animateur présente ○ Nous allons chercher à préciser les stratégies en nous demandant : quels sont les conditions de mise en œuvre ? quels acteurs participent à mettre en place l'action (on veut quelque chose de moins vague que « R&D, fournisseur » mais de plus général que « Biocoop, SARL Les Tilleuls, Koppert ». On veut « Semencier », « Pépiniériste », « Magasin spécialisé ») ? Quels sont leurs rôles, autrement dit, quelles actions doivent-ils mettre en place ? Comment elles s'articulent, se coordonnent ? Comment elles facilitent la mise en œuvre des leviers techniques ? Sur leur combinaison ? ○ Y a-t-il une stratégie qui vous paraît particulièrement intéressante à explorer ? Laquelle vous paraît la moins classique ? La plus prometteuse ? ○ Est-ce que celle-ci convient à tout le monde ? <i>S'il y en a d'autres, on les garde de côté et on les explorera après. S'il y en a qu'une ou deux, on relancera.</i> • L'animateur pose les questions pour faire préciser la stratégie, à l'auteur et à tous les participants, en précisant bien que tous peuvent contribuer (relances : « les autres, qu'en pensez-vous ? »). • La carte stratégie est entouré avec un feutre de couleur. • Le co-animateur représente à l'aide des Post-its et cartes « Acteurs », « Techniques », « Savoir-Faire », « Culture », « Récolte », « Equipement » dont certaines sont préparées et des flèches de la même couleur que la stratégie les reliant portant systématiquement un verbe d'action. Il demande des explications aux participants et/ou à l'animateur. L'animateur peut aider à représenter. • Les stratégies peuvent être combinés si cela paraît pertinent • Avec l'aide de l'observatrice, les animateurs font attention à avoir suffisamment de temps pour au moins explorer 3 stratégies. 4ieme phase (5mn) • Relance basée sur le guide de conception : « et si je vous parle de telle type d'idée, est-ce que ça vous en donne d'autres ? Ce n'est pas quelque chose qui apparaît dans nos échanges jusqu'ici. • Un volontaire est demandé parmi les participants pour présenter ces stratégies aux autres. On le fait à deux. L'idée n'est pas de tout redire (pas le temps) mais de présenter globalement les différents types de stratégies en détaillant un peu plus celles précisées.
Consignes	• Respect de la parole des autres • Expression argumentée (Concision ?) • Bienveillance (pas de jugement), sans complaisance (on peut débattre en argumentant) (Courtoisie ?) • Chacun exprime au moins une idée • Une stratégie est une idée d'action concrète impliquant plusieurs acteurs. Dans notre cas, elle vise à faciliter voir directement à implémenter une gestion agroécologique de la santé des sols des maraîchers provençaux.
TO DO	• Préparer plusieurs plateaux de conception, les cartes, les feutres de manière à pouvoir distribuer et installer rapidement • Préparer guide d'exploration issue de la traque. • Préparer paperboard avec question et règles • Poster Craft avec zonages acteurs + ajouter l'obj au milieu (aussi en tête du papeprboard) • Post-its de différentes tailles • Plus de feutres effaçables • Envoyer un mail aux conseillers pour les prévenir de leur rôle éventuel + cartes cultures

	• Prépréparé les cartes • 2*2 jeux de feutre identiques

Confrontation des stratégies du groupe conventionnel et bio

Objectif	• Coconcevoir des prototypes de stratégie de gestion durable de la santé des sols
Durée	30mn
Qui ?	Tous dans la grande salle
Méthode retenue, déroulé	• Déplacements (5mn) • Chaque rapporteur présente les idées de son groupe (2*8mn MAX), répond à 1-2 question de compréhension • Temps de discussion : Est-ce que ça suscite de nouvelles idées de stratégies, d'actions ? Les animateurs animent ce temps, un co-animateur prend note dans un 3ieme tableau « stratégie ».
Consignes	• Respect de la parole des autres • Expression argumentée (Concision ?) • Bienveillance (pas de jugement), sans complaisance (on peut débattre en argumentant) (Courtoisie ?)
TO DO	•

Conclusion+ évaluation

Objectif	• Synthétiser l'expérience de la journée • Faire évaluer l'atelier par les participants
Durée	10mn
Qui ?	Yann
Méthode retenue, déroulé	• Yann : ○ Nous avons vu qu'actuellement <i>tel et tel éléments</i> bloque la gestion durable par les maraîchers sous abris de leur sol. ○ Nous avons imaginé <i>telle et telle stratégie</i> pour y remédier et nous avons réalisé une première évaluation (basés sur tableaux « freins » et stratégies ». ○ Nous allons mettre au propre ces prototypes de stratégie construits aujourd'hui, faire une première évaluation de leurs effets potentiels sur la gestion de la santé du sol dans le bassin provençal. On vous fera un CR ○ Nous vous proposons de nous retrouver à la fin de l'année pour choisir ensemble les stratégies les plus prometteuses et les affinés afin de les rendre actionnables. Plusieurs formats sont possibles, nous vous invitons à exprimer votre envie ou non de poursuivre, votre préférence pour le format en remplissant cette fiche. ○ Elles comportent également des questions visant à collecter vos retours sur cet atelier afin d'identifier des pistes d'amélioration pour le futur. ○ Pendant que vous le remplissez, nous préparons le pot. N'oubliez pas que vos attentes sont toujours là-bas (méga postit). Vous pouvez aller les consulter pour répondre aux questions si besoin

Consignes	• Remplir la fiche avant de partir • Quand vous voulez partir, prévenez-moi, faut que je vous ouvre
TO DO	• Préparer le discours de fin (pts clés) • Préparer la fiche d'évaluation, l'imprimer et l'avoir accessible

Pot final (30mn) (pré-préparer au max)

Atelier 3

Déroulement de la soirée 14h-17h

Horaires	Temps	Activités
14h	15mn	Accueil-tour de table
14h15	15mn	Introduction
14h30	70mn + 10mn	Coconception en groupe + pause/déplacements
15h50	3*20mn	Présentation croisée + coconception plénière
16h50	10mn	Conclusion, et la suite ? – Fiche évaluation
17h		Pot – Fin fiche évaluation

Accueil – Introduction

Accueil + Tour de table

Objectifs	• Laisser le temps aux participants d'arriver • Favoriser l'interconnaissance et « briser la glace »
Durée	15 minutes
Qui ? Où ?	Tous , dans la grande salle
Méthode retenue, déroulé	• Distribuer des badges avec les noms et la charte pour ceux qui ne l'ont pas apporté (Tous les animateurs + observateurs) • Café/Thé + gâteaux à dispo • Faire un tour de table où ils donnent chacun leur (i) Nom, Prénom, (ii) métier et organisation, (iii) Dernier légume mangé (Tous les animateurs+observateurs) • S'assurer que tout le monde a rendu la charte (Yann et Mireille)
Consignes	• Tour de table : ils doivent dire nom et prénom de leur binôme, le métier + organisation et dernier légume manger sans rentrer dans les détails
TO DO	• Préparer eau chaude, café + gâteaux, fruits • Préparer Charte à signer pour ceux qui l'ont oublié • Préparer badges

Introduction atelier + contexte

Objectif	Leur permettre de comprendre là où va les emmener cette réunion, sa logique et sa cohérence par rapport aux autres, à Interlude et aux autres possibilités de continuité
Durée	15 minutes

Qui ? Où ?	Yann dans la grande salle
Méthode retenue, déroulé	- Présenter le projet et le contexte : (i) donner obj de réunion, (ii) replacer dans le contexte plus large du projet : pb de sols dans la région, analyse des freins, traque, 3 ateliers, préciser que c'est le « dernier temps fort », important pour le projet et ma thèse, continuer avec projets futur existant (INTERLUDE) et à construire, j'y reviens à la fin de l'atelier, (iii) donner le déroulé global sans rentrer dans les détails, (iv) rappeler principes de la charte pour que ça se passe bien (5mn) - Annoncer que l'on a moins de 3h, donc on va devoir gérer le temps càd parfois stopper des discussions intéressantes pour pouvoir avancer et remplir nos objectifs - Est-ce que ça vous convient ? Est-ce que vous avez des questions ? - Définir « gestion agroécologique des sols » - Présenter les différents thèmes techniques et transversaux, pointer ceux que l'on va creuser lors de l'atelier (5mn) - Est-ce que vous avez des questions ?
Consignes	- Règles pour que ça se passe bien : - Voir principes charte
TO DO	- Préparer méga-post-its : (i) objectifs de la réunion, (ii) déroulé global, (iii) principes et les coller aux murs des 2 salles - Préparer def gestion AE - Préparer speech

Coconception

Déplacement/Pause : 5mn

Coconception en groupe

Objectif	- Sur la base des actions et pré-stratégies conçues et traquées, coconcevoir des stratégies opérationnelles avec les participants permettant de mettre en œuvre et combiner des leviers techniques de gestion des nématodes à galles - Avancer sur la conception de manière performante, en petits groupes
Durée	70mn
Qui ? Où ?	En 3 groupes dans les 2 salles
Méthode retenue, déroulé	- Le groupe se réunit debout autour d'un tableau (ou feuille de papier kraft sur le mur) - L'animateur propose un objectif à échéance 2030 (long termes)³⁷. Est-ce que ces objectifs vous paraissent satisfaisants ? Si non, comment les changeriez-vous ? Ces objectifs sont affichés au tableau (2mn) - L'animateur rappelle les leviers principaux pour dépasser les freins identifiés³⁸ pour le thème technique exploré (ex thèmes « introduction cultures commerciales non-hôtes » :

³⁷ ex obj 2030 : « Au moins 80 % des EAs produisent une culture non-hôte sur plus de 15% de leur surface sous abris ». Cet objectif **chiffré est un obj « à la louche »**, c'est pour mettre le doigt sur les différences entre « petites minorité », « grande majorité », ... **Ne pas laisser débat sur le niveau de précision s'installer**

³⁸ Issues de l'atelier 2, complété par l'analyse sociotechnique

	valoriser les cultures non hôtes produites pour thème, acquérir plus de connaissances sur la sensibilité des cultures et l'effet variétal). Ces leviers sont explicités sur une feuille à côté du tableau. Y a-t-il des questions ? (3mn) • L'animateur leur présente une fiche action et la pré-stratégie construite en atelier 2 en explicitant comment ces 2 niveaux sont structurés (voir figures 2 et 3 doc « Méthodo_At3 »). L'animateur leur indique les enveloppes contenant les fiches actions « transversales ». L'animateur leur explique comment on va procéder (5mn) • L'animateur les laisse prendre connaissances des fiches actions affichées sur le tableau, de leur interaction en « stratégie » et des titres des fiches actions transversales. Potentiellement, Yann pourrait présélectionner les fiches actions transversales qui correspondent aux leviers identifiés afin de réduire la quantité d'information à absorber pour les acteurs. L'animateur leur fournit de quoi noter et les incite à noter toutes remarques qu'ils voudraient partager lors de la phase de conception (10mn). • L'animateur leur demande quelles actions il faut intégrer pour répondre à l'objectif 2030, selon eux. L'animateur demande qui serait motivé pour restituer le travail aux autres, à la fin, avec son aide éventuelle. Des fiches actions vierges et des stylos sont disponibles pour toutes personnes souhaitant faire une proposition. Tout le monde peut se saisir d'une fiche existante. L'animateur distribue la parole, fait des relances basées sur son guide conception. Il s'assure de la construction de la représentation en déplaçant les fiches pour les personnes qui ne s'en saisissent pas elles-mêmes, en accompagnant la création de nouvelles fiches, en ajoutant les ressources. Nous notons également sur une feuille à droite du tableau les trous de connaissances à explorer ou autres questions en identifiant si on peut la poser à un participant d'un autre groupe. L'animateur a la charge de rebondir, faire des suggestions pour aider le groupe à avancer sur la base de ses connaissances du contexte sociotechnique et des actions de tous les thèmes. • Au bout de 20-30mn, nous réalisons une première évaluation de la stratégie basée sur les indicateurs en termes de ressources et d'impacts en leur disant explicitement qu'ils peuvent (1) critiquer une évaluation d'action, (2) proposer un critère manquant, grâce au guide d'évaluation. L'idée est de discuter de la pertinence de cette évaluation qualitative et de chercher des solutions pour les points négatifs. • 10mn avant la fin, nous vérifions ensemble et faisons préciser : ○ L'évaluation finale : est-ce qu'on a réussi à corriger ? ○ Ce que la stratégie fait ? (Quoi ?) → on en déduit un Titre ○ Le mode de gouvernance global ○ Les risques et incertitudes liés à la stratégie ○ Les 1-2 questions principales à poser aux autres participants ○ Qu'on a impliqué tous les acteurs pertinents. Comment les acteurs présents pourraient participer ○ Vérifier qu'on a bien listé toutes les ressources nécessaires ○ Vérifier comment s'articule les actions fonctionnellement (flèches)
Consignes	• Les mêmes que dans la Charte et décrites ci-dessus
TO DO	• Choisir les groupes et faire valider l'intérêt de chacun par mail • Préparer objectif et moyen de le corriger • Préparer fiches actions des différents thèmes, fiches actions vierges

	• Préparer structuration des pré-stratégies • Préparer tableau, sans chaise à proximité immédiate • Préparer guide conception • Préparer guide évaluation • Chaque animateur doit connaître les actions de tous les thèmes pour pouvoir rebondir, suggérer • Préparer de quoi noter pour les acteurs

Déplacement/Pause : 5mn

Coconception en plénière

Objectif	• Mobiliser la totalité de l'expertise présente pour affiner les stratégies conçues par groupe et les évaluer
Durée	3*20mn
Qui ?	En plénière
Méthode retenue, déroulé	• Chaque rapporteur présente en 5mn la stratégie aux autres et pose les questions • Le reste des participants répond aux questions 5mn puis réagit, complète critique. L'animateur du groupe qui présente anime en distribuant la parole. S'il n'y a pas de réaction des autres participants, les autres questions identifiées lors de la conception en groupe sont posées. • Pour la stratégie du thème « intégration », une discussion autour de l'intégration des stratégies des 2 autres thèmes sera menée les 10 dernières minutes
Consignes	• Les mêmes que dans la Charte et décrites ci-dessus
TO DO	•

Conclusion+ évaluation

Objectif	• Synthétiser l'expérience de la journée • Donner à voir la continuité future • Faire évaluer l'atelier par les participants
Durée	10mn
Qui ?	Yann
Méthode retenue, déroulé	• Yann : ○ Nous avons construit X stratégies opérationnelles intégrant les actions des multiples acteurs de la parcelle au territoire pour une gestion durable de la santé des sols en maraîchage sous abris. Nous avons évalué collectivement leurs impacts et identifier des questions qu'elles posent, les manques de connaissances à combler pour avancer.

	○ Comment envisagez-vous donner une suite à ce travail, en tant qu'acteurs du territoire ? A la fois au niveau de votre organisation, si vous pouvez en parler, et au niveau collectif ? ○ C'est une question très importante d'un questionnaire de retour sur cet atelier que nous vous distribuons. Merci de bien le remplir avant de partir. ○ De notre côté, en tant qu'acteur de la R&D, nous allons travailler sur les manques de connaissances identifiées (i) par le projet INTERLUDE qui démarre en Mars et qui s'inscrit dans la continuité de ma thèse, (ii) en faisant remonter ces questions au niveau du réseau R&D local (UMT avec GRAB et APREL) et national (GIS PICLeg avec CTIFL) ○ Je vais formaliser ce que nous avons construit aujourd'hui et vous envoyer un CR par mail. ○ Une restitution de tous mes travaux de thèses, incluant ce qu'on a fait aujourd'hui sera organisé. Elle sera l'occasion d'évaluer plus finement les stratégies conçues aujourd'hui. ○ Fiche d'évaluation de l'atelier pour progresser
Consignes	● Remplir la fiche avant de partir
TO DO	● Préparer la fiche d'évaluation, l'imprimer et l'avoir accessible

Pot final (30mn) (pré-préparer au max)

Annexe G. Questionnaire d'évaluation des ateliers

Ateliers étape 1

Nous vous demandons de remplir ce questionnaire pour pouvoir améliorer la manière dont nous avons animé la soirée d'aujourd'hui pour le prochain atelier. **N'hésitez donc pas** à évaluer cet atelier **tel que vous le pensez, le ressentez** et à nous laisser vos remarques et conseils. Vous avez le choix de laisser ce questionnaire anonyme ou d'inscrire votre nom. Les 5 premières questions suivent le déroulé de la soirée.

1. Présentation des objectifs et du déroulé de l'atelier

J'ai trouvé : Pas du tout clair Pas clair Moyen Clair Très clair

– 1	– 2	– 3	– 4	– 5

Remarques /conseils :

2. Jeu « Quelles sont vos pratiques ? » (gommettes sur poster)

J'ai : Pas du tout aimé Pas aimé Neutre Aimé Beaucoup aimé

– 1	– 2	– 3	– 4	– 5

Remarques /conseils :

3. Présentation des techniques de contrôle des nématodes

J'ai : Pas du tout aimé Pas aimé Neutre Aimé Beaucoup aimé

– 1	– 2	– 3	– 4	– 5

Remarques /conseils :

4. Présentation des freins à la mise en œuvre des techniques de contrôle

J'ai : Pas du tout aimé Pas aimé Neutre Aimé Beaucoup aimé

– 1	– 2	– 3	– 4	– 5

Remarques /conseils :

5. Présentation des solutions originales aux freins

J'ai : Pas du tout aimé Pas aimé Neutre Aimé Beaucoup aimé

– 1	– 2	– 3	– 4	– 5

Remarques /conseils :

6. Travail sur le cas d'étude avec une exploitation réelle

J'ai : Pas du tout aimé Pas aimé Neutre Aimé Beaucoup aimé

– 1	– 2	– 3	– 4	– 5

Remarques /conseils :

7. Convivialité (accueil, pause, buffet, courtoisie dans les échanges)

J'ai : Pas du tout aimé Pas aimé Neutre Aimé Beaucoup aimé

– 1	– 2	– 3	– 4	– 5

Remarques /conseils :

8. Referiez-vous un atelier similaire ?

– Non	– Plutôt non	– Peut être	– Plutôt oui	– Oui

Remarques /conseils :

9. Qu'est-ce que vous changeriez dans l'atelier si vous deviez le refaire ? (autrement dit : qu'est-ce qui vous a manqué ?)

10. Qu'est-ce qui vous a le plus plu, le plus satisfait ?

Nom (**Optionnel**) :

Atelier étape 2

Nous vous demandons de remplir ce questionnaire pour pouvoir améliorer la manière dont nous avons conçu et animé la soirée d'aujourd'hui pour le prochain atelier. **N'hésitez donc pas** à évaluer cet atelier **tel que vous le pensez, le ressentez** et à nous laisser vos remarques et conseils. Les questions suivent le déroulé de la soirée.

Nom (optionnel) :

1. Diagnostic des freins et leviers pour la gestion agroécologique de la santé des sols

1.1. Selon-vous, la simulation permet-elle d'identifier des freins qui existent réellement dans la gestion agroécologique de la santé des sols en Provence ? ☐Oui ☐Non ☐Partiellement Si « Partiellement », pouvez-vous nous dire en quelques mots ce qui manquait ?

1.2. La simulation vous a-t-elle aidée à mieux identifier les freins à la gestion agroécologique de la santé des sols ainsi que les leviers pour dépasser ces freins ? ☐Oui ☐Non

Si « Oui », pouvez-vous préciser en quelques mots ce que vous avez appris ?

Avez-vous appris d'autres choses ?

1.3. La simulation vous a-t-elle permis d'échanger plus facilement avec les autres participants dans la suite de l'atelier ☐Oui ☐Non

1.4. Selon vous, comment améliorer la simulation et la discussion qui la suit ?

2. Conception de stratégies

2.1. La simulation et la discussion qui en a suivi vous ont-elles inspiré des idées de stratégie concrète pour lever les freins ? ☐Oui ☐Non

Si « Oui », pouvez-vous donner un exemple de ce qui vous a inspiré ?

2.2. Auriez-vous envie de participer à un autre atelier pour préciser les stratégies ?

☐Oui ☐Non. Si oui, en quelques mots, quelles seraient vos attentes ?

3. Général

3.1. Selon vous, existe-t-il un intérêt commun de tous les participants à faciliter la gestion agroécologique de la santé des sols en maraîchage provençal ? ☐Oui ☐Non

Si oui, en quelques mots, quel est cet intérêt (au moins pour vous) ?

3.2. Avez-vous trouvé intéressant l'échange entre les acteurs de l'agriculture biologique, de l'agriculture non biologique et des acteurs mixtes ? ☐Oui ☐Non

Si oui, pouvez-vous donner 1-2 exemples de ce qui vous a inspiré ?

3.3. Qu'est-ce que vous changeriez dans l'atelier si vous deviez le refaire ? (autrement dit : qu'est-ce qui vous a manqué ?)

3.4. Qu'est-ce qui vous a le plus intéressé ?

Atelier étape 3

Nous vous demandons de remplir ce questionnaire pour pouvoir améliorer la manière dont nous réalisons et animons ce type d'atelier. **N'hésitez donc pas** à évaluer cet atelier **tel que vous le pensez, le ressentez** et à nous laisser vos remarques et conseils. Les questions suivent le déroulé de la soirée.

11. Présentation des objectifs et du déroulé de l'atelier

J'ai trouvé : Pas du tout clair Pas clair Moyen Clair Très clair

– 1	– 2	– 3	– 4	– 5

Remarques /conseils :

12. Supports pour co-construire les stratégies

–

a. Présentation des supports

J'ai trouvé : Pas du tout clair Pas clair Moyen Clair Très clair

– 1	– 2	– 3	– 4	– 5

Remarques /conseils :

- b. Les supports de travail (fiches actions, fiches évaluation, support de construction des stratégies) vous ont-ils aidés à améliorer les idées de stratégies proposées ? ☐Oui ☐Non
Si « Oui », pouvez-vous préciser comment ? Si « Non », pourquoi ?

- c. Les idées d'actions et de stratégies conçues grâce aux travaux précédents vous ont-elles été utiles pour co-construire les stratégies ? ☐Oui ☐Non
Si « Oui », pouvez-vous préciser comment ? Si « Non », pourquoi ?

13. Sorties de l'atelier

- a. Que retenez-vous de cet atelier ? Qu'avez-vous appris ?
- b. L'atelier vous a-t-il permis de nouer de nouveaux contacts utiles pour la suite de votre travail ? ☐Oui ☐Non
—
- c. Comment comptez-vous remobiliser ce que vous avez compris, appris et créé dans votre travail ou celui de votre organisation ?
- d. Comment vous et/ou votre organisation pourrait participer aux stratégies construites aujourd'hui ?
- e. Souhaiteriez-vous continuer ce travail sur la gestion concertée de la santé des sols ? Si oui, quelles sont vos attentes ?

14. Général

- a. Qu'est-ce que vous changeriez dans l'atelier si vous deviez le refaire ? (autrement dit : qu'est-ce qui vous a manqué ?)
- b. Qu'est-ce qui vous a le plus plu ?

Nom (Optionnel) :

Annexe H. Farm characteristics of farmers involved in the two groups of workshop step 1

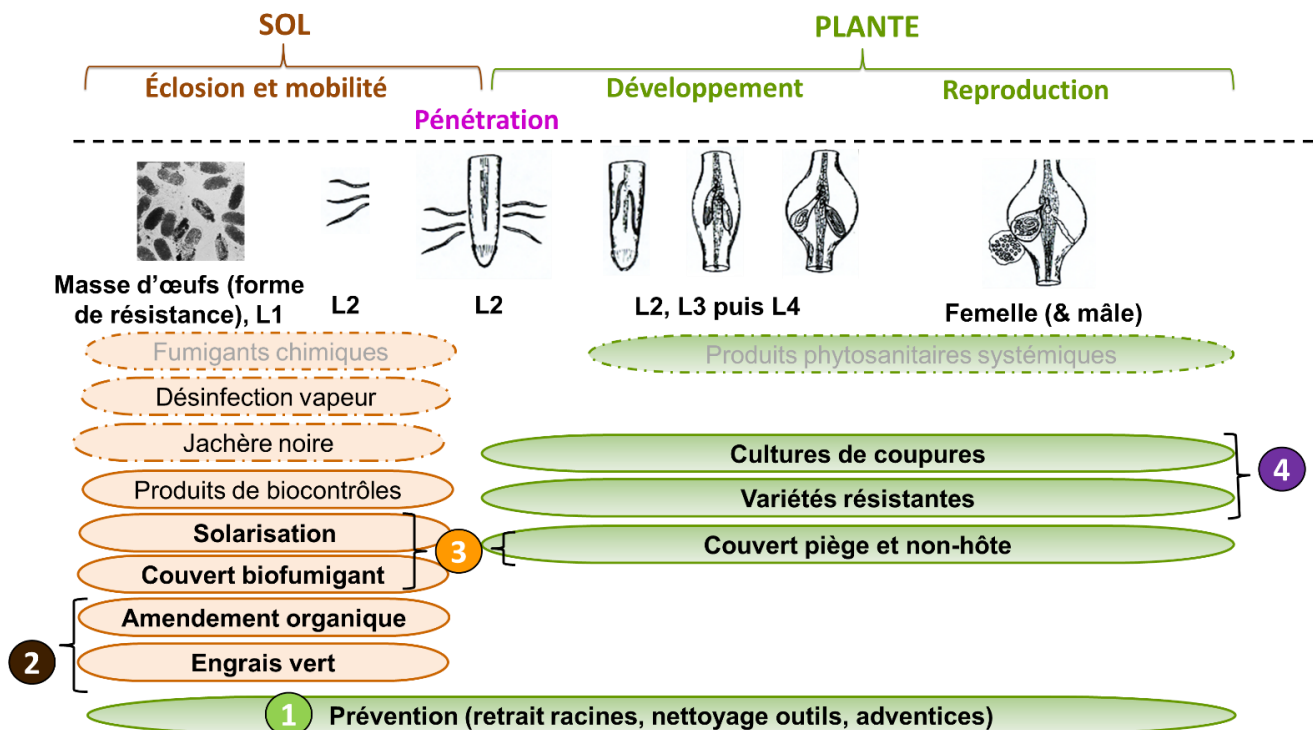
Groups	Farm characteristics categories	Values
1a - Diversified	Vegetable cropping surface under shelter	1-2,6ha
	Shelters type	(Doubled wall) multi-span plastic or glass greenhouse, tunnels
	Vegetable cropping surface in open field	1-16,5ha
	Other production systems	Soil-less strawberry and tomatoes productions ; cereal cropping ; fruit orchards (peer, apple, kiwi) ; vegetable plantlet nursery
	Crop specific diversity	2 to 30
	Main crop produced	Tomato, melon, salad, cucumber, bell pepper
	Minor crop produced	Celeriac, Chinese cabbage, mint, lamb lettuce, green beans, etc.
	Outlets	Wholesaler, shipper, small and medium size retailers, Community-supported agriculture
	RKN issues/Other soil-borne issues	Low to average (-20%) damages from RKN, wireworms, fusarium, fungal complex
	RKN management practices diversity	nematicides + biocontrol + amendments + prophylaxis vs. introduction of poor host crops + amendments + biocontrol
	Other group characteristics	6 farmers, high farm diversity, a balance between organic and conventional, do not know each other, no spatial proximity
1b - Common-outlet	Vegetable cropping surface under shelter	1.2-4ha
	Shelters type	Tunnels, multi-span plastic greenhouse
	Vegetable cropping surface in open field	1ha
	Other production systems	Fruit production (Kakis, grapes), olive orchard
	Crop specific diversity	6-11
	Main crop produced	Tomato, eggplant, melon, bell-pepper, salad, strawberries
	Minor crop produced	Celeriac, callions, spinach, fennel, kohlrabi, green beans, chard
	Outlets	Large organic wholesaler through producer organization, open-air market, shippers, specialized organic shop
	RKN issues/other soil-borne issues	None to 100% losses, "soil fatigue"
	RKN management practices diversity	Crop diversification, trap green manure, amendment, biocontrol, prophylaxis vs. solarization, biocontrol, prophylaxis
	Other group characteristics	5 organic farmers with a common outlet, members of the same producer organization, know each other, spatial proximity

Annexe I. Posters présentant les techniques

Poster 0 -Metaposter

Techniques de contrôle des nématodes à galles

Aucune méthode efficace rapidement ➔ **Objectif** : gestion long terme des nématodes avec présence < seuil de nuisibilité **par l'intégration** des techniques de contrôle



Source : adapté de C. Djian-Caporalino, 2018 et C. Goillon, 2018

Poster 1 – Prophylaxie

1- PRÉVENTION DE L'INFESTATION (Prophylaxie)

1. Éviter la contamination des parcelles saines



Nettoyage et gestion des outils de travail du sol



Installation de pédiluvres



Travail du sol des zones saines avant celui des zones infestées

Je fais

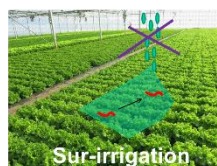
Je veux faire

Je ne veux/peux pas faire

J'ai besoin de plus d'infos

2. Eviter la multiplication et propagation des nématodes dans les parcelles déjà infestées

Elimination des adventices



Sur-irrigation



Elimination des résidus de culture



Je fais

Je veux faire

Je ne veux/peux pas faire

J'ai besoin de plus d'infos

3. Limiter la vulnérabilité des plantes aux nématodes

Décalage des dates de semis ou plantation

J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M
		~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~
		~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~

températures plus fraîches
=> activité des nématodes réduites



Bon niveau d'irrigation

Bonne fertilité du sol

Favoriser installation rapide

Je fais

Je veux faire

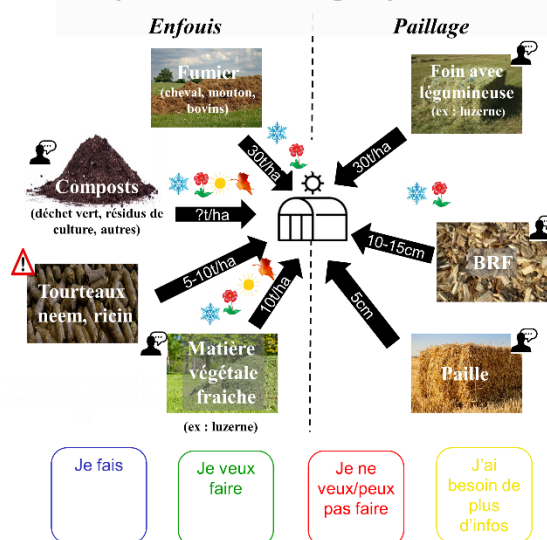
Je ne veux/peux pas faire

J'ai besoin de plus d'infos

Poster 2 - Entretien du sol

2- ENTRETIEN DU SOL

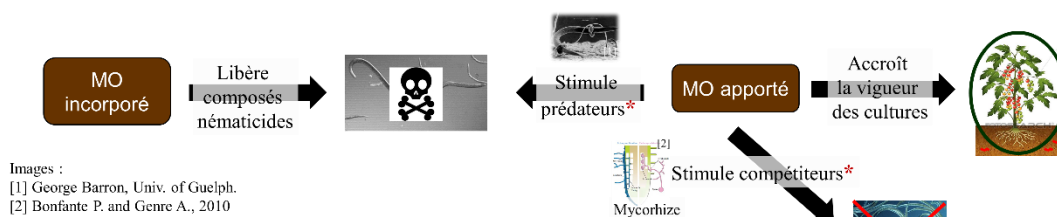
1. Import de matières organiques « active »



2. Engrais vert biomasse

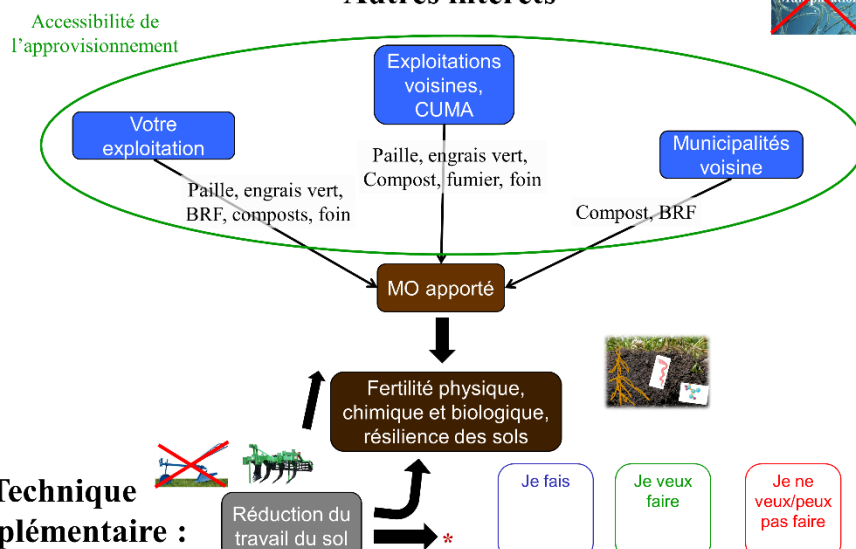


Intérêts pour les nématodes



Images :
[1] George Barron, Univ. of Guelph.
[2] Bonfante P. and Genre A., 2010

Autres intérêts



Sources : INRA, C. Djian-Caporalino (2018)

Poster 3 – Assainissement du sol

3- ASSAINISSEMENT DU SOL EN INTERCULTURE

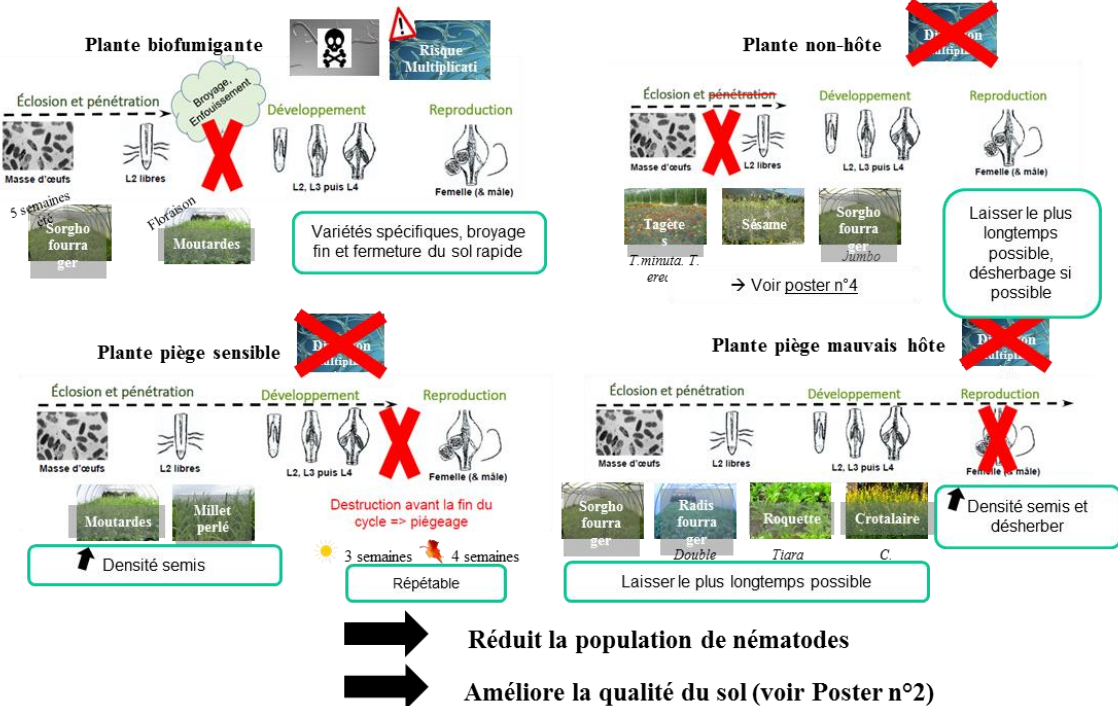
1. Couvert assainissant

Je fais

Je
veux
faire

Je ne
veux/pe
ux pas
faire

J'ai
besoin
de plus
d'infos



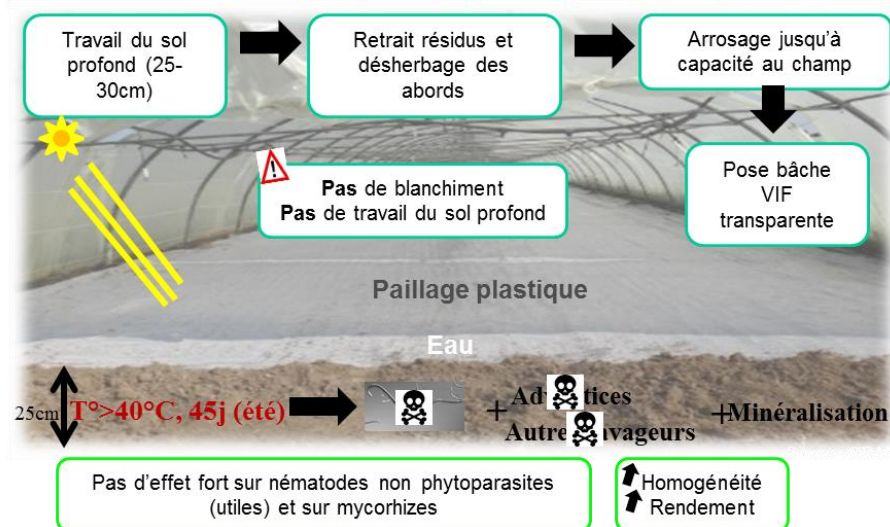
2. Solarisation

Je fais

Je
veux
faire

Je ne
veux/pe
ux pas
faire

J'ai
besoin
de plus
d'infos



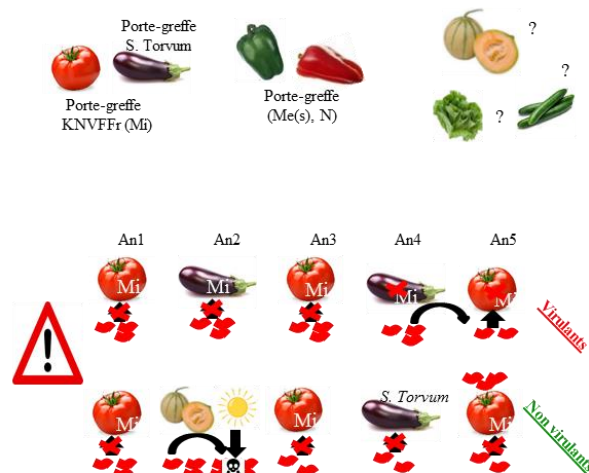
Sources : INRA, C. Djian-Caporalino (2018); APREL C. Goillon (2018)

Poster 4 – Coupure du cycle des nématodes

4- CULTURES COMMERCIALES DE COUPURE

1. Mobilisation des résistances variétales

Variétés hybrides F1 ou des porte-greffes résistant avec 1 gène de résistance majeur



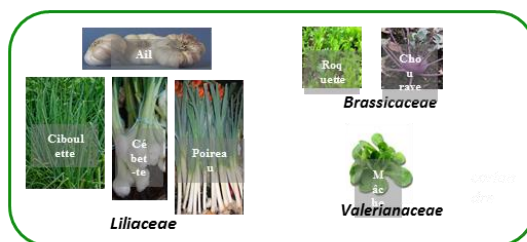
Je fais

Je veux faire

Je ne veux/p
eux pas
faire

J'ai besoin
de plus
d'infos

2. Introduction de cultures de coupures non-hôte/mauvais-hôte



Retours de terrain

Je fais

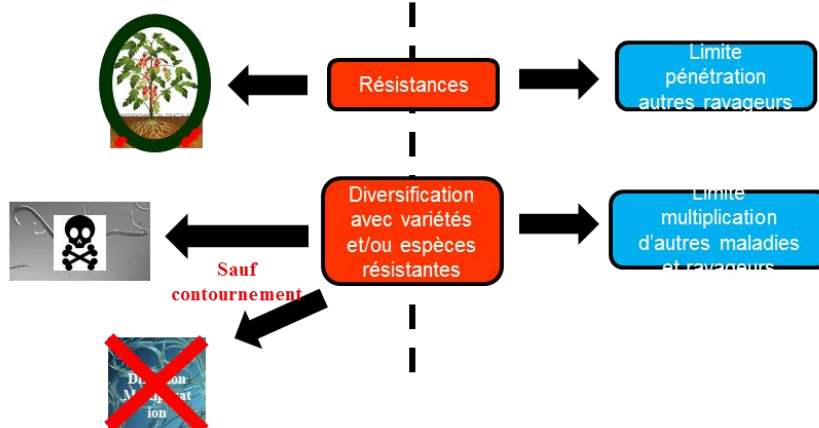
Je veux faire

Je ne veux/p
eux pas
faire

J'ai besoin
de plus
d'infos

Intérêts pour le contrôle des nématodes

Autres intérêts



Annexe J. Leviers présentés dans l'atelier 3

Leviers Thème intégration

Spécifiques à la combinaison de leviers techniques

- Améliorer connaissances synergies & antagonismes
- Faciliter choix & mises en œuvre

Génériques

- Former maraîchers et conseillers possibilités techniques de gestion, bénéfices et risques de chaque technique
- Améliorer marges de manœuvres financières
- Donner garanties gestion agroécologique peu coûteuses et/ou risquées
- Libérer du temps aux maraîchers
- Concilier stratégies collective et indépendance

Leviers Thème « mauvais-hôtes »

Spécifiques à l'introduction des cultures « mauvais-hôtes »

- Communication pépiniéristes-maraîchers choix agronomique des porte-greffes
- Communication metteurs en marché-producteurs sur besoins du marché et contraintes de production
- Augmenter demande cultures mauvais hôtes
- Eviter saturation marché par exploitations spécialisées
- Faciliter changement de cultures et de commercialisation
- Permettre accès marchés sans spécialisation
- Disponibilité variétale cultures « mauvais-hôtes »

Génériques

- Former maraîchers et conseillers techniques de gestion, bénéfices et risques de chaque technique
- Améliorer marges de manœuvres financières
- Donner garanties gestion agroécologique peu coûteuses et/ou risquées
- Libérer du temps aux maraîchers
- Concilier stratégies collective et indépendance

Leviers Thème « matière organique »

Spécifiques à l'apport de matières organiques, stimulants, produits de biocontrôle

- Accès ressources et intrants
- Développer connaissances modes d'actions, conditions d'application et efficacité
- Accès matériel spécialisé
- Accès semences

Génériques

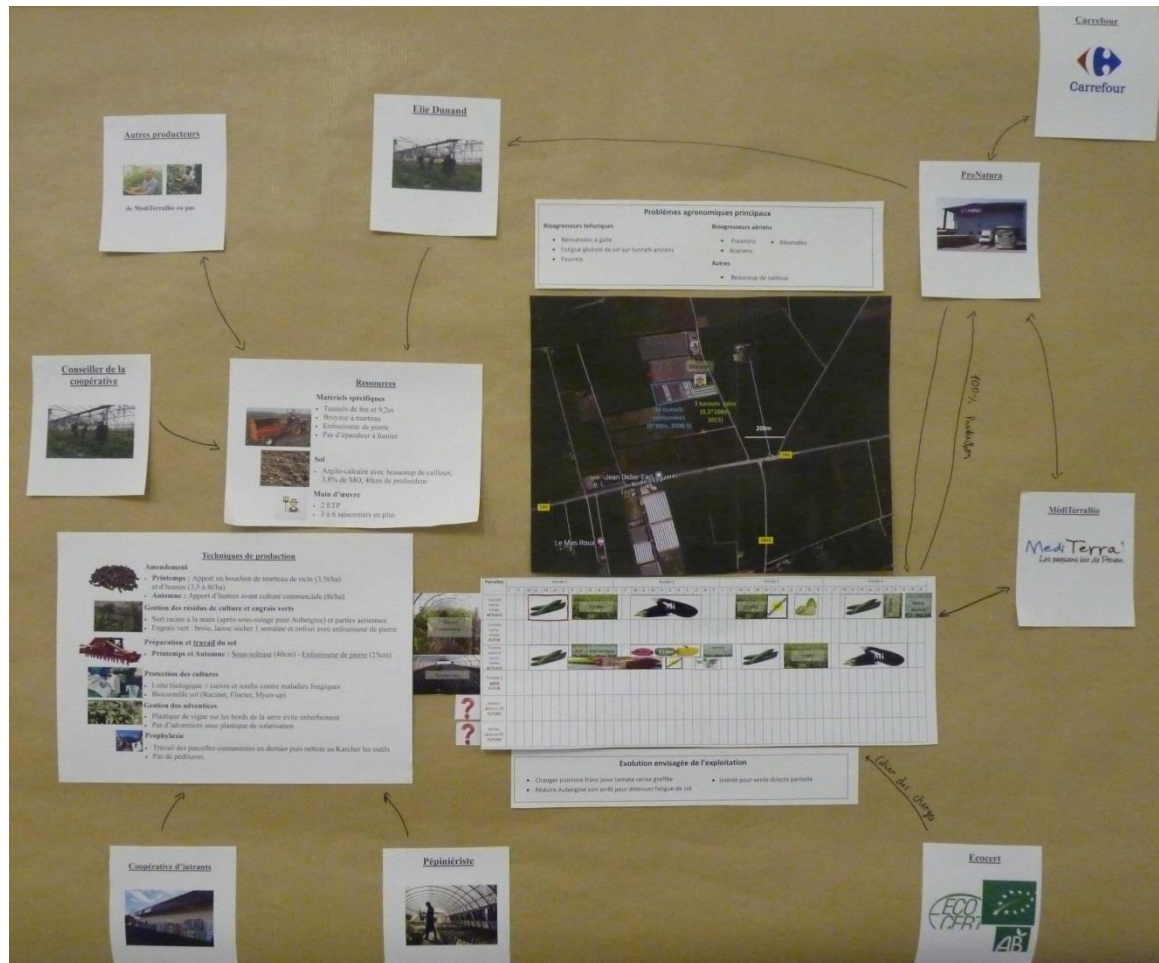
- Former maraîchers et conseillers possibilités techniques de gestion, bénéfices et risques de chaque technique
- Améliorer marges de manœuvres financières
- Donner garanties gestion agroécologique peu coûteuses et/ou risquées
- Libérer du temps aux maraîchers
- Concilier stratégies collective et indépendanc

Groupe diversifié début d'atelier (G1)

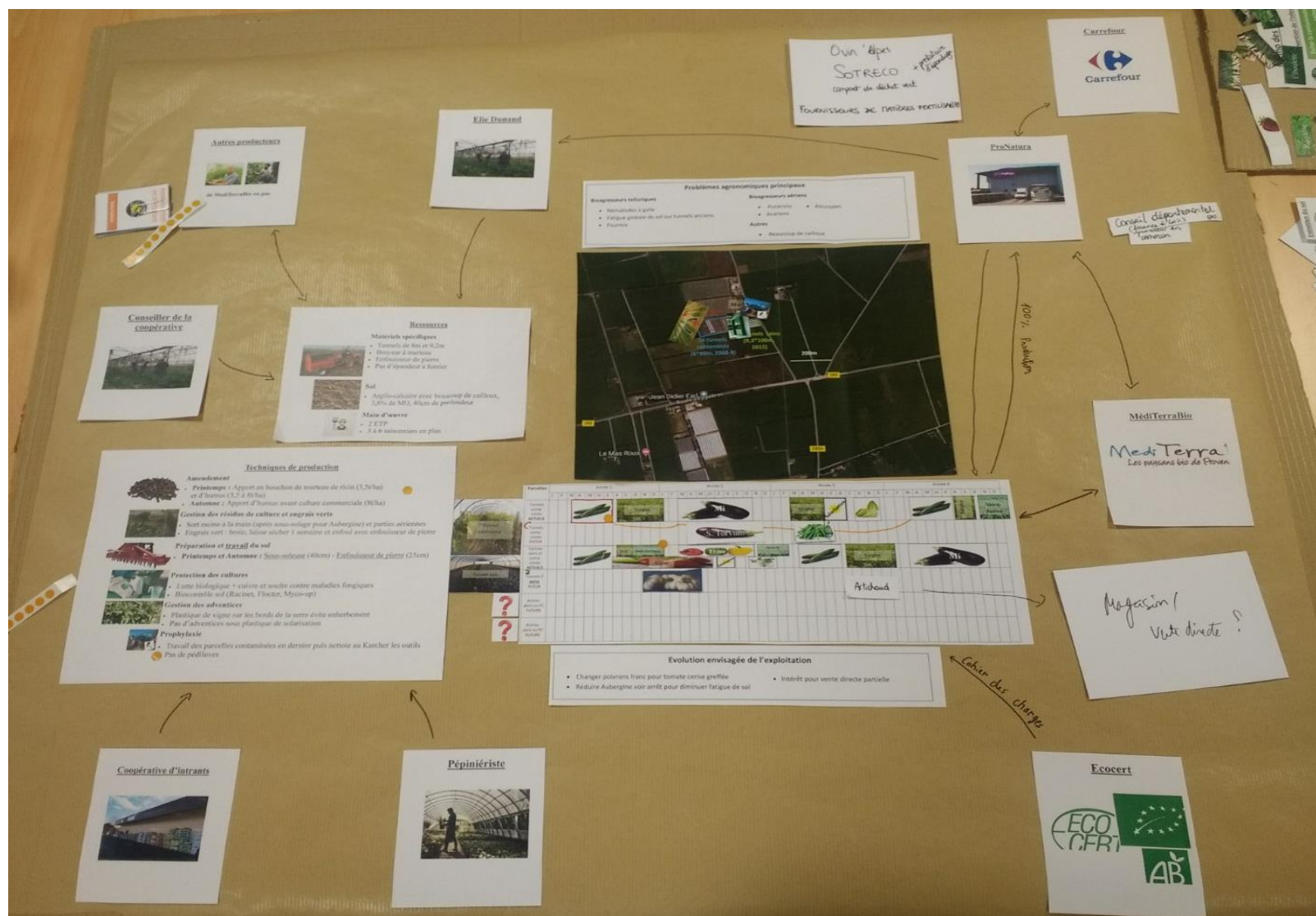


Groupe avec débouché commun (G2)

Début atelier



Fin d'atelier



Annexe L. Concepts of solutions and linked knowledge designed during workshop step 2 by the common-outlet group

Concepts of solutions and linked knowledge designed during workshop 2 by the common-outlet group. The knowledge on techniques (e.g., how to implement techniques, combine them, for which effectiveness) was systematically mobilized, then it was not recalled, except for specific pieces of knowledge mobilized during the workshop. Colors for concept known concept (in black), attainable concept (in blue) and disruptive concept (in purple).

	Solution propositions	Knowledge basis
Field-level only solutions	16. Introduce <i>S. Torvum</i> rootstock for eggplants	Mobilized: <i>S. Torvum</i> rootstock is has a different gene of resistance toward RKN than common <i>Mi</i> gene. Yet, the start of production is postponed, when price is lower. Questioned: How making it compatible with maintaining or increasing profit.
	17. Introduce green garlic production	Mobilized: Garlic is poor or non RKN-host to RKN. Questioned: Availability of an outlet with the wholesaler.
	18. Introduce multi-year poor or non RKN-host crop production such as asparagus	Mobilized: The longer resistant crops are produced, the more it reduces RKN pressure Questioned: Availability of an outlet with the wholesaler. Impact on RKN at farm level as it reduces the area for rotation for the other crop on the rest of the sheltered surface. Economical balance of with producing it under shelter. Is the crop adapted to sheltered conditions and does the shelter provide a benefit for its production.
	19. Increase strawberry production to increase time between two crops receptive to RKN	Mobilized: Strawberry is a poor host or non RKN-host crop, but require shelter surface for one year. Questioned: How to organize rotations for allowing increase in strawberry production and maintaining profitability. Potential use of strawberry tray plant. Workforce management issues.

Farm-level only solution	20. Set up boot bath at a position where the workers have to walk in both at the entrance of the farm and at the entrance of the block with no RKN pressure	Mobilized: Boots can transport RKN from contaminated soils to uncontaminated ones. Workers, including the famer, will make no effort to use it if it is evitable, partly due to lack of time. Questioned: Where to place it and with which equipment to make it inevitable.
	21. Organize rotations at farm level to plant early salads in the plots with no RKN pressure	Mobilized: Early salads are planted when RKN are still active. Salad production need to be staggered because of marketing firm requirements and marketing risk management³⁹. Questioned: Organizational leeway at farm level to systematically put early salads under the same shelters
Farm-level coupled innovations	22. Introduce poor or non RKN-host cover crops for all summer period one year out of three to break RKN cycle and stimulate antagonists + re-introduce crop production in winter to compensate for losses of sales revenues	Mobilized: Fallow periods allow breaking bioagressor cycle and providing biologically active organic amendment. Yet it is a period without marketable production potentially provoking economical losses. Organic farmer 6 stopped winter production few years ago to reduce work pressure and manage farmers' health issues. Questioned: Impact of winter production on farmers' health issues. Which cover crops for summer period and for what impact on RKN pressure (e.g., if crops host RKN). The financial balance of these two solutions combined.
	23. Produce ramial chipped wood from giant cane (<i>Arundo donax</i>) + use ramial chipped wood as amendment	Mobilized: High resource of giant canes in Provence (invasive species). Story of an old farmer that reduced or eliminated RKN from a field under shelter with using it as a leek nursery. Tracked innovation: using hedges to produce and use ramial chipped wood as an amendment under shelter. Lack of local and cheap high-quality amendment sources. Questioned: Risk of introducing as a weed under shelter by accident. Impact on RKN, soil, crops and on other cropping operations

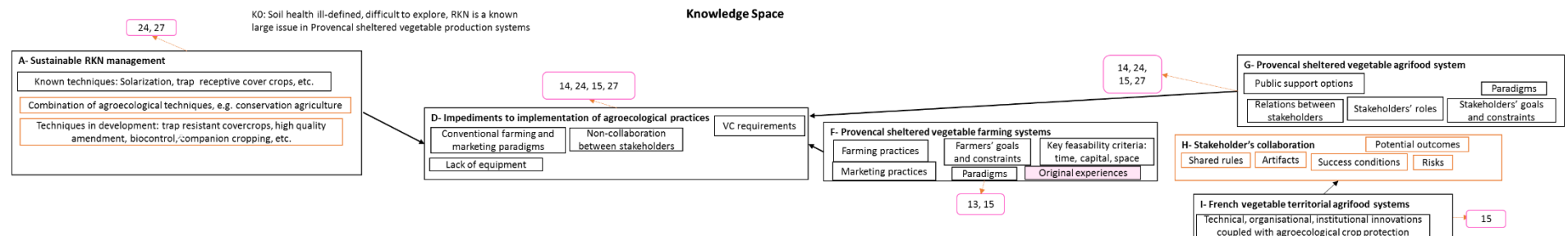
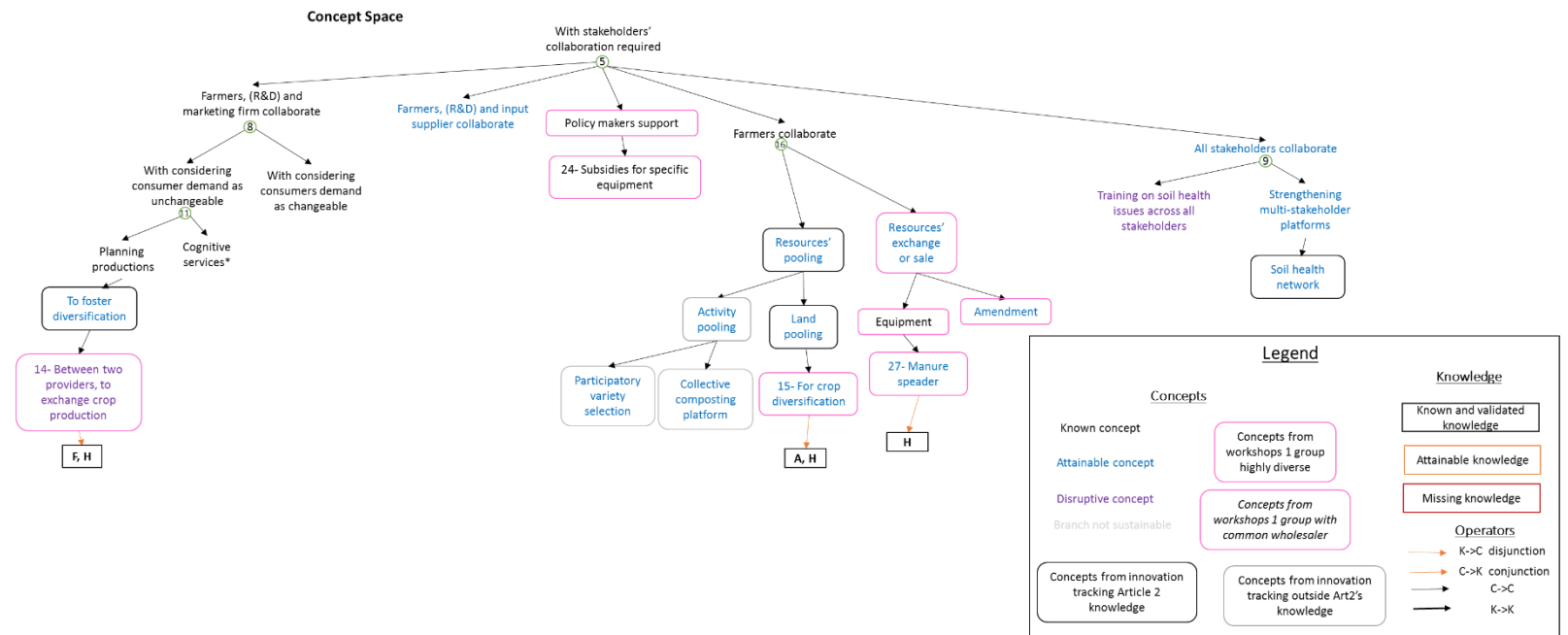
³⁹ Price varies, then if a farmer produces only salads on a limited period, he/she takes the risk of having a bad price

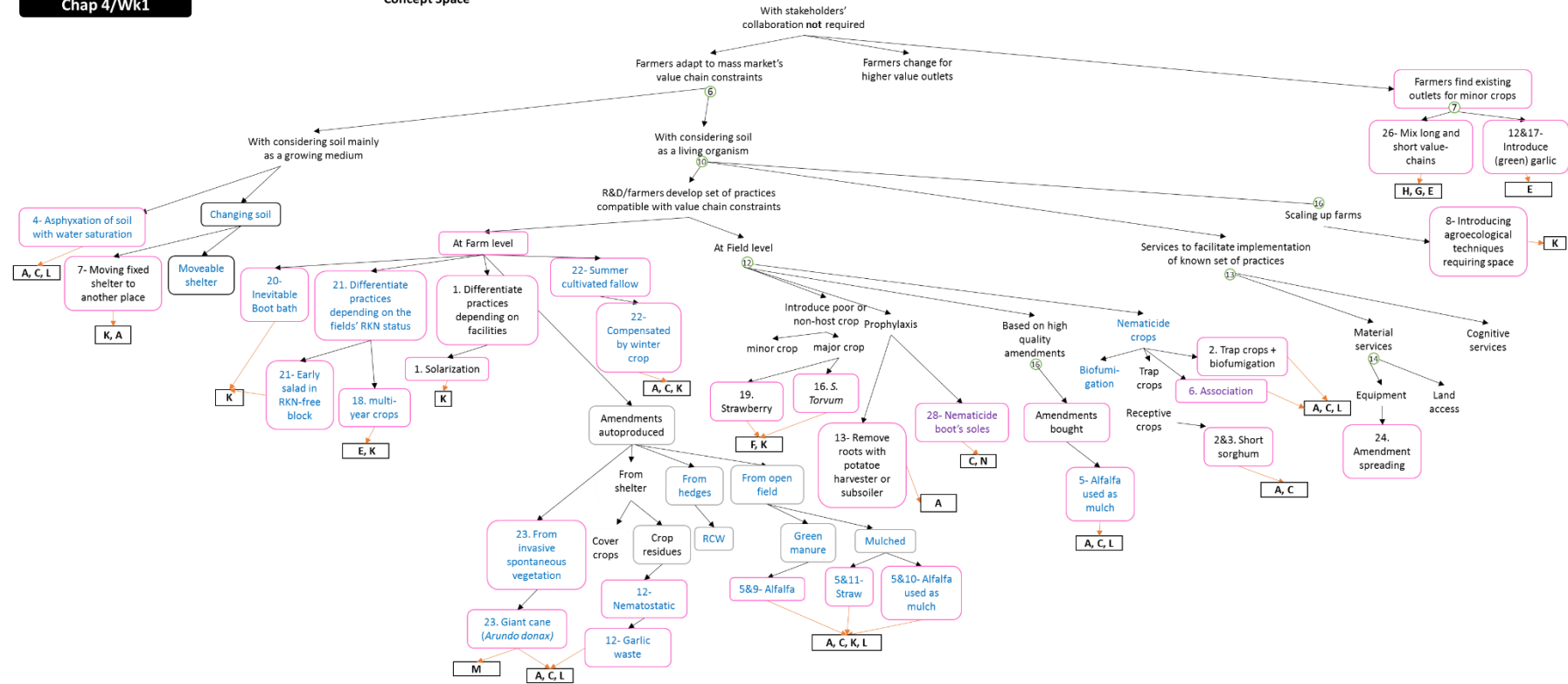
STAFS-level coupled innovations	24. Mobilizing existing subsidies for investment in spreading equipment + spreading green waste compost or manure from local 2 suppliers	Mobilized: Little digested amendment can boost RKN natural enemies. Lack of access to specific equipment. Questioned:
	25. Mobilizing service from a service supplier + spreading green waste compost or manure from 2 local suppliers	Mobilized: Little digested amendment can boost RKN natural enemies. Lack of access to specific equipment Questioned: Organize a cheap service
	26. Develop direct selling + introduce asparagus production	Mobilized: see 4. Lack of outlet for minor crops. Questioned: organization of the combination of long and short value chain
	27. Investing with several farmers in a shared manure spreader + spreading green waste compost or manure	Mobilized: Little digested amendment can boost RKN natural enemies. Lack of access to specific equipment. Questioned: how to coordinate the use of the machinery between farmers that do not have the same ideas of the amendment they need, that may want to use it at the same time and that can be far from each other. How to foster the trust of farmers in cooperative operations.
	28. Developing shoes with embedded auto-disinfection or nematicides soles + introducing these shoes on farms for the workers	Mobilized: Difficulties to organize and enforce the use of foot bath with many different tunnels (not one entrance) Questioned: how to create and produce such shoes at an accessible price. Could all workers be equipped.

Annexe M. Arbres C-K de représentation des solutions conçues Ateliers étape 1

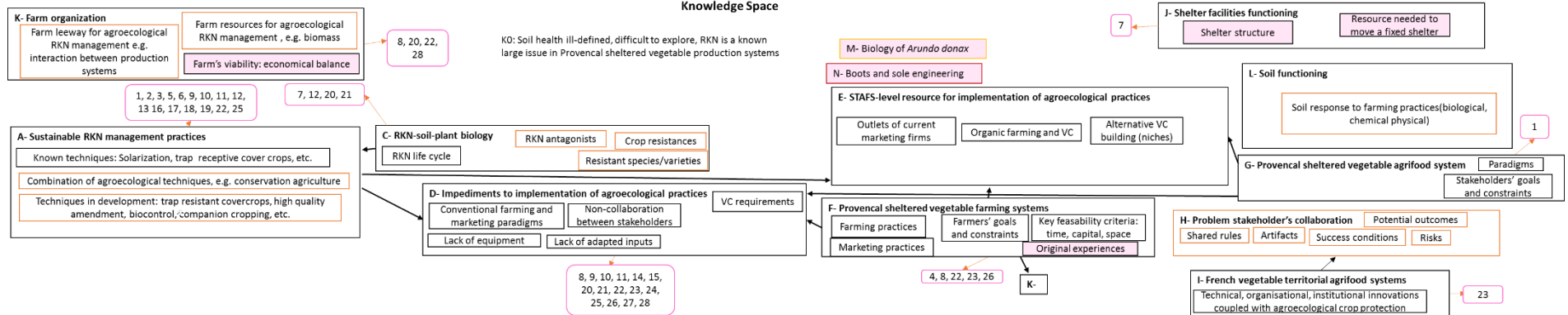
Cet arbre démarre des deux branches principales de l'arbre de référence : « avec ollaboration requise » et « sans collaboration requise ».

Chap 4/Wk1





Knowledge Space



Annexe N. Description des actions conçues

Groupe mixte

N°	Titre de l'action	Objectifs	Echelle	Acteurs impliqués réalisant des <u>actions</u> à l'aide de <i>ressources</i> (artefacts, matériel, connaissances, ...)	Leviers techniques AE mobilisés pour améliorer la santé des sols	Freins à la mise en œuvre	Conditions de réussite
1 (voir 11)	Regrouper et organiser la production de cultures mauvais hôtes entre producteurs et sa commercialisation	Permettre l'introduction de cultures mauvais hôtes sur les parcelles contaminées en facilitant leur commercialisation	STAFS (inter-exploitation)	<u>Regrouper et organiser</u> entre producteurs la production des <i>cultures mauvaises hôtes</i> pour mieux la commercialiser soit via le metteur en marché , soit via une coopérative , soit un groupement CETA .	- Augmenter le délai de retour des cultures sensibles - Introduire des cultures commerciales assainissantes - Stimuler la biodiversité du sol par la biodiversité cultivée (dont les auxiliaires)	/ (rien ne fut cité lors de l'atelier)	/
1bis	Planifier les cultures mauvais hôtes « de diversification » avec les producteurs du bassin d'approvisionnement	Faciliter l'introduction de cultures mauvais hôtes sur les parcelles contaminées	STAFS (inter-exploitation)	Le metteur en marché <u>planifie</u> sur plusieurs années les <i>cultures</i> entre producteurs avec des problèmes de santé des sols et d'autres n'en ayant pas pour assurer l'introduction de <i>cultures mauvaises hôtes</i> là où c'est nécessaire. Un conseiller technique <u>accompagne</u> cette <i>planification</i> . La <i>planification</i> <u>se fait avec l'accord</u> des	- Augmenter le délai de retour des cultures sensibles - Introduire des cultures commerciales assainissantes	/	/

				producteurs structuré en organisation de producteurs . La démarche <u>est financé</u> grâce aux <i>programmes opérationnels</i> .	Stimuler la biodiversité du sol par la biodiversité cultivée (dont les auxiliaires)		
4	Régénérer l'écosystème du sol	Diminuer naturellement la pression des bioagresseurs en recréant un écosystème du sol	Exploitation agricole	Le maraîcher <u>régénère</u> l'écosystème du sol grâce à des <i>plantes régénératrices</i>	Augmenter la compétition et prédation naturelle des nématodes à galles (apport de ressources, limiter les perturbations)		
5	Substituer des engrais « naturels » organiques aux engrais minéraux	Diminuer naturellement la pression des bioagresseurs en améliorant la santé des sols	STAFS	Les maraîchers <u>utilisent</u> des <i>sources d'engrais naturel</i> plutôt que minérales. Certains acteurs extraient ces <i>sources d'engrais naturel</i> .		/	/
6	Inventorier et communiquer sur les méthodes de gestion agroécologique de santé des sols auprès de l'ensemble du secteur maraîcher	Sensibiliser l'ensemble des acteurs du secteur maraîcher aux enjeux de santé des sols et des méthodes pour la gérer	STAFS	La R&D <u>liste</u> et <u>communiqué</u> sur les différentes <i>méthodes de gestion agroécologique de la santé des sols</i> , ainsi que leurs tenants et aboutissants, à destination de l'ensemble des acteurs du secteur maraîchers : les producteurs mais également les pépiniéristes et metteurs en marché .	Tous	/	/

7	Financer le développement au sein des exploitations de méthodes alternatives pour la santé des sols par une écotaxe sur les légumes.	Faciliter financièrement le développement et la mise en œuvre de méthodes de	STAFS national	Comme pour le <i>programme Ecophyto</i> et la <i>PAC</i> , un organisme <u>prélève</u> une <i>écotaxe</i> sur les légumes pour aider les producteurs à <u>investir</u> dans des <i>méthodes alternatives</i> .	Tous	/	/
8 (voir 30)	Compenser les investissements ou pertes de rendements initiales lors de la mise en œuvre au sein des exploitations de méthodes alternatives pour la santé des sols, par un fond d'aide régional ou national.	gestion agroécologique de santé des sols, au sein des exploitations	STAFS	Les maraîchers , par leurs élus , des groupes de producteurs ou même l' Aval , <u>demandent des fonds</u> à l' Etat et/ou la région (<i>fond d'aide régional</i>) pour <u>aider à la mise en place</u> de techniques alternatives qui demandent un <i>investissement</i> de la part des producteurs (ex : génèrent une perte de rendement). C'est possible et ça se passe probablement dans d'autres régions. Dans la mesure du possible, mobiliser ce qui existe déjà, le déployer à plus grande échelle, plus rapidement. La R&D s'assure que les pratiques réalisés conduisent bien à une amélioration du sol.	Tous	Les institutions publiques sont déjà à leur maximum de capacité humaine et financière ?	/
9	Faire accepter le consommateur de payer plus cher pour la préservation de la santé des sols		STAFS national	Le consommateur <u>accepte</u> de payer à sa juste valeur les produits.	Tous	/	/

Groupe Bio

N°	Titre de l'action	Objectifs	Echelle	Acteurs impliqués réalisant des <u>actions</u> à l'aide de <u>ressources</u> (artefacts, matériel, connaissances, ...)	Leviers techniques AE mobilisés pour améliorer la santé des sols	Freins à la mise en œuvre	Conditions de réussite
10	Faire augmenter la consommation de légumes mauvais-hôtes « de diversification »	Introduire des cultures commerciales mauvais hôtes dans les rotations en augmentant leur demande	STAFS national	L' Aval <u>communique</u> auprès des consommateurs sur <i>l'importance et l'intérêt</i> de manger une diversité de légumes (ex : santé). Les consommateurs <u>changent</u> leurs <i>habitudes de consommation</i> vers une diversité plus importante. Les maraîchers <u>diversifient</u> leurs cultures, afin de satisfaire cette <i>demande</i> , en <u>introduisant des cultures mauvais hôte voir pièges</u> (ex : mâche, cébette). Les maraîchers <u>pourraient cultiver</u> de nouveau des « <i>légumes oubliés</i> ».	- Augmenter le délai de retour des cultures sensibles - Introduire des cultures commerciales assainissantes - Stimuler la biodiversité du sol par la biodiversité cultivée (dont les auxiliaires)	Différences de rentabilité entre les cultures principales sensibles et les cultures alternatives, en relation avec la compétition avec les autres bassins de production	Permet un meilleur résultat économique des exploitations que la jachère
11 (voir 1)	Mutualiser la production de cultures mauvais hôtes entre petits producteurs et sa commercialisation	Permettre l'introduction de cultures mauvais hôtes sur les parcelles contaminées en facilitant leur commercialisation	STAFS (inter-exploitation)	Les petits maraîchers <u>mutualisent</u> leurs <i>productions</i> afin de pouvoir <u>commercialiser</u> les <i>espèces de diversification</i> .	- Augmenter le délai de retour des cultures sensibles - Introduire des cultures commerciales assainissantes - Stimuler la biodiversité du sol par la biodiversité cultivée (dont les auxiliaires) (?)	Désir de rester indépendant chez les producteurs	- Compétitivité économique - Confiance entre producteurs

12	Créer des CUMAs garantissant le nettoyage des outils	Rendre accessible aux maraîchers le matériel nécessaire à une gestion agroécologique, sans risques	STAFS (inter-exploitation)	Les maraîchers mutualisent le <i>matériel coûteux et utile ponctuellement</i> en <u>nettoyant les outils</u> .	• Apport de MO afin d'augmenter la compétition et prédation naturelle des nématodes à galles	• Risque de contamination si matériel non nettoyé	• Confiance entre producteurs
13	Nettoyer systématiquement les outils provenant de l'extérieur	Empêcher la contamination de nouvelles exploitations	Exploitation agricole	Les maraîchers <u>font systématiquement nettoyer/nettoient</u> tout <i>outil</i> provenant de l'extérieur.	• Eviter contamination initiale	• Temps • Espace mental	/
14	Créer un plan territorial multi-acteur de régénération des sols	Réduire la pression en bioagresseurs du sol à l'échelle du STAFS en facilitant l'accès et une application pertinente de matières organiques de qualité	STAFS	<u>Structurer</u> à l'échelle du secteur un <i>plan de régénération des sols</i> (5-7 ans), passant par <u>l'augmentation</u> du <i>taux de MO</i> . Pour cela, <u>structurer</u> une <i>filière amont</i> et les <i>connaissances</i> permettant de <u>fournir les matières organiques</u> afin d' <u>augmenter le taux de MO</u> , <u>améliorer la vie du sol</u> de manière adapté aux contextes des multiples producteurs (ex : <i>nature du sol</i>). Valoriser ces <i>productions de qualité</i> via un Aval prêt à valoriser ces produits.	• Augmenter la compétition et prédation naturelle des nématodes à galles (apport de ressources)	• Phénomène long • L'Etat considère que ce n'est pas de sa responsabilité • Phénomène de saturation en MO nuisant à la vie du sol	/
15	Combiner de multiples leviers techniques pour développer la vie du sol	Diminuer naturellement la pression des bioagresseurs en améliorant la vie du sol	Exploitation agricole	Les maraîchers mettent en œuvre de multiples <i>techniques</i> pour <u>développer la vie du sol</u> : <i>engrais verts, du compost végétal, des apports de matière organique</i> afin de <u>développer</u> d'autres <i>formes de vie</i> en compétition avec les nématodes.	Augmenter la compétition et prédation naturelle des nématodes à galles (apports de ressources)	• Voir tous les freins à la mise en œuvre de ces techniques	/

16	Diffuser des recommandations basées sur l'analyse de l'effet des fertilisants et amendements sur la vie du sol	Comblent les trous de connaissances et le manque d'intrants efficaces concernant l'augmentation de l'activité biologique du sol, en particulier des antagonistes des bioagresseurs	STAFS	La R&D analyse l'effet des <i>différents fertilisants</i> sur la <i>vie du sol</i> et <u>diffusent</u> des <i>recommandations</i> aux producteurs . Ils <u>développent</u> également des <i>produits</i> pour <u>réensemencer</u> les <i>sols</i> et en <u>stimuler</u> la vie afin de <u>favoriser</u> les <i>antagonistes</i> et <i>compétiteurs des bioagresseurs</i> .	Augmenter la compétition et prédation naturelle des nématodes à galles	/	/
17	Coordonner le développement, la production et la commercialisation de variétés commerciales mauvaises hôtes adaptées à la filière	Faciliter l'introduction de cultures commerciales mauvaises hôtes en prenant en compte chaque acteur lors du développement des variétés	Filière	<u>Coordonner</u> la R&D , l'amont , la production et l'aval pour <u>développer</u> des <i>variétés commerciales mauvaises hôtes</i> que le fournisseur peut <u>délivrer</u> , le maraîcher <u>produire</u> et l' Aval <u>acheter</u> .	- Augmenter le délai de retour des cultures sensibles - Introduire des cultures commerciales assainissantes - Stimuler la biodiversité du sol par la biodiversité cultivée (dont les auxiliaires)	/	/
18	Développer des débouchés commerciaux pour les cultures de services (ex :	Faciliter l'introduction des cultures de services en créant des	R&D	Les maraîchers <u>récoltent</u> des <i>couverts</i> tels que les <i>Sorghos nématicides</i> et <u>restituent</u> la <i>paille</i> . L' Aval <u>propose</u> des <i>débouchés pour ces cultures</i> .	Augmenter la compétition et prédation naturelle des nématodes à galles (apports de ressources)	/	/

	grains des Sorghos)	débouchées commerciales					
19	Sensibiliser l'ensemble du secteur maraîcher à la nécessité du changement de pratiques, lever les résistances et fournir les infrastructures permettant ce changement	Guider l'accompagnement du changement de pratiques	STAFS	<u>Inform</u> er tous les acteurs concernés sur les <i>raisons</i> motivant le nécessaire <i>changement de pratiques</i> (voir ligne suivante), de manière à ce qu'ils <u>comprennent pourquoi</u> . <u>Lever les résistances</u> à ce changement de pratiques. <u>Développer les infrastructures</u> (coopération, matériel, ...) permettant le changement de pratiques.	Tous	/	Confiance des acteurs dans la démarche, l'objectif
20	Développer les connaissances et compétences de toute la filière sur la gestion agroécologique des sols	Convaincre les acteurs de l'importance et les intérêts du changement de pratiques et leur donner les clés pour le mettre en œuvre	STAFS	<u>Développer</u> les <i>compétences</i> et <i>connaissances</i> tout au long de la <i>fil</i> ière à l'aide de la recherche (R&D) . Cela <u>commence</u> par de la <i>sensibilisation</i> (bruit de fond général et récurrent à travers tous les canaux de diffusion) pour que tout le monde <u>comprenne</u> pourquoi c'est important. Ensuite, <u>la formation</u> , relativement théorique <u>permet de compléter</u> avant de se lancer dans <u>l'expérimentation concrète</u> (au sens large : technique, organisationnelle) et la <u>diffusion des connaissances</u> issues de ces <i>expérimentations</i> .	Tous	/	/
22	Développer un site internet avec toutes les infos sur la	Améliorer l'accessibilité les connaissances	R&D	La R&D <u>développe</u> un <i>site internet</i> avec toutes les <i>connaissances sur la gestion du sol</i>	Tous	Maintenance du site	/

	gestion agroécologique de la santé du sol	sur les méthodes de gestion agroécologique des sols pour faciliter leur mise en œuvre					
23	Développer les connaissances fondamentales sur les interactions bioagresseurs-vie du sol-plantes cultivées	Améliorer la base sur laquelle construire des pratiques agroécologiques, développer des techniques plus efficaces	R&D	La R&D grâce aux les institutions publiques ou d'autres financeurs <u>développent</u> la <i>recherche institutionnelle</i> sur l'interaction nématode à galles – vie du sol – plantes cultivées de manière à <u>comprendre</u> pourquoi telle plante est sensible et pas telle autre, quels sont les antagonistes et comment ils agissent.	Tous et en particulier : - Augmenter la compétition et prédation naturelle des nématodes à galles (apports de ressources) - Augmenter le délai de retour des cultures sensibles - Introduire des cultures commerciales assainissantes	• Finance ments	/
24	Analyser le niveau d'efficacité relatif des différentes méthodes de gestion des bioagresseurs	Améliorer la base sur laquelle construire des pratiques agroécologiques plus efficaces et homologuer des intrants	STAFS	La R&D <u>définit</u> de manière relative les différents <i>niveaux d'efficacité</i> des techniques de lutte. L' amont peut plus facilement <u>déposer</u> des <i>homologations</i> (Fiche EPP, ex solarisation vs <i>Jumbo star</i>).	Tous	/	/

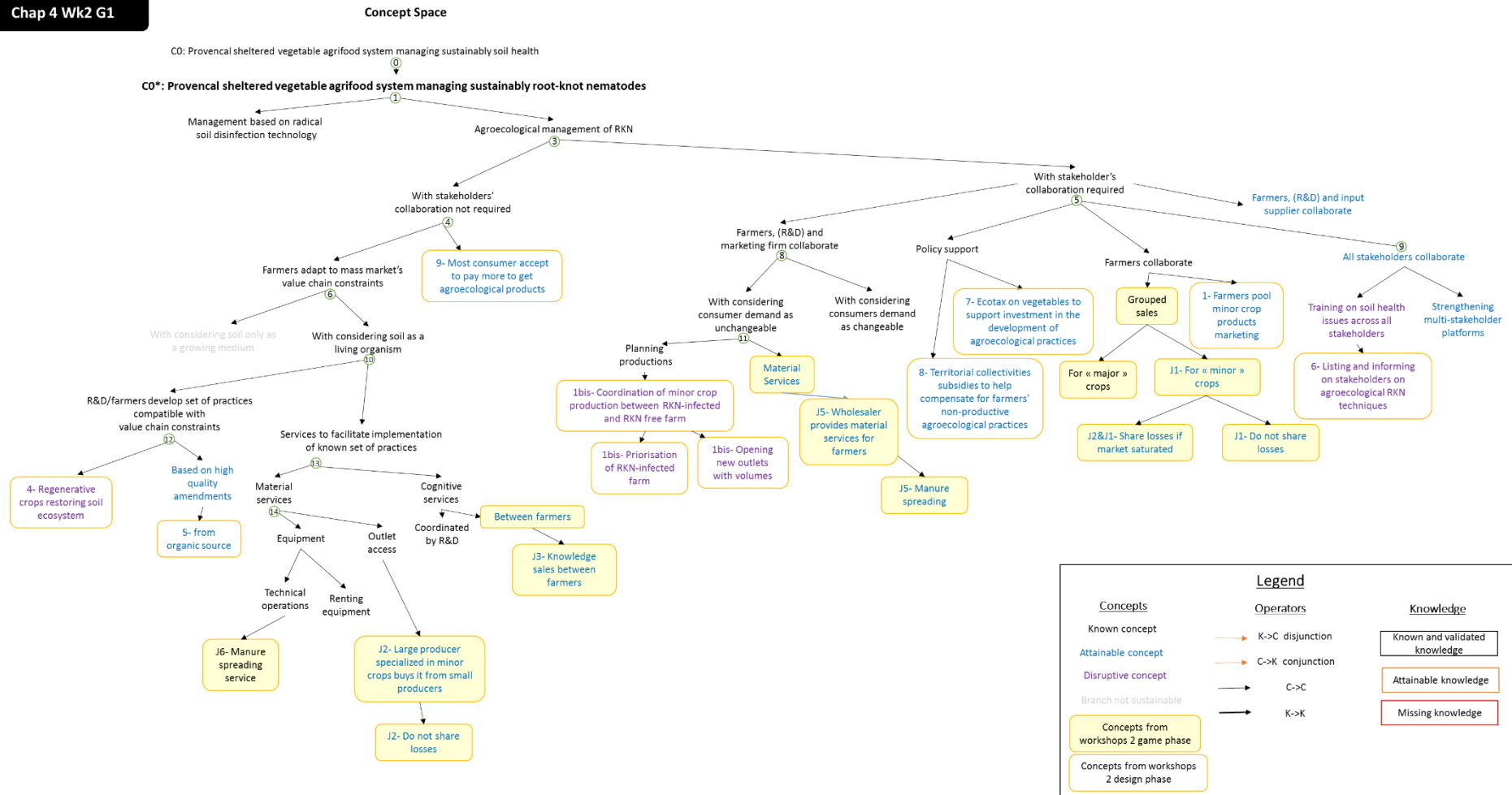
		utiles pour la gestion des bioagresseurs du sol					
25	Développer et intégrer des couverts passe pied permettant la gestion des bioagresseurs	Utiliser l'espace disponible pour introduire des cultures de service	Exploitation agricole	La R&D développe <i>un couvert pour les passe-pieds</i> , qui permet le contrôle des bioagresseurs. Les maraîchers les mettent en œuvre.	Couvert-Biopesticide/Biocontrôle	• Essais non concluant • Pb de gestion du climat de la serre	/
26	Développer et diffuser une approche multi-bioagresseurs et multi-critères pour la gestion de la santé des sols	Eviter de générer d'autres problèmes par le développement de solutions centrées sur les nématodes	STAFS	<u>Diffuser</u> les <i>connaissances</i> nécessaires à la bonne gestion des <i>sols</i> avec une approche multi-bioagresseurs et multicritère afin de ne pas <u>causer</u> de nouveaux problèmes par les solutions proposées et d' <u>engager</u> les maraîchers qui n'ont pas de problèmes de <i>nématodes</i> .	Tous	/	/
27	Réaliser des visites techniques chez tous les maraîchers provençaux afin de les informer sur les méthodes de gestion agroécologique de la santé du sol	Sensibiliser l'ensemble des maraîchers aux enjeux et techniques de gestion agroécologique de la santé du sol	STAFS	La R&D privée ou public <u>réalise</u> des <i>visites techniques systématiques</i> de tous les producteurs afin de les <u>informer</u> sur les leviers, avec un <i>conseil spécialisé</i> , <u>financé</u> par les institutions publiques et/ou l' Aval	Tous	/	/
28	Développer une méthode de diagnostic de la	Rendre accessible aux maraîchers	STAFS	La R&D <u>développe</u> une <i>méthode de diagnostic des sols</i> permettant aux maraîchers de <u>prendre facilement</u>	Tous	/	/

	santé du sol accessible aux maraîchers	l'état de leurs sols et leur suivi		<u>conscience</u> de leurs problèmes de sol. Ainsi, les maraîchers <u>s'investissent</u> plus dans le changement de pratique, au niveau <i>financier</i> et <u>d'acceptation des contraintes</u> liés à ce changement. Voir « stratégie » développer les compétences ». Mêmes acteurs vus.			
29	Conseiller de manière personnalisé les maraîchers pour un choix de leur porte-greffe adapté à l'état sanitaire de leur sol	Faciliter l'introduction de porte-greffes mauvais hôtes dans les rotations	Filière	Les pépiniéristes <u>conseillent</u> les maraîchers sur les <i>différents porte-greffes</i> à disposition et leurs caractéristiques, en fonction des <i>problèmes qu'ils connaissent</i> du maraîcher. Ainsi ils peuvent les <u>inciter</u> vers plus de <i>diversité</i>. Cette stratégie s'appuie sur <i>l'ancienneté de leur relation</i>, la <i>confiance</i> et <i>connaissance réciproque</i> (entre autre des pbs du maraîcher) et la volonté pour le pépiniériste de <u>continuer à garder ses clients</u>, en <i>bonne santé économique</i>, sur le long terme. Les maraîchers <u>introduisent</u> plus régulièrement des <i>porte-greffe mauvais hôtes ou pièges</i>. L'Aval peut aider à convaincre le pépiniériste de l'intérêt de cette démarche cette démarche lorsqu'un metteur en marché se fournit chez des maraîchers se fournissant chez un même pépiniériste. L'Aval coordonnerait donc une requête groupée de plusieurs maraîchères pesant sur les intérêts du pépiniériste. Les maraîchers pourraient aussi se coordonner sans l'Aval.	- Augmenter le délai de retour des cultures sensibles - Introduire des cultures commerciales assainissantes - Stimuler la biodiversité du sol par la biodiversité cultivée (dont les auxiliaires) - Volonté des producteurs de rester indépendant	- Economie d'échelle recherché par le pépiniériste ? - Le pépiniériste répond à la demande des maraîchers ?	/

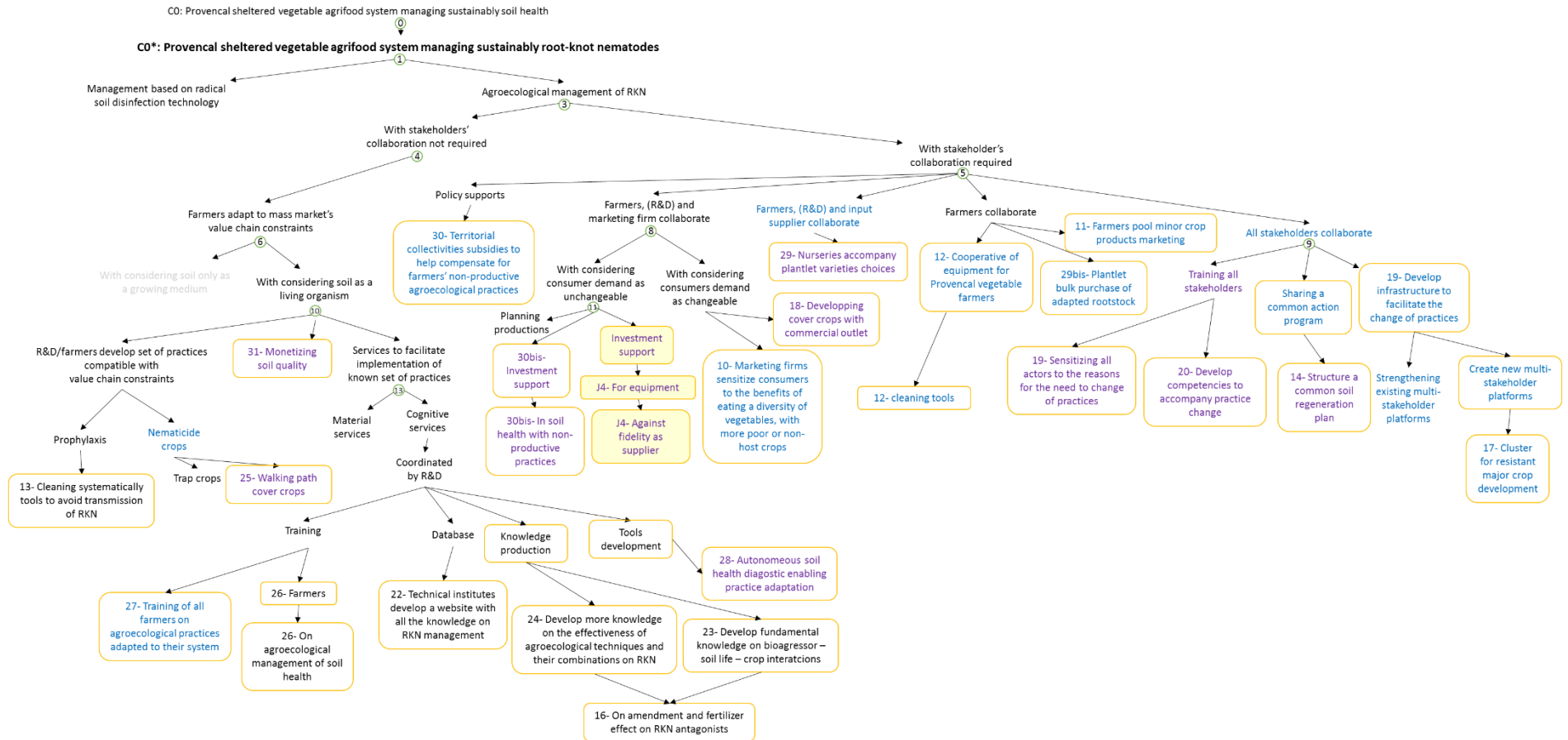
30 et 30bis (voir 8)	Mobiliser les fonds d'aides des collectivités territoriales pour compenser l'investissement des maraîchers dans la santé de leurs sols	Faciliter financièrement le développement et la mise en œuvre de méthodes de gestion agroécologique de santé des sols, au sein des exploitations	STAFS national/ Européen	Les institutions publiques (ex : MAEC) ou l' Aval <u>compense</u> pour les <i>moments non productifs</i> que les producteurs <u>incluent</u> dans leur <i>rotation</i> pour préserver la <i>santé de leur sol</i> (ex : engrais vert, jachère). Les maraîchers <u>incluent plus facilement</u> ces <i>pratiques</i> . <u>Mobiliser</u> les collectivités territoriales ou parc naturel nationaux, régionaux ou autres, par exemple via le <i>PCAET</i> . D'après la représentante des politiques publiques, il y a des STAFSs , conscient de l'impact des <i>changements de pratiques</i> , qui <u>financent</u> les <i>grandes actions d'animation</i> auprès des agriculteurs , en partenariat avec les CETAs, Cd'A, AgriBio et avec la contribution de l' ADEME . Il faut <u>massifier</u> cela.	Tous	- Risque que l'Aval ne contribue pas - Risque de complexité administrative n'amenant que les producteurs mettant déjà en œuvre ces pratiques à toucher ces aides (ex : pb des MAEC)	Facilité administrative pour les maraîchers
31	Développer une évaluation économique de la santé du sol, utilisée dans l'estimation de la valeur des terres	Sensibiliser et rendre économiquement attractif une bonne gestion de la santé du sol	STAFS	<u>Définir</u> un <i>prix au sol</i> basé sur sa <i>qualité</i> , comprenant la <i>santé du sol</i> (vie, % de MO).	Tous	Accord sur les critères permettant de prendre en compte la qualité du sol	/

Annexe O. Arbres C-K de représentation des solutions conçues Atelier étape 2

Chap 4 Wk2 G1



Concept Space



Annexe P. Principle of the 4th complex coupled innovation design in workshop 2

R&D informs and convinces vegetable farmers of the advantages and disadvantages of agroecological soil health management techniques, without making a catalog (n°6), and designs with each of them an implementation adapted to their specific case (need, outlet, context) (n°S6). They inform suppliers and marketers, and perhaps even consumers, about the practical problems encountered by vegetable farmers, these techniques and their interests (n°6). Suppliers also provide knowledge on agroecological techniques to vegetable farmers (n°S7). Public services (State, EU) promote these techniques to vegetable farmers, among others through regulations, for instance, subsidies if the agroecological techniques are applied and penalties if they are not (n°S8). Structured and strong lobbies, farmers' unions, elected officials, producer and buyer groups influence public services in this direction (n°S9).

Participants highlighted two challenges: (i) time required for farmers (and R&D) to learn and codesign new cropping systems, (ii) difficulties to structure lobbies and convince stakeholders that do not feel concerned by the issues and do not see the interest of a new method.

Annexe Q. Critères détaillées d'évaluation des innovations

Table - Evaluation grid for complex coupled innovation. The criteria underlined are the key criteria to fill-up during the workshop 3. The criterion in green is specific to the poor or non RKN-host crop introduction coupled innovation, and the criterion in brown is specific to high-quality amendment coupled innovation

	Field-level	Farm-level	STAFS-level
Resource availability	<u>Plantlets/seeds</u> <u>High-quality amendment</u> Availability in other inputs	Time and mental load of the farm manager Qualified workforce Financial resources Farm cropping area	Land resources Public resources (Financial, human resources, R&D)
Expected effect of the coupled innovation on	<u>RKN pressure</u> <u>The other soil-borne pest and diseases</u> The environment (pollutions, biodiversity) The long term productive capacity	<u>The economical farm balance</u> <u>The quality of working conditions</u>	<u>The economic health of the companies that are not farms</u> Vegetable sector competitiveness Contentment of societal expectations (e.g., environmental protection, food price) Farmer independence
Compatibility of the coupled innovation with the current context with	Common cropping systems Laws	Easiness of implementation (administrative, logistic)	Laws Easiness of implementation (administrative, logistic)

Critères (formulation finale)	Echelle	Description
Amendements de qualité	Parcelle	Commercial très transformés (ex : bouchons), peu transformés (fumier, compost de déchet vert), autoproduits (ex : fauche de prairie ou de luzerneraie, paille)
Plants/Semences	Parcelle	
Disponibilité en autres intrants	Parcelle	Eau, bâches plastiques, ...
Pression en NàG	Parcelle	Impacts sur la pression en NàG
Capacité productive à long termes	Parcelle	Autres BAs (aériens : tuta absoluta, adventices), BATs (Sclérotinia, Fusariose, Verticillose, etc.) structure physique du sol, statut acido-basique, fertilisé phospho potassique, durabilité des infrastructures -ex : les chemins),
Impact environnemental	Parcelle	Pression sur les ressources (eau , énergie), impact biodiversité (tellurique - vie du sol- et aérienne, pollution air et eau (eutrophisation, pesticides)
Rentabilité du SdC	Parcelle	- Rentabilité économique du SdC (melon 3kg/m² pas suffisant pour rentabiliser, pas possible de mettre 1/3 de 1,3ha en friche) - Rendement et qualité de la production - Calendrier valorisant les moments avec prix élevés (important de produire au maximum quand la production globale est la + faible, ex : Aubergine début Mai grâce aux conditions de la Crau)
Adéquation avec le reste des SdCs	Parcelle	Compatibilité avec le reste du SdC (planning cultural), maitrise technique

Compatibilité avec les exigences de l'Aval	Parcelle	agrée, cahier des charges, calendrier d'approvisionnement ...
Compatibilité avec législation	Parcelle	Compatibilité avec la législation (sur la qualité visuelle, la rotation, légumineuse en zone protégée nitrate, huile essentielle)
Temps et charge mentale du chef d'exploitation	EA	Temps maraîcher, charge de travail Charge mentale exploitants, complexification organisationnelles
Ressources financières	EA	Capacité d'investissement dans de nouveaux outils, nouvelles infrastructures, surfaces mais aussi dans des moments non productifs pour régénérer le sol, dans des intrants coûteux
Surface de l'exploitation	EA	Surface possédée par les exploitants (sous abris et plein champs)
Main d'œuvre qualifiée	EA	Main d'œuvre
Qualité des conditions de travail	EA	impact santé, charge de travail, difficulté physique, pouvoir prendre des vacances, job «sexy»
Viabilité économique de l'exploitation (inclus revenu)	EA	a. Revenu pour le producteur, rentabilité économique de l'exploitation, du SdC, viabilité économique de l'exploitation b. Calendriers valorisant les moments avec prix élevés (important de produire au maximum quand la production globale est la + faible, ex : Aubergine début Mai grâce aux conditions de la Crau) c. Capaciter à commercialiser d. Capaciter à commercialiser e. Endettement des EAs
Facilité de mise en œuvre	EA	a. Complexité organisationnelle, logistique

		b. Facilité de mise en œuvre (matériel déjà disponible sur l'EA, ressources localement disponible (parcelles en plein champs en bio à côté, MO à proximité, voisin produisant des cultures de coupures à côté, prêt à échanger les parcelles), peu consommateur de Md'O globalement ils n'ont pas le temps) c. Complexité administrative (imposé par l'aval sur les EAs)
Ressources foncières (territoriales)	Territoire et Filière	Ressources foncières
Ressources publiques (€, RH, R&D)	Territoire et Filière	a. Ressources humaines et financières publiques, soutien publique b. Effort de la recherche publique
Indépendance des producteurs (maître de ses choix de productions et de commercialisation)	Territoire et Filière	Respect de l'indépendance des producteur, compatibilité avec la culture du maraîcher comme individu indépendant poursuivant son intérêt propre
Satisfaction des attentes sociétales	Territoire et Filière	Approvisionnement local, consentement à payer, effet anticipé sur la santé, fourniture de matières premières
Compétitivité du secteur maraîcher provençal	Territoire et Filière	Compétitivité du secteur maraîcher provençal au niveau national et international, pb de débouchés
Santé économique des entreprises hors exploitations maraîchères	Territoire et Filière	a. Equilibre économique des entreprises hors production agricole (Aval, Amont), viabilité de ces entreprises (1^{er} metteurs en marché, distribution) b. Bon approvisionnement des entreprises de l'Aval
Facilité de mise en œuvre		a. Complexité organisationnelle, logistique

	Territoire et Filière	b. Complexité administrative (ex: homologation de produits)
Compatibilité avec législation	Territoire et Filière	Compatibilité avec la législation (sur la qualité visuelle, les EPP, le calibrage des produits)