



HAL
open science

Introduire une espèce de diversification dans les systèmes de culture d'un territoire : articuler production de connaissances et conception dans des dispositifs multi-acteurs Cas de la cameline dans l'Oise

Margot Leclère

► **To cite this version:**

Margot Leclère. Introduire une espèce de diversification dans les systèmes de culture d'un territoire : articuler production de connaissances et conception dans des dispositifs multi-acteurs Cas de la cameline dans l'Oise. Agronomie. Université Paris-Saclay, 2019. Français. NNT : . tel-02528345

HAL Id: tel-02528345

<https://hal.science/tel-02528345>

Submitted on 1 Apr 2020

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.

Introduire une espèce de diversification dans les systèmes de culture d'un territoire : articuler production de connaissances et conception dans des dispositifs multi-acteurs

Cas de la cameline dans l'Oise

Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay
préparée à AgroParisTech (l'Institut des sciences et industries du
vivant de l'environnement)

École doctorale n°581 : agriculture, alimentation, biologie,
environnement et santé (ABIES)
Spécialité de doctorat: Sciences agronomiques

Thèse présentée et soutenue à Paris, le 29 Novembre 2019, par

Margot Leclère

Composition du Jury :

Marianne Le Bail Professeur, AgroParisTech (UMR SAD-APT)	Présidente du jury
Mireille Navarrete Directrice de recherche, INRA (UR Écodeveloppement)	Rapportrice
Anne-Sophie Voisin Chargée de recherche, INRA (UMR Agroécologie)	Rapportrice
Nathalie Girard Directrice de recherche, INRA (UMR AGIR)	Examinatrice
Aline Vandewalle Chargée de mission, Chambre d'agriculture des Pays de la Loire	Examinatrice
Federica Zanetti Professeure associée, Université de Bologne (département d'agriculture et de science de l'alimentation)	Examinatrice
Marie-Hélène Jeuffroy Directrice de recherche, INRA (UMR Agronomie)	Directrice de thèse

Avant-propos

Ce travail a été réalisé, en partenariat avec la SAS PIVERT, dans le cadre de l'Institut pour la Transition Energétique (ITE) P.I.V.E.R.T. (www.institut-pivert.com) retenu parmi les Investissements d'Avenir. Ce travail a bénéficié d'une aide de l'Etat au titre du Programme d'Investissements d'Avenir portant la référence ANR-001-01.

Le programme de recherche GENESYS, piloté par la SAS PIVERT, ambitionne de « *développer des produits et des procédés compétitifs et respectueux de l'environnement à partir de biomasses oléagineuses* » (<https://sas-pivert.com/transfert-de-technologies/>). Au sein de ce programme, ce travail s'est inscrit dans le Sous-Programme n°1 (« Nouveaux systèmes de culture »). Plus particulièrement, ce travail a été réalisé dans le cadre du projet CONSYST (Démarche de CONception et d'évaluation de SYSTèmes de culture pour la bioraffinerie oléagineuse intégrant les modèles de culture, de systèmes de culture et l'analyse de cycle de vie). Ce projet a été piloté par AgroTransfert Ressources et Territoires et a impliqué différentes unités de recherche de l'INRA (les UMR Agronomie et ASTER et l'UR Agroimpact).

Ce projet a été réalisé en collaboration avec la Chambre d'Agriculture de l'Oise et l'ADANE (Association de Développement Agricole du Nord-Est de l'Oise).



Remerciements

Une thèse est avant tout une aventure, une aventure que l'on conduit parfois de façon solitaire, par fierté ou par dépassement de soi, mais qui ne serait pas la même sans l'ensemble des personnes que l'on croise sur son chemin. Certaines nous motivent, d'autres nous aident à réfléchir ou à nous remettre en question. Et puis, il y a celles qui nous font rire ou relativiser quand la terre entière semble s'effondrer, et celles qui partagent notre enthousiasme quand les idées reviennent au grand galop. Je voudrais à travers ces quelques lignes, remercier ces personnes qui ont partagé avec moi de (très) près ou d'un peu plus loin cette aventure.

Mes tous premiers remerciements vont, de fait, à Marie-Hélène Jeuffroy et Chantal Loyce, mon duo d'encadrement « de choc ». Merci à toutes les deux de m'avoir permis de m'épanouir au jour le jour dans cette activité de recherche. Merci d'avoir toujours été à l'écoute de mes propositions, et de m'avoir toujours poussé à aller plus loin et à ne rien lâcher, même quand c'était dur (surtout ces derniers mois). J'ai réellement apprécié de travailler avec vous (et pas uniquement pour les pauses chocolat pendant nos réunions « charnières », dont je ressortais, je vous l'avoue, souvent épuisée, malgré mon enthousiasme !). Marie-Hélène, merci d'avoir permis la concrétisation de cette « thèse idéale », dont je t'avais parlé en septembre 2015 à l'issue de mon stage de fin d'études. Les critères n'étaient pas faciles à respecter, et pourtant aujourd'hui, en faisant le bilan de ces trois dernières années, je peux l'affirmer, tout y est. Chantal, merci d'avoir toujours su trouver les mots justes et merci pour tes conseils avisés. Il est rare de trouver une personne qui n'oublie pas en quoi une thèse est une réelle épreuve, et tu n'as jamais refusé de donner de ton temps pour faire en sorte que tout se passe au mieux pour moi (oui, j'ai eu la chance d'être parmi celles dont la directrice de thèse prend le temps de passer une après midi à faire des PMG quand le timing est serré).

Je remercie l'ensemble des membres de mon comité de pilotage : Christophe David, Fabien Ferchaud, Jean-Marc Meynard et Juliette Brun qui a rejoint en cours de route ce trio de pilotage, à notre demande. Nos échanges ont, certes, été très ponctuels mais ont largement contribué à l'orientation générale de cette thèse.

Je remercie également les membres du projet CONSYST dans lequel s'est intégrée cette thèse : Caroline Godard, Claire Gourdet, Fabien Ferchaud et Julie Wohlfahrt. Ce fut un réel plaisir de travailler avec vous, et je garde en mémoire vos encouragements bienveillants à chaque réunion de projet. À double titre (en tant que membre du projet et membre du comité de pilotage), un grand merci à Fabien Ferchaud, sans qui, les simulations avec LIXIM n'auraient jamais pu être réalisées.

Ce travail n'aurait pas vu le jour sans la collaboration étroite que j'ai pu avoir avec l'ADANE et la chambre d'agriculture de l'Oise. Je remercie tout particulièrement Christophe Chatain pour cela. Merci Christophe de m'avoir accordé ta confiance et d'avoir tout de suite accepté de participer à ce projet alors que je ne savais pas moi-même où cela mènerait. Merci à Laurence Legrand d'avoir pris la suite de Christophe, avec tout autant d'enthousiasme. Merci à Sophie Wieruszeski de la chambre d'agriculture, d'avoir partagé avec moi son expertise sur la cameline, cela m'a été d'une grande aide.

C'est avec beaucoup d'émotion, que je remercie l'ensemble des agriculteurs qui se sont impliqués dans ce projet et particulièrement ceux qui m'ont permis de mettre en place des expérimentations chez eux : Maxime Béguin, Nicolas Bullo, Philippe Carpentier, Vincent Cavrois, Bruno Delacour, Hervé De Smedt, Alex Vandeputte, Vincent Vecten. Une pensée particulière pour les « trois persévérants » Alex, Philippe et Hervé qui ont été présents à chaque réunion, à chaque visite quelle que soit la météo (et on sait qu'un jour de beau temps, chez les agriculteurs, ça peut être sacré !). J'espère que cette expérience vous aura apporté au moins 1% de ce que mes échanges avec vous m'ont appris. Ce fut, en tout cas, un vrai bonheur de travailler avec vous. Merci également à Pierre-Louis Carrier, Guillaume Le Pogam, Denis Poiret et Guy Sara, qui sont venus renforcer les troupes pour le dernier atelier.

Je tiens également à remercier l'ensemble des personnes qui ont participé aux différents ateliers qui ont été organisés au cours de cette thèse et plus largement les personnes que j'ai pu solliciter pour leur expertise sur la cameline au fil de ces trois ans. Merci à François Mesnard, Roland Molinié et à Brigitte Thomasset d'avoir partagé leur expertise sur le volet « qualité ». Merci aux différentes personnes de Terres Inovia

(Veronique Biarnès, Agathe Penant, Arnaud Van Boxsom) qui m'ont aussi éclairée sur le fonctionnement de cette culture (au démarrage tellement mystérieuse !!). Je remercie également la SAS PIVERT et particulièrement Jérôme Le Nôtre qui a accepté de représenter cette structure dans les échanges multi-acteurs et qui nous a fourni l'accompagnement logistique et un point de rassemblement central à Compiègne pour nos réunions. Merci également aux collègues de l'IJPB de Versailles, Jean Denis Faure et Mark Tepfer notamment, qui m'ont permis de découvrir le volet « génétique » de la cameline et qui ont toujours été intéressés pour en savoir plus sur mon travail. Enfin, je remercie Russ Gesch de l'USDA et Marisol Berti de l'Université du North Dakota, de m'avoir accueilli à Morris et Fargo pour me faire découvrir la cameline américaine. Ce fut une expérience enrichissante autant professionnellement que personnellement et je ne regrette pas d'avoir pris ces trois semaines en fin de thèse pour venir voir de mes propres yeux les Grandes Plaines !!

Une grande partie de ma thèse s'est appuyée sur de l'expérimentation. Il me tient donc à coeur de remercier l'ensemble du personnel technique de l'UMR Agronomie qui m'a accompagné au cours de cette aventure (et pas des moindres !). Mes toutes premières pensées vont à toi, Mathieu. Toi, qui était si enthousiaste à l'idée de commencer à travailler sur une nouvelle culture et qui a mis tant d'énergie à la conception de cette expérimentation... j'aurais aimé que tu puisses en voir les résultats. Tu nous as quitté en septembre 2017, de manière inattendue, mais saches que tu as été (et tu es) dans nos pensées à chaque minute. Merci à Arnaud Butier d'avoir accepté de reprendre la responsabilité de ces expérimentations et d'avoir réalisé un appui régulier à ce travail malgré tout ce qui s'est passé. Voilà maintenant un an que nous avons clôturé les derniers essais, et je suis déjà nostalgique des rendez-vous sur le parking de Grignon à 6h tapantes et des pauses repas au resto « Le Donjon » pour une bonne entrecôte-frites. Merci à Éléonore Courteau pour sa précieuse aide pour les prélèvements sur les parcelles, pour les identifications d'adventices et pour les battages et tri d'échantillons par 35°C au mois d'août... bizarrement je me souviens à présent que des fous rires et des séquences Bollywood. Merci à Gilles Grandeau pour ses conseils et pour sa disponibilité pour les multiples prélèvements de sol. Merci à Véronique Tanneau et Richard Gosse pour leur aide pour les dépouillements au laboratoire. Merci également à Herminie qui est souvent venue nous prêter main forte dans les moments de rush.

Pour leur aide dans les expérimentations mais surtout dans l'analyse des données, je tiens à remercier les deux stagiaires que j'ai eu la chance d'encadrer au cours de cette thèse : Hugo Gibert et Anne-Raphaëlle Lorent. Je sais que j'ai été très exigeante (ne vous en faites pas, je l'ai été aussi avec moi-même en cette fin de thèse), mais ce fut réellement un plaisir de travailler avec vous et de vous voir évoluer au cours de ces quelques mois. J'espère vous avoir transmis un peu de ma passion pour la recherche.

Une thèse, c'est également intégrer une équipe de recherche. Je remercie chaleureusement toute l'UMR Agronomie, après ces trois ans passés à Grignon je me sens un peu « comme à la maison ». Merci à Michèle pour le soutien administratif et à Alain pour avoir toujours trouvé les articles introuvables en un temps record. Merci à Raymond pour ses conseils sur les ateliers de conception. Merci à Élise pour le soutien à mon premier congrès international (et pour les moments sympas passés à Genève). Merci à l'équipe des « profs », Antoine, Chantal, Nicolas et Safia, de m'avoir donné la possibilité de présenter mes travaux de thèse et de m'avoir fait découvrir l'enseignement. Merci à Laurence, Claudine, Muriel, Élise, Marie-Noël, Caroline, Mathilde B. et j'en oublie, pour ces pauses du midi qui, même en plein hiver, restent ensoleillées par nos discussions animées. Merci à Arnaud G. et Lorène pour le soutien moral au début du mois d'août. Un grand merci à la « team jardin » Claudine, Maude et Mathilde C. avec qui j'ai pu découvrir les joies du jardinage ! Un petit coin de paradis où on a bien rigolé. Et puis il faut penser à ceux qui sont partis vers d'autres horizons mais qui ont aussi contribué à cette aventure. Une pensée particulière pour Amandine, Valentin et Damien, qui ont accompagné mon début de thèse. Enfin, je tiens à remercier les deux personnes qui ont partagé mon bureau et mes galères ces deux dernières années. Le bureau des 3M (et le plus vert de toute l'UMR) : Mathilde, Maude, ce fut un réel plaisir de partager ces moments avec vous. Je ne pourrais pas faire la liste des fous rires que l'on a eus, mais vous avez largement contribué à rendre cette aventure beaucoup plus facile. Un grand merci à toi Maude, qui a été là ces dernières semaines, et qui a toujours pris le temps de m'écouter, de me remonter le moral.

Un immense merci à la « Team Montpellier LEPSE » : Agathe, Anaëlle, Diane, Maeva, Romain et Sandy. Il me faudrait bien plus que quelques lignes pour vous remercier. Ça a été tellement dur de vous quitter pour attaquer cette aventure toute

seule ... mais heureusement la technologie rapproche et vous m'avez tellement fait rire avec vos messages et vos GIF. Parmi les Montpelliérains, un grand merci à Marine qui s'est retrouvée, tout comme moi dans le Nord. Les soirées ciné-resto à Montparnasse (et puis course pour attraper le dernier transilien) font partie intégrante de cette aventure de thèse et m'ont permis de garder le moral pendant ce premier hiver toute seule. Mille mercis à Agathe, mon petit ange gardien de ces dernières semaines avec tes messages de motivation quotidiens.

Un immense merci à ma famille pour leur soutien. Merci à ma mère et ma grande sœur d'avoir été présentes pour la dernière ligne droite, de m'avoir soutenue et rassurée quand j'étais en difficulté. Merci à Claudine et Bernard pour leurs encouragements et leur bienveillance. Merci à Léa pour ta bonne humeur et ton soutien quand j'ai été seule.

Enfin, merci à toi, Fabien, d'avoir été à mes côtés depuis le début de cette aventure. Merci d'avoir accepté de mieux connaître mon univers (c'est même toi qui fais la promo de l'huile de cameline maintenant !). Merci de n'avoir jamais douté de moi et de m'avoir tiré vers le haut quand j'étais au plus bas. Tout aventurier, même solitaire, est toujours entouré d'une équipe technique qui œuvre au bon déroulement de l'expédition et au bien être de l'aventurier. Oui, ça a été mon aventure, mais tu as été à toi tout seul mon équipe technique...

Introduction générale	1
------------------------------------	----------

Etat de l'art et problématique	9
---	----------

1. Introduire une nouvelle espèce suppose de reconcevoir le système de culture, dans le cadre de l'agroécologie	9
--	----------

1.1. Quelles méthodes pour re-concevoir les systèmes de culture ?	10
---	----

1.1.1. La conception pas-à-pas	10
--------------------------------------	----

1.1.2. La conception de novo.....	11
-----------------------------------	----

1.1.3. Des dispositifs hybrides combinant « pas-à-pas » et <i>de novo</i>	14
---	----

1.2. Quelle place des acteurs dans les processus de conception ?	15
--	----

1.2.1. De l'agronome-concepteur à l'agriculteur-concepteur : changement de posture de l'agronome dans le processus de conception.....	15
---	----

1.2.2. Diversité des acteurs impliqués dans les processus de conception.....	16
--	----

2. Produire des connaissances pour concevoir des systèmes agroécologiques	19
--	-----------

2.1. Quelles connaissances pour concevoir des systèmes agroécologiques ?.....	19
---	----

2.2. Quelles méthodes pour produire, capitaliser et partager les connaissances ?.....	23
---	----

2.2.1. Les expérimentations agronomiques	23
--	----

2.2.2. Des méthodes spécifiques pour produire et capitaliser des connaissances expertes.....	25
--	----

2.2.3. Utiliser la conception pour produire des connaissances ?	29
---	----

3. Introduire la cameline dans les systèmes de culture de l'Oise : quels enjeux de production de connaissances ?	31
---	-----------

3.1. La cameline : une culture oléagineuse rustique avec de multiples usages.....	31
---	----

3.2. Une culture orpheline de recherche et ancrée dans un mode de production classique de connaissances scientifiques.....	35
--	----

3.3. Des connaissances expertes et techniques existantes mais limitées	39
--	----

4. Problématique	43
-------------------------------	-----------

5. Démarche générale	45
-----------------------------------	-----------

CHAPITRE 1	49
-------------------------	-----------

Cultiver de la cameline en double culture dans l'Oise : exemple d'une approche de conception participative pour produire des connaissances actionnables sur une espèce de diversification	49
--	-----------

1. Introduction.....	53
-----------------------------	-----------

2. Material and methods	56
--------------------------------------	-----------

2.1. The case study: background and characteristics of the study area	56
---	----

2.2. General frame of the participatory design approach	56
---	----

2.3. Multi-actor workshop	58
---------------------------------	----

2.4. On-farm trials	59
---------------------------	----

3. Results	62
-------------------------	-----------

3.1. Individual and collective design of crop sequences that included camelina during the workshop	62
--	----

3.1.1. The crop sequences prototypes designed.....	62
--	----

3.1.2. Assessment indicators derived from participants' expectations.....	62
---	----

3.1.3. Knowledge gaps linked to the introduction of camelina in a crop sequence	64
---	----

3.2. Collective design of camelina management as a second crop during the workshop ...	66
--	----

3.2.1. Management options designed.....	66
3.2.2. Knowledge gaps linked to camelina management.....	66
3.3. Farmers' design and assessment of on-farm trials	68
3.3.1. Elicitation of farmers' assessment criteria and monitoring indicators	68
3.3.2. Farmers' learning and identification of knowledge gaps.....	69
4. Discussion.....	73
4.1. Contribution of our approach to the production of actionable knowledge	73
4.2. Contribution of our approach to the identification of relevant topic lines for research programs.....	74
4.3. An original participatory design approach.....	75
4.4. The need for combining a multi-actor workshop and on-farm trials to foster the production of actionable knowledge on a little-known crop	77
5. Conclusion.....	78
Préambule aux chapitres 2 et 3.....	81
Conception et évolution du réseau d'essais multi-local et pluriannuel	81
CHAPITRE 2	85
Contrôler la pression adventice dans la cameline avec des itinéraires techniques innovants sans herbicide dans différents environnements	85
1. Introduction.....	89
2. Material and methods	91
2.1. The multi-environment trial.....	91
2.2. Camelina crop management routes.....	93
2.3. Experimental design and main measurements	95
2.4. Statistical analysis	95
3. Results	97
3.1. Total crop biomass.....	97
3.2. Weed biomass	98
3.3. Effect of total crop biomass on weed biomass at maturity.....	100
3.4. Crop yields	100
4. Discussion	103
4.1. Identifying promising alternatives to chemical weeding to manage weeds in camelina	103
4.2. Towards a better explanation of the environment effect on weeds	105
4.3. Opening a path to innovative agroecological ways to control weeds in camelina crop and camelina-based cropping systems	106
5. Conclusion.....	107

CHAPITRE 3109

Diagnostic de la variabilité du rendement et la qualité des grains de cameline au sein d'un réseau d'essais multi-local et pluriannuel dans le Nord de la France ...109

1. Introduction	113
2. Materials and methods.....	115
2.1. The on-farm experimental network	115
2.2. Data collection.....	115
2.3. Indicators for limiting factors.....	117
2.3.1. Indicator for nitrogen crop status	117
2.3.2. Indicator for water stress.....	117
2.3.3. Indicators for yield loss due to mildew and hail	118
2.3.4. Indicator for grain filling duration	119
2.3.5. Indicator for high temperature stress	120
2.4. Data analysis	120
2.4.1. Step 1.....	120
2.4.2. Step 2.....	120
2.4.3. Step 3.....	121
3. Results.....	122
3.1. Camelina performances across the experimental network.....	122
3.2. Major limiting factors of camelina yield and seed quality	124
3.3. Effects of environmental conditions and crop management routes on major limiting factors	127
4. Discussion	129
4.1. Camelina performances variability as an opportunity to develop flexible uses at the local scale	129
4.2. Contribution of the agronomic diagnosis to include camelina in cropping systems of northern France	130
4.3. Contribution of the agronomic diagnosis to design camelina crop management routes suited to northern France	131
5. Conclusion.....	133

CHAPITRE 4135

Conception par des agriculteurs de modalités d'insertion et de conduite de la cameline adaptées à leurs situations à partir de connaissances produites

localement.....135

1. Introduction	137
2. Matériels et méthodes	139
2.1. Organisation générale de l'atelier de conception	139
2.2. Construction du partage de connaissances	140
2.3. Analyse des données issues de la phase de conception	142
3. Résultats.....	145
3.1. Le partage de connaissances.....	145
3.1.1. Différents choix de représentation pour expliciter les processus.....	145
3.1.2. Le schéma fonctionnel : une proposition de formalisation commune aux deux dispositifs	

3.2. Analyse transversale des modalités d'insertion et de conduite de la cameline conçues par les agriculteurs	149
3.2.1. Diversité des modalités conçues	149
3.2.2. Origine de la diversité des modalités conçues	152
3.2.3. Fonctions attendues de la cameline	154
3.2.4. Identification de trous de connaissances	155
4. Discussion	156
4.1. Quelles conséquences de l'organisation proposée sur l'exploration et le processus de conception par les agriculteurs ?	156
4.1.1. Originalité de la démarche	156
4.1.2. Concevoir dans sa propre situation : quel risque d'un effet de fixation ?	157
4.1.3. Mobiliser des connaissances uniquement locales : quel impact sur la conception ?	158
4.2. L'atelier de conception : un dispositif de production de connaissances permettant d'accompagner l'introduction de la cameline à l'échelle du territoire ?	159
Discussion générale	163
1. Produire des connaissances sur une espèce de diversification dans une perspective agroécologique	163
1.1. Une production de connaissances très diversifiée	163
1.2. Une production de connaissances réalisée de manière économe	165
1.2.1. L'identification et la hiérarchisation des trous de connaissances bloquant pour la conception	166
1.2.2. La construction d'analogies avec des cultures « plus connues »	168
1.2.3. La combinaison de différentes formes d'expérimentations au champ	170
2. Raisonner et accompagner l'introduction d'une nouvelle espèce dans les systèmes de culture d'un territoire : retour sur la démarche mise en œuvre	172
2.1. Un dispositif d'innovation ouverte	173
2.2. Spécificités du cas d'étude	175
2.2.1. Le projet de bioraffinerie oléagineuse territoriale	175
2.2.2. Des agriculteurs regroupés au sein d'un même groupe de développement	176
2.2.3. Une culture rustique à cycle court	177
3. Perspectives	178
3.1. Quelles perspectives de recherche sur la cameline ?	178
3.2. Une démarche pour lever les verrous de la diversification ?	181
Conclusion générale	185
Références bibliographiques	187
Annexes	223
Liste des tables	263
Liste des figures	265

Introduction générale

L'intensification de l'agriculture durant la deuxième moitié du 20^{ème} siècle, plus communément appelée « révolution verte », s'est accompagnée d'une simplification et d'une spécialisation des systèmes agricoles à l'échelle mondiale. Ainsi, par exemple, en 2010, l'Asie concentrait 90 % de la production mondiale de riz avec plus d'un tiers provenant de Chine et d'Inde (Seck et al., 2012) alors que le Brésil, l'Argentine et les États-Unis produisaient à eux seuls 81% de la production mondiale de soja (Billen et al., 2014; Lassaletta et al., 2014). En France, l'intensification de l'agriculture a également conduit à une nette diminution de la diversité des cultures dans les assolements (Figure 1) et à une spécialisation des systèmes agricoles, avec une production centrée sur le blé et le colza dans le Bassin Parisien, et une production végétale destinée à l'élevage (maïs ensilage et prairies monospécifiques) dans l'Ouest (Schott et al., 2010; Meynard et al., 2013a).

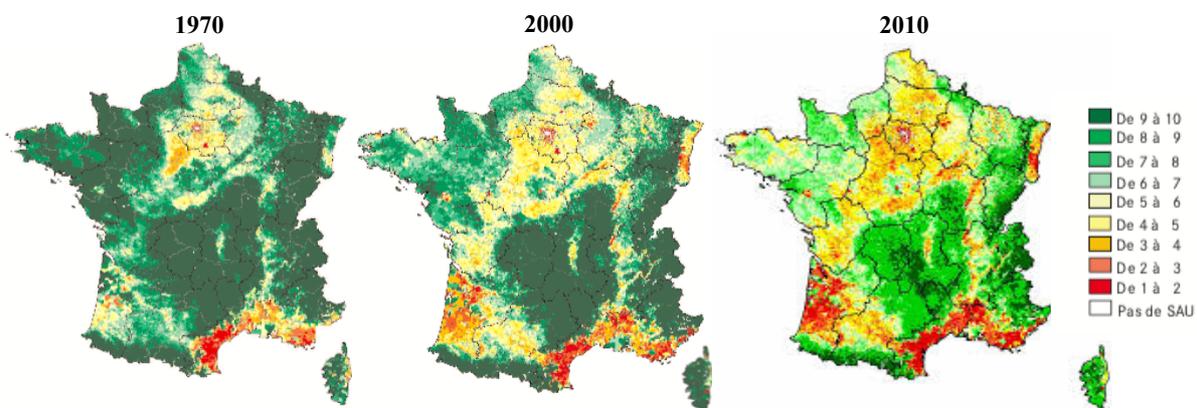


Figure 1. Évolution de l'indicateur de diversité des assolements par commune entre 1970 et 2010 en France (source : Agreste). Le score est établi pour chaque exploitation agricole en fonction de l'importance relative des cultures dans l'assolement rapportée à la superficie agricole utilisée par l'exploitation agricole. Le score varie de 1 (couleur rouge) à 10 (couleur verte). Un score de 1 correspond à une exploitation agricole où l'ensemble des sols sont occupés par une seule culture (ex. vigne) et un score de 10 correspond à une exploitation très diversifiée où 100% des surfaces sont herbeuses ou où chaque culture représente moins de 10% de la superficie agricole. Cet indicateur est la moyenne des scores obtenus pour chaque exploitation agricole de la commune, pondérée par la superficie agricole représentée par l'exploitation agricole.

Or, ces systèmes agricoles simplifiés contribuent à réduire à la fois la biodiversité planifiée et associée¹ dans les écosystèmes cultivés, et en conséquence, les services écosystémiques qui leur sont associés, comme par exemple la régulation des bioagresseurs (Le Roux et al., 2008). Ainsi, en France, la corrélation positive observée entre la fréquence de colza dans la SAU d'une région et l'usage de pesticides sur cette culture suggère que la présence accrue de colza dans le paysage augmente le risque d'apparition des bioagresseurs (Schott et al., 2010). De même, en Argentine, l'intensité annuelle d'application de glyphosate croît avec la fréquence de retour du soja dans les rotations (Salembier et al., 2014). De telles applications répétées de pesticides conduisent au développement de résistances, tant chez les adventices que chez les insectes - plus de 500 espèces d'insectes résistantes à un ou plusieurs insecticides répertoriés aux Etats-Unis (Elzen et Hardee, 2003; Gould et al., 2018) -, ce qui confronte les agriculteurs à des impasses techniques (Chauvel et al., 2001; Houndété et al., 2010). En France, Robert et al. (2016) ont mesuré, dans certaines populations d'altises d'hiver (insectes ravageurs du colza), jusqu'à 90% d'individus résistants aux pyréthrinoïdes et ont fait le constat suivant : « *leur utilisation majoritaire [des pyréthrinoïdes], combinée à peu de possibilités d'alternance avec d'autres familles chimiques [dues aux rotations courtes], a finalement favorisé la sélection et l'installation des individus résistants au sein des populations. [...] Il est donc indispensable de limiter leur utilisation.* ». De plus, en raison de la disponibilité, à bas coût, des engrais azotés de synthèse, la simplification des systèmes de culture s'est focalisée sur le développement de cultures exigeantes en azote au détriment d'autres espèces, ce qui a conduit notamment en France et en Europe à (i) une chute drastique des surfaces cultivées en légumineuses et (ii) à une augmentation de l'utilisation des engrais azotés et par voie de conséquences des impacts environnementaux qu'ils induisent, comme les émissions de gaz à effet de serre (N₂O) ou les risques de pollution nitrique des eaux superficielles et/ou souterraines (Voisin et al., 2014; Magrini et al., 2016; Zander et al., 2016).

¹ La biodiversité planifiée et la biodiversité associée sont les deux composantes de la biodiversité. La biodiversité planifiée (ou « contrôlée ») est celle choisie par l'agriculteur. La biodiversité associée est la part de la biodiversité qui colonise naturellement un agroécosystème via l'environnement proche. Elle inclut tous les organismes (bénéfiques, neutres comme nuisibles en agriculture) présents, de manière ponctuelle ou continue, dans les champs cultivés et les habitats semi-naturels attenants.

La remise en question de cette agriculture intensive et spécialisée a conduit à l'émergence, au début du 20^{ème} siècle, de l'agroécologie, concept polysémique recouvrant une discipline, un mouvement et une pratique (Wezel et al., 2009). Le principe général de l'agroécologie est de baser le fonctionnement des agroécosystèmes non plus sur une dépendance aux intrants de synthèse, mais sur le fonctionnement des écosystèmes naturels (Stassart et al., 2012). Ainsi, l'un des cinq principes historiques de l'agroécologie, telle que définie par Altieri (1983, 1989, 1999), est de favoriser la diversification d'espèces et de variétés dans l'agroécosystème, à la fois dans l'espace et dans le temps. En effet, de nombreuses études montrent que l'allongement des rotations, *via* l'introduction de nouvelles espèces cultivées, permet de réduire l'usage des pesticides et des engrais de synthèse, respectivement en diminuant la pression des adventices, des champignons pathogènes et des ravageurs, et en introduisant de l'azote par la fixation symbiotique des espèces légumineuses (Jensen et Hauggaard-Nielsen, 2003; Colbach et al., 2010; Lin, 2011; Wezel et al., 2014).

Cependant, le développement de ces espèces de diversification reste limité (Meynard et al., 2013; Andrivon et al., 2017). Par exemple, en France, les surfaces cultivées recensées pour onze cultures de diversification² étaient, en 2011, comprises entre 3 000 et 18 000 hectares selon les espèces étudiées, contre 5 millions pour le blé ou 1.5 millions pour le colza (Meynard et al., 2018). Pour comprendre plus précisément les raisons de ce faible développement des cultures de diversification, en s'appuyant sur le cas de ces onze cultures, une étude des freins et des leviers à la diversification au niveau des exploitations agricoles et des filières a été conduite en France par l'INRA (Meynard et al., 2013b, 2018). Cette étude montre que plusieurs freins, interconnectés, caractérisent les différentes étapes de la filière, résultant en un véritable verrouillage du système sociotechnique dominant, largement organisé autour des espèces majeures (Figure 2). **Un des freins majeurs à la diversification, identifiés dans cette étude, est le manque de connaissances scientifiques et techniques pour raisonner l'introduction et la conduite d'une nouvelle espèce dans les systèmes de culture,**

² Pois (*Pisum sativum* L.), féverole (*Vicia faba* L.), lupin (*Lupinus albus* L.), pois chiche (*Cicer arietinum* L.), luzerne (*Medicago sativa* L.), lin fibre (*Linum usitatissimum* L.), lin oléagineux (*Linum usitatissimum* L.), moutarde (*Brassica juncea* (L.) Czern. & Coss.), sorgho (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), chanvre (*Canabis sativa* L.) et soja (*Glycine max* L.)

comme par exemple des connaissances sur les pratiques, des connaissances sur les effets précédents de ces espèces, ou des connaissances pour comprendre un échec observé et modifier l'itinéraire technique l'année suivante (Meynard et al., 2015). Selon ces auteurs, ce manque de connaissances concerne divers acteurs, incluant la recherche publique agronomique : « *Les espèces de diversification sont peu étudiées, peu sélectionnées, peu disponibles sur les marchés, leurs produits sont mal adaptés aux processus industriels, pas toujours conformes aux normes dominantes, et les acteurs qui pourraient constituer des filières autour d'elles se connaissent mal* ». Face à la nécessité de concevoir des systèmes de culture diversifiés, il apparaît central d'accroître la production de connaissances nécessaires à la diversification des systèmes de culture : quelles connaissances produire sur ces cultures de diversification pour raisonner et accompagner leur introduction dans les systèmes de culture ? Comment produire ces connaissances ?

Compte tenu du verrouillage systémique observé, les auteurs de l'étude insistent sur la nécessité de mobiliser de manière simultanée et organisée une diversité d'acteurs et proposent, pour cela, la mise en place de dynamiques locales ou régionales, structurées autour de projets de diversification.

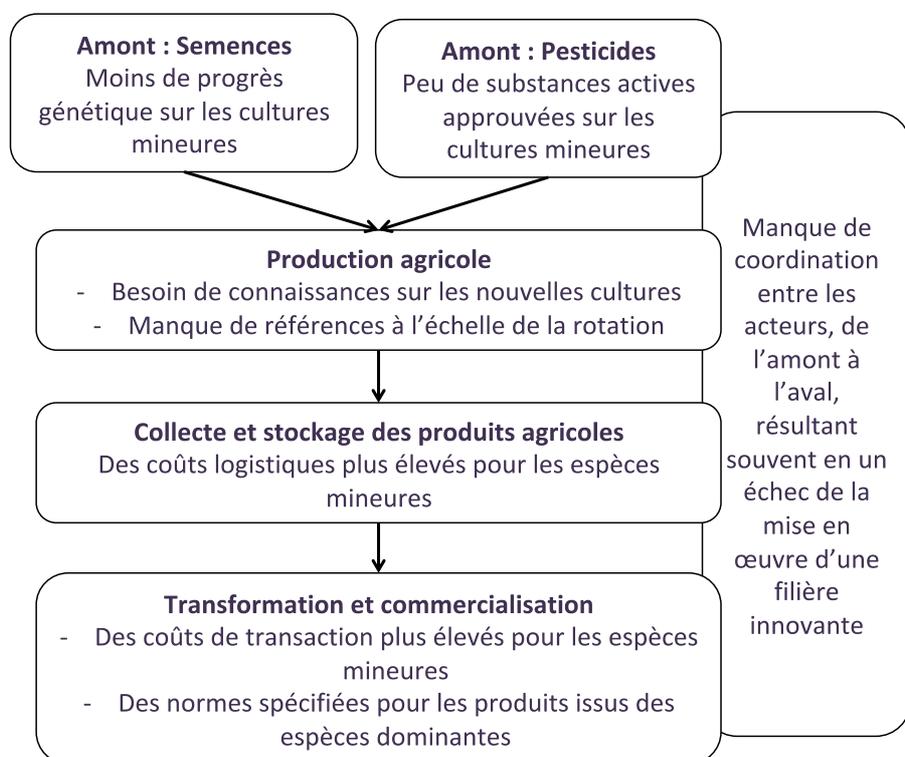


Figure 2. Principaux blocages à la diversification sur l'ensemble de la filière (d'après Meynard et al., 2018)

Dans l'Oise, un projet de bioraffinerie oléagineuse territoriale, porté par l'Institut pour la Transition Énergétique PIVERT³, a vu le jour en 2012 dans le cadre du Programme Investissement d'Avenir (SAS PIVERT, 2019). Pour accompagner ce projet, un programme de recherche multipartenaires⁴, portant sur l'ensemble du cycle de la biomasse depuis la production agricole jusqu'aux bioproduits, a été mis en œuvre. Du point de vue de la production, le projet d'implantation de cette bioraffinerie a notamment conduit les partenaires à s'interroger sur la possibilité de diversifier l'approvisionnement local en matières premières à l'échelle du bassin d'approvisionnement (Encadré 1). Pour contribuer à cette thématique, dans le cadre de cette thèse, je me suis particulièrement intéressée à l'introduction d'une nouvelle espèce oléagineuse d'intérêt industriel, la cameline (*Camelina sativa* (L.) Crantz), dans les systèmes de culture de l'Oise pour approvisionner localement et durablement cette bioraffinerie (Encadré 2).

Cette thèse vise à proposer une démarche pour raisonner et accompagner l'introduction d'espèces de diversification dans les systèmes de culture d'un territoire en s'appuyant sur le cas d'étude de la cameline dans l'Oise pour approvisionner durablement une bioraffinerie oléagineuse. En particulier, cette démarche vise à produire des connaissances sur les espèces de diversification, souvent orphelines de recherche, en vue de concevoir des systèmes de culture agroécologiques.

³ Picardie Innovations Végétales Enseignement Recherche et Technologie

⁴ Programme GENESYS : <https://www.institut-pivert.com/programme-genesys/>

Encadré 1 : Définition et caractéristiques du bassin d’approvisionnement de la bioraffinerie oléagineuse

Dans le cadre du projet de bioraffinerie, une estimation de l’approvisionnement local en biomasse et de la demande potentielle en produits bio-sourcés du bassin de distribution (Ile de France et Hauts de France), a conduit à définir un bassin d’approvisionnement potentiel couvrant un rayon de 50 km autour de Venette – lieu d’implantation de la SAS PIVERT et de la potentielle future bioraffinerie (Valter, comm. pers.). Le bassin d’approvisionnement se situe majoritairement sur le département de l’Oise et plus marginalement sur les départements de l’Aisne (à l’Est) et de la Somme (au Nord), et couvre plus de 500 000 hectares de parcelles agricoles, dans une diversité de milieux (Figure 3). Les systèmes de culture conventionnels présents dans cette zone incluent une diversité de cultures : des céréales, des légumes de plein champ (pomme de terre, carotte, haricot), de la betterave sucrière, des cultures oléagineuses ou des légumineuses (Agreste Haut de France, 2016). Cependant, les cultures oléagineuses restent minoritaires (13,1 % de la surface agricole utile de l’Oise en 2017) et sont principalement représentées par le colza (Agreste Hauts-de-France, 2019). Pour faire face à la demande prévisionnelle en biomasse de la bioraffinerie (100 000 tonnes de matière fraîche) et pour fournir une diversité de molécules d’intérêt, le besoin en « nouvelles » cultures oléagineuses sur le territoire a été identifié.



Figure 3. Localisation du site de Venette et du bassin d’approvisionnement sur la carte des Petites Régions Naturelles (PRN) de l’ex-région Picardie. Les PRN représentent des unités singulières dans le territoire et sont caractérisées par une diversité de conditions pédoclimatiques et des contraintes agronomiques (source : Gourdet et Godard, 2017)

Encadré 2 : Choix de la cameline comme culture d'étude

Le choix de la cameline comme culture d'étude est issu d'un screening d'espèces oléagineuses, réalisé au démarrage de la thèse (Figure 4). Un panel de 20 cultures oléagineuses*, possédant un potentiel pour la bioraffinerie, a d'abord été déterminé à partir d'une analyse de la littérature scientifique (dans le Web of Science avec les mots clés *oilseed crops* ou *new oilseed crop*) et d'un recensement des projets de recherche européens sur la bioraffinerie (Muuse et al., 1992; Wittkop et al., 2009; Aresta et al., 2012; Christou et al., 2012; Cermak et al., 2013; Vollmann et Laimer, 2013; European Commission, 2014; European Commission, 2015). Cette première étape nous a permis d'identifier la diversité des cultures candidates et, en parallèle, de recueillir des connaissances sur ces cultures. Puis, afin de considérer le cadre de contraintes lié au territoire et au contexte de bioraffinerie, nous avons défini trois critères de choix pour réduire notre panel initial : (1) la possibilité de cultiver la culture dans le territoire d'étude, (2) l'absence de la culture dans les systèmes de culture actuels, dans une optique de diversification des sources d'approvisionnement et des systèmes de culture, et enfin (3) la possibilité d'un travail mécanisé, pour produire la culture à l'échelle d'une parcelle agricole en grandes cultures. À partir de ces trois critères, un panel de cinq cultures a été défini. Parmi ces cinq cultures candidates, la cameline a été choisie car elle avait déjà été étudiée dans des projets antérieurs du programme de recherche GENESYS et qu'elle était déjà cultivée en Agriculture Biologique sur le territoire.

* Arachide (*Arachis hypogaea*), Cameline (*Camelina sativa*), Cardon (*Cynara cardunculus*), Carthame (*Carthamus tinctorius*), Colza (*Brassica napus*), Cotonnier (*Gossypium*), Crambe d'abyssinie (*Crambe abyssinica*), Cuphea (*Cuphea viscosissima x lanceolata*), Épurge (*Euphorbia lathyris*), Jatropha (*Jatropha curcas*), Lesquerella (*Lesquerella fendleri*), Lin oléagineux (*Linum usitatissimum*), Lunaire (*Lunaria rediviva*), Moutarde brune (*Brassica juncea*), Moutarde d'Ethiopie (*Brassica carinata*), Ricin (*Ricinus*), Soja (*Glycine max*), Souci (*Calendula officinalis*), Tabouret des champs (*Thlaspi arvense*), Tournesol (*Helianthus annuus*).

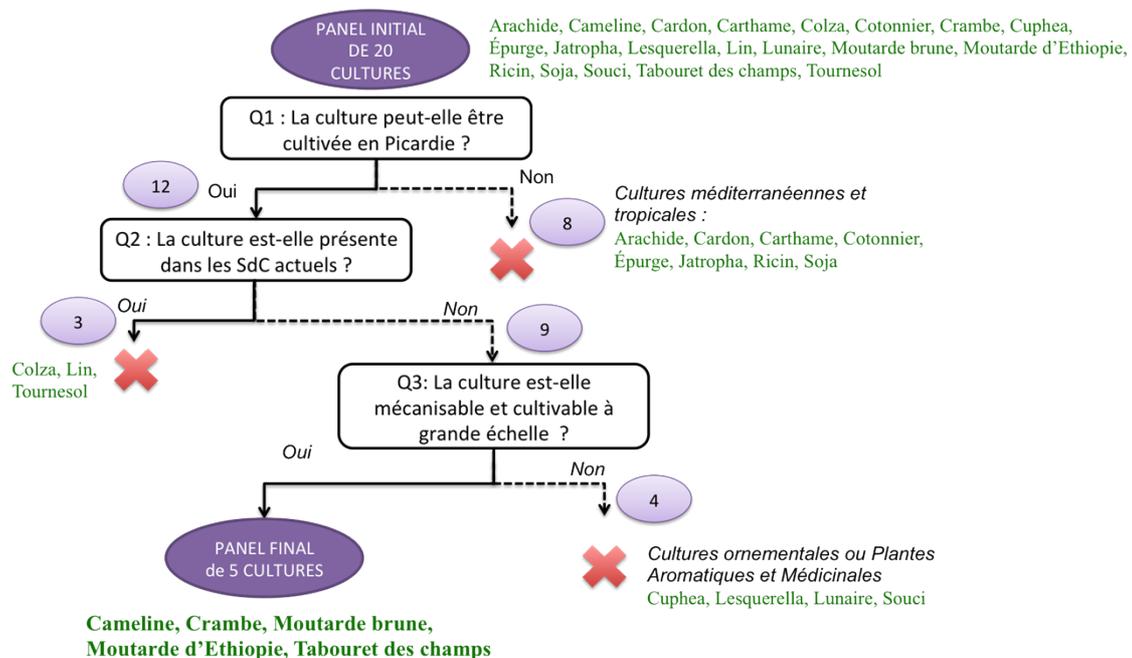


Figure 4. La cameline, une des cinq cultures oléagineuses candidates pour diversifier l'approvisionnement de la bioraffinerie.

État de l'art et problématique

1. Introduire une nouvelle espèce suppose de reconcevoir le système de culture, dans le cadre de l'agroécologie

Introduire une nouvelle espèce dans les systèmes de culture d'un territoire suppose de définir à la fois la place de cette culture dans la succession de cultures, et l'itinéraire technique qui lui sera appliqué, en tenant compte de ses effets attendus sur le reste du système de culture. En effet, les états du milieu créés par cette nouvelle espèce et les techniques qui lui sont appliquées ont généralement des impacts sur le fonctionnement des autres cultures de la rotation, conduisant ainsi à modifier également leur conduite (Sebillotte, 1990). De même, pour améliorer le fonctionnement de la nouvelle culture, il peut être intéressant de modifier la conduite de la culture qui la précède. Par exemple, l'introduction d'une légumineuse dans une rotation, du fait de sa capacité à fixer l'azote atmosphérique et à le restituer après récolte *via* la décomposition des résidus, conduit à modifier la gestion de la fertilisation azotée minérale de la culture suivante (Carrouée et al., 2012), et plus globalement à repenser la gestion de l'azote à l'échelle de la rotation. **L'introduction d'une nouvelle espèce suppose donc de reconcevoir le système de culture dans son ensemble.** Aujourd'hui, cette reconception s'inscrit nécessairement dans un projet plus large de transformation en profondeur des systèmes de culture pour répondre aux enjeux auxquels doit faire face l'agriculture, comme nous l'avons vu en introduction. Selon Simon (1969), la conception est un processus actif et intentionnel, visant à créer quelque chose qui n'existe pas (« *Design is concerned with how things ought to be, with devising artifacts to attain goals* »), en opposition à la production de connaissances, qui vise à comprendre quelque chose qui existe (« *the natural sciences are concerned with how things are* »). Une caractéristique de la conception est d'intégrer à la fois une activité d'invention mais également de réalisation, comme le décrivent Nelson et Stolterman (2003) : « *Proposer une idée et lui donner forme, structure et fonction est au cœur de la conception en tant qu'activité humaine* ». Pour permettre cette transformation profonde et en rupture des systèmes de culture, Meynard et al. (2012) proposent de mobiliser une démarche de conception innovante (Le Masson et al., 2006), basée sur une exploration de nouveaux « possibles », plutôt qu'une démarche de conception réglée, plus fréquente, dont

l'objectif est d'améliorer de manière graduelle des produits ou des techniques déjà existants vers un objet dont les caractéristiques sont définies au préalable.

1.1. Quelles méthodes pour re-concevoir les systèmes de culture ?

Depuis les années 1980, une dynamique de recherche autour de la conception de systèmes de culture, et plus généralement de systèmes de production, est à l'œuvre et différentes démarches de conception ont été décrites dans la littérature (Reidsma et Jeuffroy, 2017). Parmi cette diversité d'approches, Le Gal et al. (2011) proposent de distinguer (i) les méthodes pour concevoir (ou « *design oriented methods* »), dans lesquelles les chercheurs conçoivent, par eux-mêmes, des systèmes de culture innovants, et (ii) les méthodes pour accompagner la conception (ou « *design support oriented methods* »), dont l'objectif est d'accompagner les agriculteurs dans leur processus de changement vers un nouveau système, ou d'outiller les conseillers agricoles pour accompagner cette transition. Puis, au sein de chacune de ces deux catégories, les auteurs différencient les approches basées sur l'utilisation de modèles (respectivement « *design modelling* » et « *support modelling* » pour les deux catégories), de celles qui ne mobilisent pas de modèles (respectivement « *prototyping* » et « *participation* »). Meynard et al. (2012) proposent une grille de lecture différente de cette littérature et classent ces approches en deux grandes catégories : (i) la conception pas-à-pas, qui consiste en une transformation progressive, année après année, d'un système de culture en place, tout en visant des objectifs radicalement nouveaux, et aboutissant à des systèmes de culture en rupture par rapport celui de départ, et (ii) la conception *de novo*, qui a pour caractéristique d'inventer, sur la base d'une exploration très large, des systèmes de culture en rupture, en visant à décrire les caractéristiques qu'ils auront dans leurs états finaux, mais sans se préoccuper des trajectoires de transformation.

1.1.1. La conception pas-à-pas

Comme mentionné précédemment, la conception pas-à-pas consiste en une évolution progressive d'un système existant, mis en place dans une expérimentation ou chez un agriculteur (Meynard et al., 2019) : à partir d'une première formulation, souvent imprécise, de nouveaux objectifs, le système de culture initial est graduellement modifié en s'appuyant sur des boucles d'apprentissage (Meynard et Dourmad, 2014; Meynard et

al., 2019). La base de ces boucles est la réalisation d'un diagnostic, visant à identifier les éléments du système de culture à améliorer pour se rapprocher des objectifs visés, qui se précisent au fur et à mesure du processus (Meynard et al., 2001; 2019). Ainsi, un diagnostic agronomique régional permet d'identifier et de hiérarchiser les principaux facteurs limitant les performances (quantitatives, qualitatives ou environnementales) et de comprendre l'impact des pratiques sur ces facteurs (Doré et al., 1997, 2008; Loyce et Wery, 2006). Une fois les pratiques à l'origine des états non attendus du milieu ou du peuplement identifiées, la poursuite du processus de conception vise à les modifier. Suite à cette phase de diagnostic ou suite à l'identification de nouveaux objectifs plus ambitieux, l'exploration et la construction de solutions et leur mise en œuvre au champ, sont suivies d'un nouveau diagnostic : c'est donc une boucle d'amélioration continue qui se met en place. Par exemple, dans le cadre de l'introduction d'une nouvelle légumineuse en Ouganda, Ronner et al. (2019) montrent que la réalisation de trois cycles d'apprentissage (basée sur la méthodologie DEED⁵ proposée par Giller et al. (2011)), alternant essais de démonstration en fermes, évaluation et re-conception par les agriculteurs, a permis d'améliorer et d'adapter, année après année, la gamme de pratiques initialement proposées par les chercheurs.

Si cette approche pas-à-pas conduit à une exploration « prudente » - et peut-être moins large que dans la conception *de novo* - de solutions innovantes, elle permet cependant leur adaptation aux contraintes spécifiques de chaque situation. Par exemple, dans le cas du développement de la production intégrée dans huit fermes pilotes dans le Nord de la France (Mischler et al., 2008, 2009), les solutions proposées et testées pour maîtriser les adventices en réduisant l'usage d'herbicides, ont concerné l'introduction de cultures de diversification dans certaines fermes, ou l'utilisation d'une houe rotative pour désherber le blé d'hiver dans d'autres, illustrant ainsi la conception progressive de systèmes de culture spécifiques à chaque agriculteur et adaptés à ses contraintes.

1.1.2. La conception de novo

Contrairement à l'approche « pas-à-pas », la conception *de novo* ne prend pas en compte la question de la transition progressive du système, et s'autorise à explorer des cibles ambitieuses : l'objectif est de favoriser l'invention et la créativité en

⁵ Describe – Explain – Explore - Design

s'affranchissant des contraintes de mise en œuvre (Meynard et al., 2012; Meynard et Dourmad, 2014). L'exploration peut se faire soit grâce à des modèles, et l'on parle alors de conception assistée par modèle, soit lors d'ateliers de prototypage participatif, et l'on parle alors de conception à dire d'experts.

1.1.2.1. La conception assistée par modèle

En permettant de simuler les effets combinés du climat, du type de sol, des caractéristiques de la plante et des pratiques culturales sur le fonctionnement d'une parcelle cultivée, les modèles constituent de bons outils pour explorer une diversité de scénarios très contrastés (Rossing et al., 1997; Meynard et al., 2001; Jeuffroy et al., 2008). Par exemple, dans le cadre de la conception de systèmes de culture bananiers incluant des jachères, le modèle SIMBA a été élaboré puis utilisé pour générer plus de 4000 combinaisons de règles de décision, chacune correspondant à un système de culture potentiel, caractérisé par des performances économiques et environnementales différentes (Tixier et al., 2008). En raison de cette très forte capacité exploratoire, de nombreux travaux portant sur la conception de systèmes de culture, et plus généralement de systèmes de production, se sont appuyés sur la modélisation (Martin et al., 2013). À partir d'exemples de conception assistée par modèle conduits en France, une démarche itérative en quatre étapes (GSEC pour Génération, Simulation, Évaluation, Comparaison et Choix) a même été proposée pour formaliser l'usage de modèles pour la conception (Bergez et al., 2010).

Si la modélisation peut être un bon moyen pour concevoir des systèmes de culture très en rupture avec l'existant, grâce à une large exploration de combinaisons de techniques, le perfectionnement des modèles a rendu leur paramétrage complexe, long et coûteux, rendant difficile la prise en compte des situations singulières de conception. Leur capacité à accompagner la conception de systèmes de culture agroécologiques, qui nécessite une adaptation locale des pratiques et des innovations, est alors interrogée (Jeuffroy et Meynard, 2019). De plus, la plupart des modèles ne rendent pas compte de certaines composantes de l'agroécosystème (ex : champignons pathogènes, insectes ravageurs) ou de certaines techniques (ex : les différentes techniques de travail du sol), limitant ainsi leur capacité à proposer des solutions adaptées au cadre de l'agroécologie.

1.1.2.2. *La conception à dire d'experts ou prototypage*

Cette approche repose sur le constat que les experts (conseillers ou agriculteurs) possèdent des connaissances situées et des « savoir-faire » qui, mixés avec des connaissances scientifiques, permettent d'élaborer des systèmes de culture innovants et adaptés localement (Lançon et al., 2008). Initialement, la méthode de prototypage a été formalisée par Vereijken (1997) dans le cadre de la mise au point de systèmes de production intégrés et écologiques en Europe. Elle a ensuite été adaptée pour la conception d'itinéraires techniques à bas niveau d'intrants pour le coton en Afrique de l'Ouest (Lançon et al., 2007). Dans les deux cas, la démarche se décompose en différentes étapes : (i) la définition d'un cahier des charges permettant notamment la définition de critères d'évaluation, (ii) la conception de prototypes de systèmes de culture répondant à ce cahier des charges, et (iii) l'évaluation multicritères *a priori* des prototypes. À l'issue de ces trois étapes – avec potentiellement plusieurs cycles itératifs de conception/évaluation de prototypes –, des systèmes de culture prometteurs sont identifiés, en vue de leur expérimentation au champ, soit en fermes pilotes, soit en parcelles agricoles, avant une dernière étape de diffusion. En France, cette méthode a par exemple été utilisée pour mettre en place un réseau d'expérimentations « systèmes » dans le cadre du RMT « systèmes de culture innovants » (Reau et Landé, 2006; Petit et al., 2012) pour concevoir des systèmes de culture innovants en maraîchage (Navarrete et al., 2010) ou en systèmes bananiers (Blazy et al., 2009). Pour réaliser ce prototypage, les ateliers de conception offrent des conditions favorables à une conception *de novo* en stimulant une réflexion collective organisée autour d'une cible lointaine et ambitieuse (Reau et al., 2012, 2015), comme cela a été illustré sur des travaux conduits autour de l'introduction de cultures énergétiques en Bourgogne (Lesur-Dumoulin et al., 2018).

Si cette démarche de conception à dire d'experts est utile, en particulier quand la diversité des pratiques mises en œuvre par les agriculteurs ne peut être modélisée (Loyce et Wery, 2006), elle peut néanmoins être questionnée au regard de l'objectif d'introduire, dans les systèmes de culture, une espèce mineure, souvent peu étudiée et peu connue, étant donné le manque d'experts de l'espèce mineure concernée.

1.1.3. Des dispositifs hybrides combinant « pas-à-pas » et *de novo*

Dans certaines situations, les approches « pas-à-pas » et *de novo* peuvent être combinées. Par exemple, dans le cas d'expérimentations « systèmes », la conception combine souvent deux approches : tout d'abord, une phase de conception *de novo*, au cours de laquelle plusieurs systèmes de culture sont conçus pour répondre aux objectifs ambitieux définis (Colnenne-David et Doré, 2015), puis une phase de conception pas-à-pas, *via* la mise en œuvre et l'amélioration progressive des prototypes (Coquil et al., 2009; Debaeke et al., 2009). Cette combinaison entre conception pas-à-pas et conception *de novo* peut également se rencontrer dans des projets avec des agriculteurs, comme l'illustre la démarche décrite par Prost et al. (2018) dans le cadre d'une aire d'alimentation de captage en France : après la conception collective, au cours d'ateliers de conception, de solutions techniques visant à limiter les pertes d'azote nitrique dans les eaux souterraines (phase de conception *de novo*), la mise en œuvre de ces solutions entre 2013 et 2017 a permis un ajustement année après année des systèmes de culture mis en place par les agriculteurs de la zone d'étude. Il semble cependant que, pour rendre compte dans la littérature de ces alternances *de novo*/pas-à-pas, il soit nécessaire d'avoir des projets de recherche inscrits dans le temps long, comme c'est le cas avec les expérimentations « systèmes » conduites en stations expérimentales.

De cette partie sur les méthodes de conception de systèmes de culture, nous retiendrons donc que :

- Les approches pas-à-pas et *de novo* offrent des caractéristiques complémentaires pour la conception. La conception *de novo* permet une large exploration de situations très innovantes, au risque de se détacher d'une certaine réalité. À l'inverse, la conception pas-à-pas permet une adaptation aux contraintes spécifiques de chaque situation, en s'appuyant sur une transformation progressive d'un système réel et favorise les apprentissages, au risque d'un certain « conservatisme ».
 - Dans une perspective de concevoir des systèmes agroécologiques innovants mais adaptés à la singularité des situations agricoles, l'idée d'aller vers des dispositifs « hybrides », combinant conception pas-à-pas et *de novo* apparaît bénéfique et nécessiterait d'être davantage formalisée.
-

1.2. Quelle place des acteurs dans les processus de conception ?

1.2.1. De l'agronome-concepteur à l'agriculteur-concepteur : changement de posture de l'agronome dans le processus de conception

Comme le rappellent Le Gal et al. (2011), dans un grand nombre d'approches de conception, l'agronome conçoit lui-même les systèmes de culture, avec pas ou peu d'interactions avec les agriculteurs. Dans le cas de la conception assistée par modèle (« *Design modelling* »), ces auteurs affirment par exemple : « *models may help researchers to better fit their recommendations to management issues addressed by farmers or advisors. However, researchers are designing these tools for their own use with little to no input from farmers or advisor* ». Cette approche descendante et diffusionniste dans l'organisation de la conception, où l'agronome conçoit et l'agriculteur applique, a largement été remise en question depuis les années 1990, et a conduit tout d'abord à l'émergence d'approches participatives, dans lesquelles le chercheur implique l'utilisateur dans la conception pour prendre en compte les usages et pour bénéficier de son expertise locale (Béguin, 2003; Cerf et al., 2012; Barcellini et al., 2015; Berthet et al., 2016; Moraine et al., 2017) puis à l'émergence, dans les années 2000, d'un nouveau régime de conception où l'agriculteur est lui-même concepteur et où les chercheurs développent des méthodes et des outils pour soutenir et stimuler le processus de conception (Salembier et al., 2018).

La coexistence de ces différentes approches se traduit par une diversité de façon d'impliquer les différents acteurs dans la conception. Pretty (1995) définit sept formes de participation des acteurs dans la conception de projet de développement, depuis une « *passive participation* », où les acteurs sont uniquement informés des sorties du projet, à une « *self-mobilization* », où les acteurs sont porteurs des initiatives et les testent en autonomie, en passant par des participations consultatives (i.e. les acteurs répondent à des questions mais ne sont pas impliqués dans les prises de décision) ou interactives (i.e. tous les acteurs contribuent au projet de façon conjointe). De même, Lacombe et al. (2018), en s'intéressant spécifiquement à la conception participative de systèmes de culture avec des agriculteurs, ont montré que les approches décrites dans la littérature se distinguent en fonction du degré d'implication des agriculteurs. Par exemple, dans leur typologie, ces auteurs caractérisent, le « *de novo design* » par une participation plutôt consultative des agriculteurs (« *The farmers are invited to evaluate the result of*

design [...], their expertise can be sought at different stages») et la « *co-innovation* » par une participation interactive (« *The design is implemented by the researchers but their proposals are discussed with the farmers. Both farmers and researchers are co-designers* »). Comme cela est suggéré dans cette revue, la différence d'implication des acteurs (ici les agriculteurs) dans le processus de conception conduit également à un changement de posture de l'agronome. L'agronome passe du statut de concepteur dans les approches prescriptives, au statut de co-concepteur quand il participe à l'activité de conception avec d'autres acteurs (ex : ateliers de conception, Reau et al. (2012)) ou de facilitateur/animateur, quand il accompagne les agriculteurs dans leur activité de conception (ex : jeu du Rami Fourrager® décrit par Martin et al. (2011)).

1.2.2. Diversité des acteurs impliqués dans les processus de conception

Pendant longtemps, l'objet privilégié de la conception a été la parcelle agricole : les objets conçus étaient des principes d'action, des règles d'action, des outils d'optimisation des techniques culturales, des itinéraires techniques, i.e. tout objet dont la mise en œuvre se réalise principalement dans une parcelle agricole. Dans ce cadre, les acteurs impliqués dans les processus de recherche participative étaient principalement les agriculteurs et les conseillers, acteurs directement concernés par les activités agricoles. Or, pour traiter de certains enjeux environnementaux ou de la gestion collective de biens communs, comme la gestion de la biodiversité, la réduction des risques de pollution des eaux ou le changement climatique, de nouvelles échelles, plus larges que la parcelle ou l'exploitation agricole, sont considérés depuis plus récemment (Jeuffroy et Meynard, 2019). Dès lors, de nouveaux acteurs (souvent non agricoles), sont légitimement impliqués dans les processus de conception (Chantre et al., 2016; Sautier et al., 2017; Berthet et Hickey, 2018; Prost et al., 2018). Par exemple, dans le Poitou, le projet de développement de la luzerne, pour répondre à la fois à des objectifs de production (développer une filière à l'échelle départementale) et écologique (favoriser la conservation de l'outarde canepetière *Tetrax tetrax*), a conduit à la réalisation d'un atelier regroupant des agriculteurs, des techniciens agricoles, des membres d'une coopérative, des représentants des collectivités locales et d'organismes de développement agricole et des chercheurs en agronomie, écologie et sciences sociales (Berthet et al., 2014). Dans cet exemple, l'implication d'une diversité d'acteurs dans l'activité de conception a notamment permis (i) d'identifier une situation de blocage liée

à des perceptions différentes de l'objet (la luzerne) par les différentes parties prenantes et (ii) de proposer, en réponse à ce constat, une forme d'animation collective qui a conduit des acteurs aux intérêts divergents à concevoir ensemble des solutions de gestion souhaitables pour tous. De même, Bos et al. (2009) proposent la mise en place d'une approche interactive et multi-acteurs (méthode RIO) pour permettre une co-évolution des systèmes de production laitiers et de consommation. Selon les auteurs, cette approche impliquant la diversité des acteurs concernés par la filière permettrait de répondre aux enjeux multiples auxquels fait face la production laitière, qui conduisent parfois à la proposition de solutions sectorielles contradictoires.

L'implication d'une diversité d'acteurs dans le processus de conception est également utile, dans une perspective territoriale, pour définir collectivement les indicateurs pertinents pour évaluer les systèmes de culture conçus. Par exemple, Le Bellec et al. (2012) montrent que la réalisation d'un atelier regroupant des acteurs « professionnels » (i.e. issus du milieu agricole comme les agriculteurs, les conseillers, les agronomes) et des acteurs « non-professionnels » (« *public stakeholders* », i.e. non impliqués directement dans des activités agricoles, comme des représentants des collectivités locales, des ONG ou des spécialistes de l'alimentation) a permis de faire émerger des indicateurs en lien avec la qualité de la production (ration acidité/sucre dans le citron, niveau de fraîcheur) qui n'avaient pas été initialement mentionnés lors d'un atelier regroupant uniquement les acteurs professionnels, et qui sont apparus déterminants dans la re-conception des pratiques appliquées aux vergers d'agrumes, car garantissant une valorisation économique satisfaisante.

Dans le cas de l'introduction d'une espèce mineure dans un territoire, pour lesquelles la ou les filières de transformation ne sont souvent pas encore mises en place, l'implication de transformateurs potentiels dans la conception des systèmes de culture et dans la définition des indicateurs d'évaluation de la production semblent être une piste prometteuse pour favoriser la mise en œuvre d'innovations couplées (Meynard et al., 2017) et le développement de filières innovantes et durables, comme cela a été étudié pour le cas de la filière chanvre (Le Masson et al., 2012), ou pour la réintroduction de légumineuses dans un territoire (Soulié et al., 2019).

Dans cette partie sur la place des acteurs dans le processus de conception nous retiendrons que :

- La remise en question des approches diffusionnistes (où l'agronome conçoit et l'agriculteur applique), qui ont été historiquement très présentes dans la conception en agronomie, a conduit au développement d'approches participatives (où l'agronome concepteur implique les utilisateurs de ce qui est conçu dans le processus), puis au développement d'un régime de conception où l'agriculteur, ou un collectif d'acteurs divers, devient le concepteur, et l'agronome accompagne et facilite cette activité de conception. La coexistence de ces différentes approches se traduit par une diversité de postures de l'agronome dans les processus de conception.
 - Pour répondre aux enjeux auxquels l'agriculture doit faire face (notamment environnementaux), il apparaît souhaitable d'impliquer une diversité d'acteurs (dont les activités ne sont pas directement liées à la production agricole) dans les processus de conception. La question de la diversification des cultures, à l'échelle d'un bassin d'approvisionnement, interroge l'implication d'une nouvelle catégorie d'acteurs, souvent peu présente jusqu'à présent dans les approches de conception multi-acteurs : les transformateurs.
-

2. Produire des connaissances pour concevoir des systèmes agroécologiques

Un lien étroit entre le processus d'exploration de nouveaux concepts et la mobilisation/production de connaissances caractérise les raisonnements de conception, qui ont été formalisés et modélisés dans le cadre de la théorie C-K (*Concept-Knowledge*), développée par des chercheurs en sciences de la conception (Hatchuel et Weil, 2003, 2009). Dans cette théorie, le processus de conception se définit comme une expansion conjointe d'un espace des concepts (ou idées) et d'un espace des connaissances (Encadré 3). En d'autres termes, l'exploration de nouvelles idées repose sur la mobilisation de connaissances, et engendre également l'identification de nouvelles connaissances à produire, pour permettre la poursuite du processus. **La conception de systèmes agroécologiques ne questionne donc pas uniquement les méthodes de conception mais également la production, la capitalisation et le partage de connaissances, nécessaires pour concevoir de tels systèmes** (Doré et al., 2011; Girard, 2014; Compagnone et al., 2018).

2.1. Quelles connaissances pour concevoir des systèmes agroécologiques ?

Comme nous l'avons mentionné en introduction, l'agroécologie suppose de baser le fonctionnement des agroécosystèmes non plus sur l'usage d'intrants de synthèse, mais sur le fonctionnement naturel des écosystèmes. Ainsi, les systèmes agroécologiques se caractérisent par une dépendance de leur fonctionnement et de leurs performances aux régulations biologiques en jeu dans l'agroécosystème (Médiène et al., 2011). La transition agroécologique suppose donc de mobiliser de nouveaux objets peu travaillés auparavant en agronomie (comme les auxiliaires des cultures) et de nouveaux processus biologiques également peu étudiés (par exemple, les dynamiques spatiales de diffusion des insectes et auxiliaires, ou les effets allélopathiques de certaines espèces)(Prost et al., 2016).

En permettant de (i) mieux comprendre ces processus biologiques et les potentiels services (ou dis-services) écosystémiques associés et (ii) d'étudier les interactions entre des pratiques agroécologiques et ces processus, la production de connaissances scientifiques est donc nécessaire pour accompagner la transition

Encadré 3 : La théorie C-K, quelques éléments explicatifs

La théorie C-K (Hatchuel et Weil, 2003, 2009) a été développée pour modéliser les raisonnements de conception. Elle est basée sur l'existence de relations étroites entre deux espaces caractérisés par une expansion conjointe : un espace des concepts (C) et un espace des connaissances (K). L'espace C traite d'objets inconnus et désirables mais dont l'existence est indécidable (i.e. pour lesquels on ne peut pas dire s'ils peuvent exister ou pas). En parallèle, dans l'espace des connaissances, l'ensemble des propositions ont un statut logique c'est-à-dire que l'on peut déterminer si elles sont vraies ou fausses. Dans la théorie C-K, le processus de conception est modélisé par une expansion conjointe de l'espace C et de l'espace K (Figure 5). L'exploration commence par la définition d'un concept initial C_0 , indécidable, désirable et ambitieux, souvent défini par un oxymore, à partir d'une base de connaissances initiale K_0 (en vert). La mobilisation et la production de nouvelles connaissances (en orange) vont ensuite permettre de partitionner le concept initial en plusieurs attributs (branches de l'arbre). Réciproquement, cette exploration du concept initial va également stimuler la production et la mobilisation de nouvelles connaissances (en jaune), jusqu'au moment où un concept va devenir décidable dans la base de connaissances développée, ce qui clôt cette voie particulière d'exploration (il y a conjonction de l'objet de C dans K). Cette théorie a notamment été utilisée pour développer des méthodes de conception innovante collective dont les ateliers KCP qui ont principalement été mobilisés dans le monde de l'industrie (Le Masson et al., 2009; Hooge et al., 2012; Agogué and Kazakçi, 2014; Potier et al., 2015). Cependant, cette théorie a également été mobilisée en agriculture, par exemple, pour la conception d'agroécosystèmes à base de luzerne (Berthet et al., 2014), d'une méthode de fertilisation azotée (Ravier et al., 2017), ou pour l'analyse de la conception de machines agricoles adaptées à l'agroécologie (Salembier, 2019). Plus généralement, cette théorie est un cadre théorique intéressant pour analyser et conduire des processus de conception en agriculture (Prost et al., 2016; Salembier et al., 2018; Salembier, 2019).

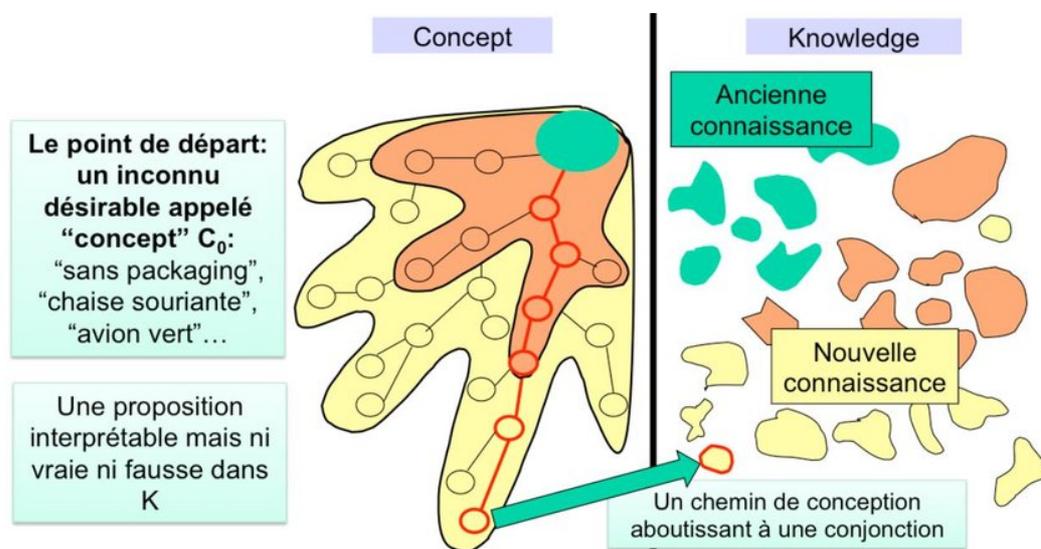


Figure 5. Schéma de synthèse de la théorie C-K (d'après Le Masson and McMahon (2016))

agroécologique (Caron et al., 2014). Par exemple, Doré et al. (2011) mettent en avant qu'une meilleure compréhension des relations symbiotiques entre des bactéries et des céréales, similaires à celles entre *Rhizobium* sp. et les légumineuses pour la fixation de l'azote atmosphérique, pourrait avoir un intérêt pour concevoir des systèmes de culture moins dépendants des intrants de synthèse (voir par exemple Reis et al. (2000) cité dans Doré et al. (2001)). Cependant, compte tenu de la sensibilité de ces processus aux conditions locales, et des connaissances scientifiques encore restreintes sur les régulations biologiques, la conception de systèmes agroécologiques doit également s'appuyer sur des connaissances situées, issues de l'expérience des agriculteurs (Compagnone et al., 2018). En effet, par l'observation de leurs agroécosystèmes, de ceux d'autres agriculteurs et des écosystèmes naturels (Doré et al., 2011; Malézieux, 2012), et par la réalisation de leurs propres expérimentations (Catalogna et al., 2018), les agriculteurs se construisent un bagage de connaissances empiriques (notamment sur les processus biologiques observés) qui nourrit leur activité de conception au sein de leur exploitation (Catalogna, 2018). Toffolini et al. (2017) ont montré que les agriculteurs mobilisent également, au cours de cette activité de reconception, des connaissances « fondamentales » (définies par les auteurs comme des connaissances scientifiques qui décrivent un processus biologique ou physiologique) notamment dans la mesure où ils peuvent les relier à ce qu'ils veulent réaliser (ou ont réalisé) au champ : « *les agriculteurs peuvent utiliser des connaissances fondamentales quand cela leur permet d'anticiper les effets d'une nouvelle action qu'ils n'ont jamais réalisée* » ou encore « *les connaissances fondamentales peuvent être utilisées pour réinterpréter des effets d'une action précédemment observés* ».

Pour pouvoir bénéficier de ces expériences et connaissances locales, et les transposer à d'autres agriculteurs ou à d'autres situations, et donc plus généralement pour accompagner la transition agroécologique, de nombreux auteurs (voir notamment Girard et Navarrete, 2005; Faugère et al., 2010; Toffolini et al., 2017) mettent en avant l'intérêt de rapprocher ces connaissances expertes de connaissances scientifiques par une hybridation « *soit pour élaborer des preuves, soit pour préparer l'extrapolation, en mettant en circulation des connaissances plus génériques* » (Salembier, 2019). Par exemple Girard et Navarrete (2005) affirment, en s'appuyant sur le cas de la culture de safran et de truffe : « *il peut donc être utile d'identifier, parmi ces connaissances*

heuristiques⁶, lesquelles sont fondées d'un point de vue scientifique et peuvent donc servir de référence technique collective » et donnent alors l'exemple, dans le cas du safran, de l'élaboration de la relation entre le nombre de fleurs et le calibre du bulbe en se basant sur des observations faites par des agriculteurs (« plus le bulbe est gros, plus il risque de faire plusieurs fleurs »). De même, Toffolini et al. (2017) concluent, à partir d'une analyse croisée de cinq cas d'étude, que l'apport de connaissances scientifiques permet une interprétation des expériences individuelles d'agriculteurs pour les rendre utiles à d'autres. Les auteurs illustrent alors à partir d'un cas d'étude : « when one of them related each practice and result to the dynamics of thistle's reserves [confrontation d'une expérience individuelle à une connaissance fondamentale], they found consistency in these results and deduced the possible management techniques to be applied to the situation discussed [transposition à une autre situation que la situation initiale] ».

De manière plus générale, l'hybridation entre connaissances scientifiques et empiriques permet la production de nouvelles connaissances agronomiques (Doré et al., 2011; Girard et Navarrete, 2005) qui peuvent porter par exemple sur la régulation des ravageurs par des prédateurs naturels (Barzman et al., 1996), sur le fonctionnement des sols (Barrios et al., 2006; Steiner, 1998) ou sur la définition d'indicateurs permettant le pilotage agroécologique des systèmes de culture (Navarrete et al., 1997). En permettant spécifiquement d'accompagner la conception et la mise en œuvre de systèmes de culture par différents acteurs, ces connaissances sont qualifiées d'actionnables (Faugère et al., 2010), c'est-à-dire qu'elles permettent de renforcer les acteurs dans la conduite de leur activité (Avenier et Schmitt, 2007). Par exemple, dans le cas de la tomate sous serre (Navarrete et al., 1997), la traduction d'indicateurs d'évaluation ou de pilotage utilisés par des producteurs expérimentés (ex : « la vigueur de la plante ») en des paramètres agronomiques reproductibles, et facilement mesurables (ex : le diamètre de la tige) a été un moyen d'outiller des agriculteurs non initiés et de les accompagner dans l'adaptation

⁶ Ici les auteures définissent les connaissances heuristiques comme des connaissances qui aident les agriculteurs à « rechercher des solutions pour agir, à partir de la récurrence d'expériences similaires et de leur représentation personnelle des processus biologiques » et s'apparentent bien aux connaissances empiriques, issues de l'expérience, décrites dans le paragraphe précédent.

de leurs pratiques de gestion des conditions climatiques de leur serre *via* un outil d'aide à la décision (Tchamitchian et al., 2006).

En conclusion de cette partie, nous retiendrons donc que :

- L'agroécologie suppose la production de connaissances sur des nouveaux objets et sur des nouveaux processus, peu étudiés jusqu'ici. Pour répondre à cet enjeu de production de connaissances actionnables, dans le cadre de l'agroécologie, la mobilisation conjointe de connaissances scientifiques et empiriques apparaît indispensable.
 - L'hybridation de ces deux formes de connaissances est un élément clef dans l'accompagnement de la transition agroécologique, en permettant (i) d'adapter localement des solutions génériques, (ii) de fonder scientifiquement des connaissances locales, issues de l'expérience des agriculteurs, les rendant ainsi utiles dans d'autres conditions, et (iii) de produire de nouvelles connaissances agronomiques actionnables.
-
-

2.2. Quelles méthodes pour produire, capitaliser et partager les connaissances ?

2.2.1. Les expérimentations agronomiques

L'expérimentation est une méthode historiquement utilisée pour produire des connaissances en agronomie, comme l'illustre cette phrase de Deffontaines (1991) : « *L'expérimentation a été longtemps considérée comme le seul moyen scientifique de produire des connaissances agronomiques, la seule origine valable d'innovations techniques* ». Plus particulièrement, Hoshmand (2018) affirme que « *les expérimentations agronomiques sont menées en réponse à des questions soulevées par des chercheurs qui s'intéressent soit à comparer les effets de plusieurs conditions sur certains phénomènes, soit à découvrir les effets inconnus d'un processus particulier* ». Une forme d'expérimentation très utilisée par les agronomes est l'expérimentation factorielle, dans laquelle il s'agit de comparer l'effet de choix techniques élémentaires ou d'une variation dans certains facteurs du milieu (ex : ombrage ou état structural du sol varié), toutes choses égales par ailleurs (Meynard et Sebillotte, 1989; Deytieux et al., 2012). Cette forme d'expérimentation s'est développée, au cours du 20^{ème} siècle, en lien étroit avec le développement d'approches statistiques, permettant d'affiner leur analyse (Petersen,

1994; Spiertz, 2014). D'une part, ces expérimentations permettent d'identifier des relations de cause à effet entre le(s) facteur(s) étudié(s) et la(les) variable(s) d'intérêt mesurée(s) et de produire des connaissances sur les processus. Ces résultats sont considérés comme génériques et souvent présentés sans références aux conditions pédoclimatiques, et indépendamment de la complexité du système concerné (Cardona et al., 2018). Ces connaissances sur les processus peuvent notamment être capitalisées dans des modèles de culture mécanistes (par exemple, STICS en France (Brisson et al., 2003) ou APSIM en Australie (Keating et al., 2003)), qui à leur tour peuvent permettre la production de connaissances, *via* la simulation de nouvelles combinaisons de pratiques ou de facteurs environnementaux non expérimentées (Houlès et al., 2004; Katerji et al., 2010). D'autre part, les expérimentations factorielles sont également très utilisées pour produire des références techniques, en comparant différentes techniques ou combinaisons de techniques et en identifiant la modalité « optimale » à recommander aux agriculteurs (en se basant par exemple sur des courbes de réponse du rendement aux apports d'engrais azoté, (Meynard et al., 1981)).

De façon complémentaire à ces expérimentations factorielles, et en lien avec le développement des approches systémiques, une autre forme d'expérimentation s'est développée plus récemment : les expérimentations « systèmes », dont l'objectif est d'évaluer des combinaisons logiques de techniques, et plus globalement un itinéraire technique, voire même l'ensemble d'un système de culture, par rapport à des objectifs fixés (Meynard, 1985; Reau et al., 1996; Drinkwater, 2002; Deytieux et al., 2012). Outre cet objectif d'évaluation et de conception pas-à-pas (Debaeke et al., 2009), les expérimentations « systèmes » ont également vocation à produire des ressources utiles aux actions de développement agricole, à la formation et aux travaux de recherche (Deytieux et al., 2012; Petit et al., 2012a, 2012b). Les connaissances produites dans ces dispositifs expérimentaux portent donc à la fois sur les systèmes (ou les combinaisons de techniques) évalués et leurs performances mais également sur des règles de décision potentiellement utilisables dans d'autres systèmes de culture ou sur les processus sous-jacents au fonctionnement de l'agroécosystème (Dejoux et al., 2003; Loyce et al., 2012; Lechenet et al., 2017). Enfin, les observations sur le système de culture expérimenté et le diagnostic agronomique permettant une analyse des décisions mises en œuvre et leur constante adaptation au cours du temps (Coquil et al., 2009; Debaeke et al., 2009)

conduisent également à des apprentissages pour les expérimentateurs et donc, dès lors qu'ils peuvent être formalisés, à la production de connaissances expertes valorisables pour la conception de nouveaux systèmes.

Au-delà de l'aspect factoriel ou systémique, la distinction entre les expérimentations réalisées en stations expérimentales et celles réalisées en parcelles agricoles (ou « *on-farm research* ») est également importante à mentionner lorsqu'on s'intéresse à la production de connaissances. En effet, historiquement, les stations expérimentales ont été créées dans une perspective diffusionniste (Meynard, 2016): l'agronome produit des connaissances scientifiques en milieu confiné et contrôlé, et celles-ci sont transférées par les organismes de conseil agricole aux agriculteurs. Malgré des évolutions récentes, elles reposent toujours aujourd'hui sur un régime de production de connaissances semi-confiné, i.e. limitant les interactions avec les acteurs (Cardona et al., 2018). À l'inverse, l'objectif des essais en parcelles agricoles est de confronter les hypothèses testées à une diversité d'environnements (ex : type de sol, climat) et de contextes socio-économiques, par la prise en compte de l'agriculteur et de ses contraintes (Meynard, 1985; Sumberg and Okali, 1988; Shennan et al., 1991; Drinkwater, 2002; Lawrence, 2017; Kyveryga et al., 2018). La mise en place de ces essais en parcelles agricoles dans un réseau multi-local et pluriannuel (Bouchard et al., 2008; Petit et Reau, 2013) conduit à préciser le domaine de validité des connaissances générés et favorise la production de connaissances adaptées localement. Ce type de dispositif semble donc mieux adapté aux enjeux de production de connaissances soulevés par la transition agroécologique.

2.2.2. Des méthodes spécifiques pour produire et capitaliser des connaissances expertes

Compte tenu de la nécessité de produire et de mobiliser des connaissances empiriques pour concevoir des systèmes agroécologiques (voir § 2.1), les agronomes se sont attachés à développer des méthodes spécifiques pour (i) rendre ces connaissances explicites et les formaliser, et (ii) accompagner leur production en favorisant les apprentissages, notamment des agriculteurs.

2.2.2.1. *L'élicitation probabiliste de connaissances expertes*

Comme le définissent Garthwaite et al. (2012), « *l'élicitation est un processus visant à formaliser la connaissance et les croyances d'une personne au sujet d'une ou plusieurs quantités incertaines sous la forme d'une distribution de probabilités* ». L'élicitation probabiliste permet donc de rendre compte des connaissances d'experts sur une variable quantitative d'intérêt en tenant compte de l'incertitude associée à cette valeur (O'Hagan et al., 2006). En pratique, l'élicitation consiste à demander à chaque expert enquêté de définir une distribution de probabilité pour l'indicateur considéré, parfois à l'aide d'un logiciel informatique (Morris et al., 2014). L'expert définit une valeur minimale et une valeur maximale pour l'indicateur, puis cet intervalle est découpé en sous-intervalles de même longueur et, pour chaque sous-intervalle, l'expert indique son estimation de la probabilité que la valeur de l'indicateur soit située dans ce sous-intervalle. Une loi de probabilité est ensuite ajustée sur cet histogramme. Dans le domaine de l'agriculture, cette méthode a notamment été utilisée pour obtenir des valeurs de rendements de différentes cultures dans différents types de sol en Bourgogne, Eure-et-Loir et Île-de-France dans le cadre du paramétrage d'un modèle paramétré à dire d'experts (Ballot et al., 2018) mais également pour évaluer le coût du travail et le risque de contamination par des mycotoxines de récoltes dans le cadre d'une évaluation multicritères de l'agriculture biologique en Afrique sub-saharienne (Andriamampianina et al., 2018) ou encore pour estimer la date probable d'apparition des premiers symptômes du mildiou sur vigne (Chen et al., 2018).

Si cette méthode peut être utile dans le cas de manque de données expérimentales ou lorsque la réalisation d'expérimentations est impossible (Morris et al., 2014; O'Hagan, 2012), deux limites à cette approche peuvent être soulevées, notamment dans le cadre de la production de connaissances pour l'agroécologie. D'une part, cette méthode suppose de s'intéresser à des variables quantifiables par les experts interrogés, ce qui ne permet pas d'extraire des connaissances sur les processus et les logiques d'action des agriculteurs, deux éléments essentiels à la conception de systèmes agroécologiques. D'autre part, cette méthode suppose également un nombre minimum, au moins cinq (O'Hagan et al., 2006), d'experts, i.e. des personnes « *ayant acquis une bonne compétence dans une profession ou une discipline, grâce à une longue expérience lui permettant de faire des jugements pertinents sur un sujet* » (Albert et al. (2015) cité dans

Andriamampianina et al. (2018)), ce qui peut représenter un objectif difficile à atteindre dans le cas, par exemple, des espèces mineures, peu cultivées et donc peu connues.

2.2.2.2. *La traque aux innovations*

Tout comme l'élicitation de connaissances expertes, cette deuxième méthode a pour objectif de rendre explicite des connaissances empiriques détenues par des agriculteurs. Cette approche repose sur le constat que les agriculteurs innovent par et pour eux-mêmes et qu'ils produisent ainsi des connaissances potentiellement utiles pour d'autres (Goulet et al., 2008). L'objectif de la traque aux innovations n'est donc pas uniquement d'identifier et de décrire ces pratiques innovantes, mais également de les analyser et de les évaluer en vue de rendre certaines connaissances, qui en sont issues, mobilisables par d'autres acteurs impliqués dans un processus de conception. Une formalisation de cette méthode a été proposée dans le cas de l'identification de systèmes alternatifs au système dominant à base de soja en Argentine (Salembier et Meynard, 2013; Salembier et al., 2016). Plus particulièrement, cinq étapes ont été définies : (i) la description du système dominant, (ii) l'identification de producteurs mettant en place des systèmes alternatifs, (iii) la description de ces systèmes alternatifs et de leur logique agronomique, (iv) l'évaluation multicritères des performances de ces systèmes et (v) l'analyse des conditions de développement des systèmes les plus performants et de leur intérêt potentiel pour l'avenir. Cette approche de traque aux innovations a depuis été mobilisée et adaptée dans différents cas d'études en France (voir par exemple Verret et al. (2019) pour la traque aux associations d'espèces incluant des légumineuses) ou à l'étranger dans le cas de l'identification de pratiques de fumure organiques atypiques au Burkina Faso (Blanchard et al., 2017) ou sur des cultures telles que le cacao ou les fruits de la passion (Ruf and Allagba, 2016; Bashangwa Mpozi, 2019).

La production de connaissances issues de ces dispositifs est très diversifiée. Au-delà de l'identification de pratiques alternatives, qui viennent enrichir la bibliothèque d'innovations techniques mobilisables pour concevoir des nouveaux systèmes (Mischler et al., 2009; Blanchard et al., 2017; Verret et al., 2019), la compréhension de la logique agronomique permet par exemple de faire émerger des indicateurs d'évaluation utilisés par les producteurs eux-mêmes (Salembier et al., 2016) qui peuvent être également utiles pour accompagner la conception (voir § 2.1). De plus, l'analyse croisée des

différentes logiques agronomiques rencontrées, hybridée avec des connaissances scientifiques, peut permettre de formaliser les options techniques de façon à les relier à des fonctions attendues, pour une mise en circulation et une utilisation dans d'autres situations (Salembier, 2019; Verret et al., 2019).

2.2.2.3. Favoriser les apprentissages et la production de connaissances par la mise en place de réseaux d'expérimentations par les agriculteurs

Comme le définit Kolb (1984, 2014), « *learning is the process whereby knowledge is created through the transformation of experience. Knowledge results from the combination of grasping and transforming experience* ». La réalisation d'apprentissages par les agriculteurs passe donc par l'acquisition d'expérience sur des techniques (Chantre et Cardona, 2014), soit par leur mise en œuvre dans les systèmes de culture pratiqués sur l'exploitation (par exemple dans les approches pas-à-pas, voir §1.1.1), soit par la réalisation d'expérimentations dédiées –également sur l'exploitation- (Leitgeb et al., 2014; Catalogna et al., 2018). En parallèle, des travaux ont également montré le rôle des dynamiques collectives pour accompagner le changement des systèmes agricoles notamment en raison des apprentissages collectifs en jeu au sein de réseaux d'agriculteurs (Conley and Christopher, 2001; Kroma, 2006; Elzen et al., 2012; Garbach and Morgan, 2017). Ainsi, à l'instar du réseau Pâtur'Ajuste (décrit dans Girard and Magda, 2018), des initiatives se sont donc développées pour d'une part renforcer la capacité d'action individuelle des agriculteurs par la réalisation d'expérimentations et d'autre part bénéficier de leurs apprentissages pour outiller d'autres agriculteurs en favorisant les échanges au sein du réseau (ex : tour de plaine) et le partage des connaissances qui en sont issues (ex : rédaction de fiches).

À partir d'une analyse croisée de sept réseaux d'agriculteurs, Navarrete et al. (2018) ont mis en évidence que la nature des expérimentations engagées par les agriculteurs et l'organisation du réseau impactent les connaissances qui en sont issues. Plus particulièrement, les auteurs montrent que, lorsque les expérimentations sont réalisés collectivement, les connaissances issues des apprentissages des agriculteurs gagnent en genericité : « *more generic knowledge was built when a similar experimental protocol was deployed on several farms, or when complementary trials were carried out on different farms with similar monitoring* ». Enfin, les auteurs montrent également le rôle

des scientifiques impliqués dans les réseaux, dans l'interprétation et la compréhension des observations, qui conduit à renforcer l'apprentissage des agriculteurs (« *it allowed them to benefit from scientific indicators of soil health and deepened their knowledge on soil functioning* »).

En favorisant les apprentissages des agriculteurs et en créant un contexte favorable pour hybrider des connaissances scientifiques et empiriques, ces réseaux d'expérimentations par des agriculteurs semblent être un moyen efficace pour accompagner la transition agroécologique.

2.2.3. Utiliser la conception pour produire des connaissances ?

Comme nous l'avons vu dans la partie précédente (§ 2.1), de nombreux auteurs se sont intéressés à la nature des connaissances à mobiliser pour concevoir des systèmes agroécologiques. Cependant, nous avons également vu que l'exploration de nouveaux concepts dans un processus de conception conduit à l'expansion de l'espace des connaissances (Encadré 3). Dans une perspective d'identifier des méthodes pouvant accompagner la production de connaissances, il peut alors être intéressant de se questionner sur les connaissances produites au cours de la conception. À notre connaissance, peu de travaux ont porté sur cette question en agronomie, et cette partie s'appuiera donc essentiellement sur une analyse croisée de neuf cas d'étude où des chercheurs étaient engagés dans un projet de conception en lien avec l'agroécologie (Toffolini et al., 2019). Un des résultats majeurs de cette étude est que, dans les neuf cas, l'activité de conception a systématiquement conduit à la production de nouvelles connaissances scientifiques sur les agroécosystèmes. Plus particulièrement, les auteurs mettent en évidence l'originalité et la singularité des connaissances produites, par exemple des connaissances portant sur des objets connus mais ne faisant pas l'objet de recherche spécifique (par exemple « *les feuilles gelées* » dans le cas du colza) ou sur des nouveaux effets non pris en compte (par exemple, l'effet du sens du travail du sol sur les phénomènes de ruissellement érosif). Ainsi, cette étude conduit donc à s'interroger sur la possibilité de mobiliser la conception, non plus uniquement comme une finalité en soit, mais comme un moyen pour produire des connaissances pour l'agroécologie.

Dans cette partie nous avons donc vu que :

- Pour répondre aux enjeux liés à la production de connaissances pour concevoir des systèmes agroécologiques, les agronomes mobilisent une diversité de méthodes, qui se distinguent à la fois par la nature des connaissances qu'elles produisent (empiriques, scientifiques) et également par leur capacité à favoriser l'hybridation entre ces deux types de connaissances. En analogie à l'analyse réalisée pour les différentes méthodes de conception, nous pouvons également noter que la posture de l'agronome évolue également depuis un statut de « producteur de connaissances », dans les expérimentations agronomiques classiques, au statut de facilitateur de l'apprentissage, dans les réseaux d'expérimentations par les agriculteurs.

 - La conception semble être un moyen original pour produire des connaissances pour accompagner la transition agroécologique.
-
-

3. Introduire la cameline dans les systèmes de culture de l'Oise : quels enjeux de production de connaissances ?

3.1. La cameline : une culture oléagineuse rustique avec de multiples usages

La cameline [*Camelina sativa* (L.) Crantz] est une culture oléagineuse annuelle de la famille des Brassicacées (Zubr, 1997). Historiquement cultivée en Europe du Nord pour son huile, comme en témoignent des études archéologiques (Larsson, 2013; Pollmann, 2014; Effenberger, 2018), elle a peu à peu disparu au profit d'autres cultures oléagineuses plus compétitives, comme le colza, le tournesol ou le lin (Karg, 2012; Brock et al., 2018). Depuis la fin des années 1990, on observe un regain d'intérêt pour cette culture, justifié par ses caractéristiques agronomiques et industrielles intéressantes (Putnam et al., 1993; Vollmann et al., 1996; Bonjean and Le Goffic, 1999; Zanetti et al., 2013).

Du point de vue agronomique, la cameline se caractérise par un cycle de développement court, environ 1100 à 1200 °Cj en température de base 5°C (Gesch, 2014). De manière assez analogue au colza, le cycle de développement de la cameline comporte six phases : l'émergence, le stade rosette, l'élongation, la floraison, le remplissage des grains et la maturité (Figure 6)(Martinelli and Galasso, 2011). La cameline est souvent présentée comme une culture rustique en raison de sa tolérance à la sécheresse et aux basses températures (Gesch and Cermak, 2011; Hunsaker et al., 2011a; Schillinger et al., 2012; Gesch and Johnson, 2015). Par exemple, Hunsaker et al. (2011) ont estimé des besoins en eau de la cameline compris entre 332 et 371 mm en Arizona, ce qui correspond à la moitié des besoins en eau pour produire des légumes dans cette même région. Schillinger et al. (2012) mentionnent un taux de survie de plus de 70% de la cameline (au stade deux feuilles) après une exposition de 8h à -23 °C. La cameline est également résistante à certaines maladies communes des Brassicacées (par exemple l'alternariose, causée par *Alternaria brassicae*, ou la nécrose du collet causée par *Leptosphaeria maculans*). Il existe également des génotypes résistants au sclérotinia (causé par *Sclerotinia sclerotinim*) ou au mildiou (causé par *Peronospora parasitica*)(Séguin-Swartz et al., 2009). Enfin, la cameline semble présenter une certaine résistance aux principaux ravageurs spécialistes des crucifères, comme par exemple les altises (*Phyllotreta ssp.*)(Coleoptera ; Chrysomelidae ; Alticinae), la mouche du chou

(*Delia ssp.*) ou les charançons (*Ceutorhynchus assimilis*), qui pourrait s'expliquer par sa composition en glucosinolates (Soroka et al., 2015, 2017). Malgré ces atouts agronomiques, la combinaison (i) d'une semence de petite taille (PMG compris entre 0.8 et 1.8 g) qui peut rendre difficile l'implantation de la culture, et (ii) de faibles rendements (compris entre 400 et 3300 kg ha⁻¹) par rapport à d'autres cultures oléagineuses, est un frein au développement de cette culture (Eynck et Falk, 2013; Berti et al., 2016).

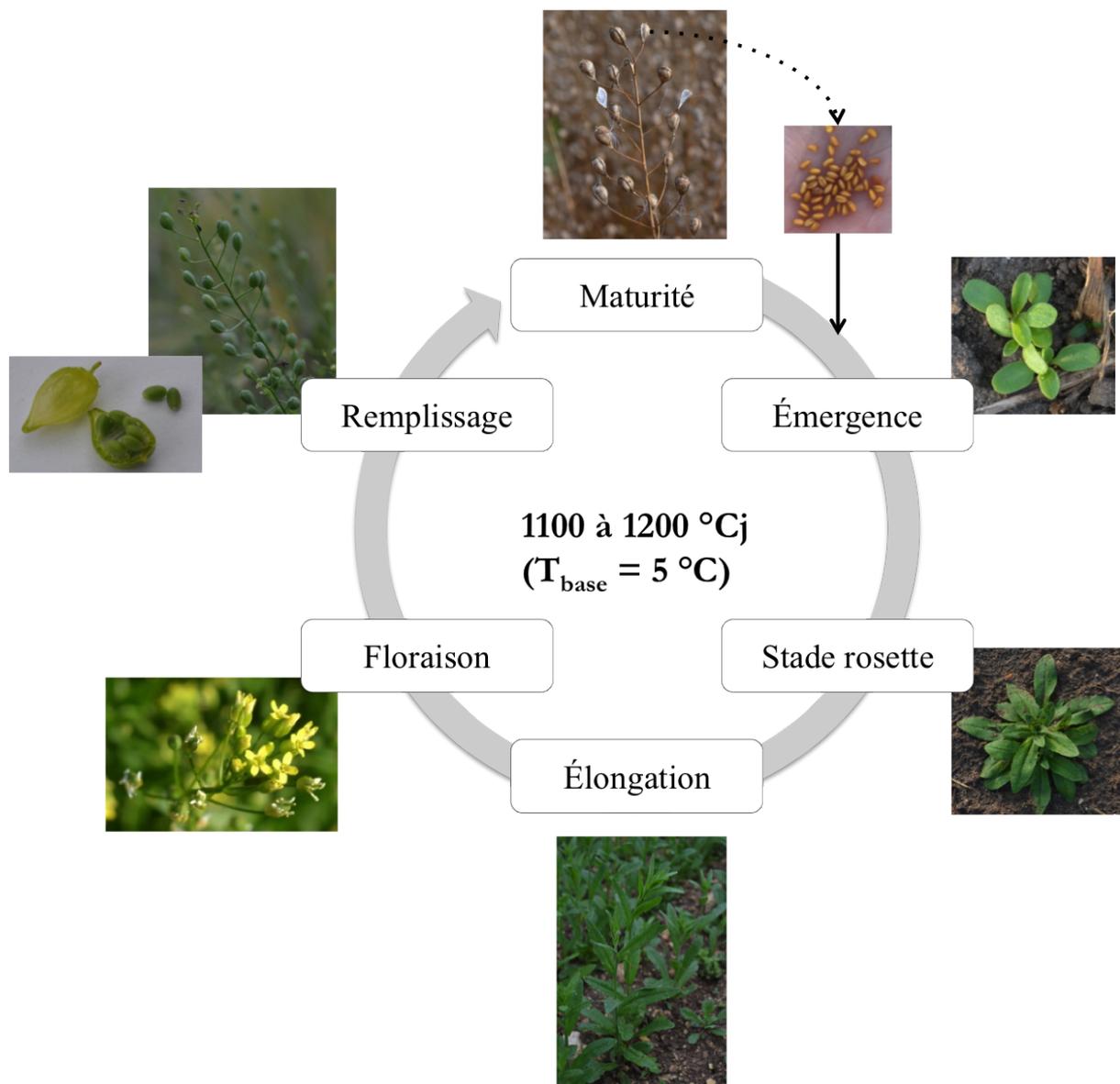


Figure 6. Cycle de développement de la cameline. Source photos : M. Leclère

Du point de vue des usages, l'huile de cameline a largement été étudiée en tant que source alternative pour la production de biocarburants (Fröhlich et Rice, 2005; Ciubota-Rosie et al., 2013; Moser, 2010, 2012; Shonnard et al., 2010; Wu et Leung, 2011; Yang et al., 2016; Sindelar et al., 2017; Chaturvedi et al., 2018; Mohammad et al., 2018). Cependant, en raison de son profil en acides gras (caractérisé par sa richesse en oméga 3) et de sa composition protéique (Encadré 4), de nombreuses applications en alimentation humaine ou animale, et pour l'industrie, ont également été identifiées pour la cameline (Waraich et al., 2013; Berhow et al., 2014; Berti et al., 2016)(Figure 7).

Encadré 4 : Quelques éléments sur la composition de l'huile et du tourteau de cameline (d'après Berti et al., 2016 et Righini et al., 2016)

La cameline se caractérise par une teneur en huile relativement élevée (30 à 40% en moyenne). L'huile de cameline se distingue de celles d'autres cultures oléagineuses (comme le colza, le lin ou le palmier à huile) par : (i) une teneur élevée en acides gras poly-insaturés, dont l'acide α -linoléique *, (ii) la présence d'acide écosénoïque** et (iii) une teneur en acide érucique inférieure à 5% (Table 1). Le tourteau de cameline se caractérise par une teneur en protéines de l'ordre de 40% et une teneur en glucosinolates beaucoup plus basse que les autres cultures de la famille des brassicacées, même si elle reste supérieure au seuil réglementaire pour la consommation du tourteau pur en alimentation animale.

Table 1. Composition de l'huile de cameline en comparaison avec trois autres cultures oléagineuses

	Teneur en acides gras majoritaires (%)						
	C16:0 palmitique	C18:0 stéarique	C18:1 oléique	C18:2 linoléique	C18:3 linoléique	C20:1 écosénoïque	C22:1 érucique
Cameline	5-7	2-3	14-18	14-20	30-35	14-17	2.4-4.0
Colza	4-5	1-2	60-63	18-20	8-10	1-2	<1
Lin	5.4-5.7	4.0-4.7	18-23	13-14	52-57	Traces	Traces
Palmier à huile	32-45	2-7	38-52	5-11	Traces	Traces	Traces

* L'acide α -linoléique (C18:3) est un acide gras polyinsaturé de la famille des omégas 3. C'est un acide gras essentiel, c'est-à-dire qu'il ne peut pas être synthétisé par l'organisme et doit donc être fourni par l'alimentation (ANSES, <https://www.anses.fr/fr/content/les-acides-gras-om%C3%A9ga-3>).

** L'acide écosénoïque (C20:1) est un acide gras qui pourrait être une source de tryglycérides à chaîne moyenne, aujourd'hui uniquement obtenu à partir d'huile de palme ou de noix de coco

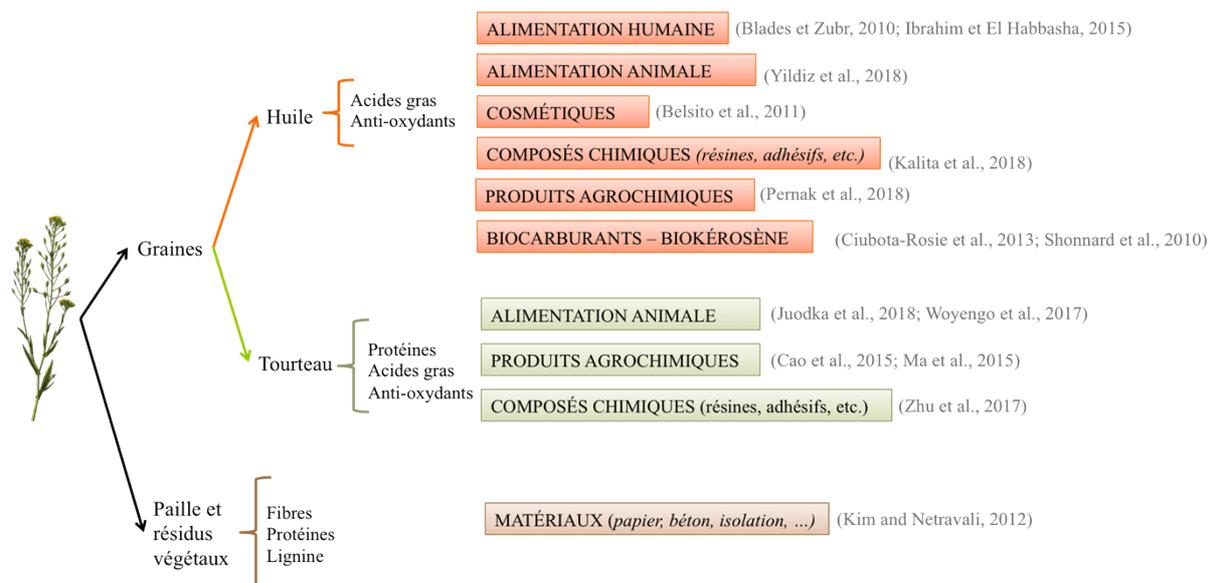


Figure 7. Diversité des débouchés de l'huile, du tourteau et des résidus de culture de cameline.

Enfin, une autre caractéristique de la cameline, souvent mentionnée dans la littérature, est sa capacité à s'adapter à une large gamme d'environnements, comme le démontre la réalisation d'essais sur cette culture à travers le monde entier sous différents climats et dans différents types de sol (Table 2).

Cependant, il est difficile d'avoir une estimation des surfaces cultivées de cameline dans le monde. Par exemple, McVay et Lamb (2008) et Vakulabharanam (2014) mentionnent une production de l'ordre d'une dizaine de milliers d'hectares respectivement dans le Montana aux Etats-Unis en 2007 et dans la province du Saskatchewan au Canada en 2009, mais des données aux échelles nationales et mondiales sont difficilement accessibles. Sur le site de la FAO⁷, la cameline n'apparaît pas dans la liste des cultures oléagineuses, et se trouve donc incluse dans la catégorie « graines oléagineuses non identifiées », qui représentait 1 728 586 hectares en 2017 à l'échelle mondiale, soit l'équivalent de 5% des surfaces cultivées en colza. En France, la catégorie « autres oléagineuses » représente seulement 0,4 % des surfaces destinées aux cultures oléagineuses⁸.

⁷ <http://www.fao.org/faostat/fr/#data/QC>

⁸ Source : agreste (<http://agreste.agriculture.gouv.fr/page-d-accueil/article/agreste-donnees-en-ligne>)

Table 2. Exemple de la diversité des environnements expérimentés pour la cameline

Continent : Pays (Région)	Caractéristique du climat	Types de sol	Références
Australie	Méditerranéen	NA	<i>(Campbell et al., 2013)</i>
Canada (Saskatchewan)	Continental tempéré	Argileux Argilo-limoneux	<i>(Gugel and Falk, 2006)</i>
Chili	Méditerranéen tempéré à froid	NA	<i>(Berti et al., 2011)</i>
Espagne	Méditerranéen semi-aride	Limono-argileux	<i>(Royo-Esnaola et Valencia-Gredilla, 2018)</i>
Europe : Grèce, Italie, Pologne	Tempéré	Sablo-limoneux ; Argilo-limoneux	<i>(Zanetti et al., 2017)</i>
Inde	Subtropical	NA	<i>(Borah et al., 2019)</i>
USA (Arizona)	Aride	Sablo-argilo-limoneux	<i>(Hunsaker et al., 2013)</i>
USA (Minnesota)	Continental	Limoneux	<i>(Gesch et al., 2017)</i>

3.2. Une culture orpheline de recherche et ancrée dans un mode de production classique de connaissances scientifiques

Avec 771 publications scientifiques répertoriées entre 1990 et 2019, tous domaines confondus, contre 171 629 pour le blé, 23 048 pour le colza et 5 494 pour le lin sur la même période⁹, la cameline peut être considérée comme une culture orpheline de recherche, *i.e.* qui ne bénéficie pas d'un investissement continu ou régulier de la recherche (Andrivon et al., 2017). Si la production de connaissances scientifiques sur cette culture est en plein essor depuis ces dix dernières années (645 articles publiés sur la période 2010-2019 contre 91 sur la période 2000-2010 et 35 sur la période 1990-2000), elle reste donc largement inférieure à celle relative aux espèces dites « majeures », comme le blé ou le colza.

La production de connaissances scientifiques sur la cameline s'est assez classiquement organisée autour de quatre champs de recherche : les sciences du végétal et les applications en biotechnologie, l'agronomie, les sciences des procédés et les usages. Sur la période 1990-2019, les recherches en sciences du végétal représentent environ 40 % des publications. En effet, si comme nous l'avons vu, la cameline a connu un regain d'intérêt en tant qu'espèce cultivée en raison de ses caractéristiques

⁹ Résultats obtenus à partir d'une recherche bibliographique sur Web of Science avec respectivement les mots clés « *Camelina sativa* OR *false flax* », « *Wheat* », « *Rapeseed* OR *Canola* » et « *Linseed* ».

agronomiques et de ses multiples usages (§ 3.1), elle est aussi considérée comme une plante « modèle » intéressante en biotechnologie en raison de la possibilité de modifier facilement son génome et de sa proximité génétique avec *Arabidopsis thaliana* (Gehring et al., 2006; Bansal and Durrett, 2016; Faure and Tepfer, 2016; Malik et al., 2018).

En agronomie, un grand nombre d'études publiées sur la conduite de la cameline concernent la quantification des effets de différentes pratiques sur le rendement ou la qualité des grains à partir d'expérimentations factorielles réalisées en stations expérimentales (Table 3). La cameline s'inscrit donc dans un mode classique de production de connaissances (voir § 2.2.1). Cependant, ces connaissances restent peu actionnables en dehors des environnements dans lesquels elles ont été produites. Par exemple, l'analyse de la littérature montre qu'un grand nombre de courbes de réponse du rendement à l'azote ont été produites pour la cameline dans différents environnements (Berti et al., 2016). Or, ces courbes, qui ont un intérêt localement, donnent peu d'informations sur les processus sous-jacents et ont une faible valeur générique (Sadras et Lemaire, 2014). À l'inverse, à ce jour, aucune étude n'a porté sur l'élaboration d'une courbe critique de l'azote pour la cameline pour permettre le calcul de l'indice de nutrition azotée, indicateur agronomiquement pertinent et générique pour quantifier le statut azoté d'une culture (Greenwood et al., 1990; Sadras et Lemaire, 2014). Aujourd'hui, cet ancrage dans un mode classique de production de connaissances en agronomie semble se confirmer avec le développement récent d'un modèle de culture permettant de simuler les rendements et la composition de l'huile de la cameline (Cappelli et al., 2019).

Table 3. Exemples d'études s'intéressant à l'effet de différentes pratiques sur le rendement et la qualité des graines de cameline

Références	Facteur ou combinaison de facteurs étudiés	Variables d'intérêt
<i>Bronson et al. (2019)</i>	Fertilisation azotée x irrigation	Rendement, teneur en huile
<i>Gesch et Cermak (2011)</i>	Date de semis x Travail du sol	Rendement et teneur en huile
<i>Gesch (2014) ; Gesch et al. (2018)</i>	Genotype x Date de semis	Rendement, teneur en huile, densité, la date de floraison
<i>Gesch et al. (2017)</i>	Profondeur de semis x Densité de semis	Rendement, teneur en huile, taux de levée
<i>Hergert et al. (2016); Hunsaker et al. (2013)</i>	Irrigation	Rendement
<i>Jiang and Caldwell (2016)</i>	Fertilisation azotée	Rendement, composantes du rendement
<i>Jiang et al. (2013); Wysocki et al. (2013)</i>	Fertilisation azotée x Apport de soufre	Rendement, teneur en huile
<i>Urbaniak et al. (2008)</i>	Densité x Date x Méthode de semis	Rendement, teneur en huile, composition en acides gras
<i>Walia et al. (2018)</i>	Date de récolte	Rendement, teneur en huile, composition en acides gras

Une autre partie de la littérature s'intéresse à différentes modalités d'insertion de la cameline dans les systèmes de culture et à leur impact sur le fonctionnement de ceux-ci (Paulsen 2007, 2008; Gesch et Archer, 2013; Dobre et al., 2014; Gesch et al., 2014; Chen et al., 2015; Berti et al., 2015, 2017b). Par exemple, Gesch et Johnson (2015) montrent que l'introduction du soja en dérobé après la récolte de cameline conduit à une augmentation de l'utilisation de l'eau à l'échelle de la rotation, mais que, lorsque le soja est implanté en relais dans la cameline, l'utilisation de l'eau est comparable à celle du soja seul. Dans le Montana, Obour et al. (2018) montrent que le remplacement de la période de jachère avant un blé par une culture de cameline entraîne une baisse de rendement du blé. Ou encore, Saucke et Ackermann (2006) montre l'effet positif d'une association pois/cameline sur la pression adventice. Plus récemment, des dimensions environnementales et économiques ont été intégrées dans l'évaluation de ces modalités d'insertion (Berti et al., 2017a; Tabatabaie et al., 2018; Ott et al., 2019) et des travaux d'évaluation, sur le long terme, de systèmes de culture incluant la cameline émergent

(Schillinger, 2019). Cependant ces connaissances restent toujours produites dans des conditions expérimentales contrôlées (en stations) et ne sont donc pas confrontées - et donc difficilement extrapolables - à la réalité des conditions agricoles. De plus, elles sont majoritairement produites dans un contexte nord-américain (Etats-Unis ou Canada) et portent sur l'introduction de la cameline dans une gamme peu diversifiée de systèmes de culture (ex : rotation maïs-soja ou monoculture de blé).

Enfin, si l'impact de stress abiotiques comme la sécheresse, l'hydromorphie des sols ou les stress salins ont été étudiés (Berti et al., 2016), la recherche sur la gestion des bioagresseurs dans la culture de cameline reste limitée. Par exemple, dans certaines études, la présence de maladies ou de ravageurs est reportée par les auteurs, avec plus ou moins d'impacts sur la culture (Lenssen et al., 2012; Gesch, 2014; Jewett, 2015; Jiang et Caldwell, 2016). Cependant, la littérature scientifique ne rend compte d'aucune étude spécifique sur des leviers techniques à mobiliser pour limiter ces impacts, en dehors du développement et de l'utilisation de génotypes résistants, par exemple pour le mildiou (Vollmann et al., 2001). De même, pour les adventices - identifiées comme l'un des défis majeurs dans la culture de cameline du fait de sa faible compétitivité (Berti et al., 2016)-, la production de connaissances est essentiellement centrée sur l'identification d'herbicides ne causant pas de dommage sur la culture (Jha and Stougaard, 2013), ou sur l'identification de génotypes résistants à des substances actives (Walsh et al., 2012), mais très peu de pratiques agroécologiques ne mobilisant pas d'herbicides sont explorées dans la littérature.

Ainsi, concernant la production de connaissances scientifiques sur la cameline, nous retiendrons donc que :

- La cameline ne fait pas l'objet d'un investissement continu et régulier de la recherche. Elle peut donc être considérée comme une culture orpheline de recherche, pour laquelle peu de connaissances scientifiques sont produites en comparaison aux espèces majeures.
 - Du point de vue de la production de connaissances agronomiques, la cameline s'inscrit dans un mode classique de production de connaissances, basé sur l'expérimentation factorielle en station expérimentale et la modélisation, conduisant à une production de connaissances souvent peu actionnables (ex. de la courbe de réponse du rendement à l'azote).
 - Cette production de connaissances agronomiques est centrée sur des environnements caractéristiques du contexte Nord-Américain, et reste donc peu actionnable pour raisonner l'introduction de la cameline dans les systèmes de culture de l'Oise.
 - Enfin, le champ de recherche consacré aux processus ou aux régulations biologiques, nécessaire pour concevoir des systèmes agroécologiques, est orphelin de recherche.
-

3.3. Des connaissances expertes et techniques existantes mais limitées

Comme mentionné précédemment (§ 3.1), les surfaces cultivées en cameline à l'échelle de la France sont faibles. La filière cameline française semble structurée autour d'un petit nombre d'agriculteurs, la plupart en Agriculture Biologique, répartis dans différentes zones géographiques (ex : Gers, Haute-Garonne, Indre, Oise, Tarn, Yvelines) et dont la production est essentiellement valorisée par une transformation à la ferme pour une utilisation en alimentation humaine (Urbina, 2019). Certains agriculteurs contractualisent la vente de leur production avec des huileries ou des industriels qui se sont positionnés sur le secteur de la cameline. Les connaissances empiriques, issues de l'expérience des agriculteurs, restent donc relativement limitées à l'échelle du territoire français.

L'analyse de la littérature grise¹⁰ fait émerger trois catégories dans les ressources fournissant des informations techniques sur la cameline. La première catégorie correspond à *des fiches culture*, produites soit par des semenciers (par exemple SAATBAU¹¹ ou SEM-PARTNERS¹²) soit par des instituts techniques (ex : Arvalis¹³) mais concernant exclusivement le cas de l'utilisation de la cameline en tant que couvert végétal (en culture pure ou en association). Ces informations techniques semblent peu informatives pour raisonner la conception d'itinéraires techniques de la cameline, en tant que culture de rente, adaptés au territoire de l'Oise, du fait de (i) leur faible généralité (ex : gamme de semis recommandée très large sans lien avec l'environnement) et (ii) l'objectif attendu de la culture (par ex. beaucoup d'informations sur le mode de destruction de la culture cultivée en tant que couvert végétal d'interculture). La deuxième catégorie de ressources correspond à des *fiches techniques* produites par des structures alternatives au conseil agricole traditionnel (ex : agridea¹⁴, Tech&bio¹⁵). Elles se différencient des fiches culture précédemment décrites en fournissant, en plus des éléments techniques comme la date ou la densité de semis, des informations sur les potentiels services attendus de la culture et sur l'adaptation de la conduite associée (voir notamment fiche cameline agridea). La troisième et dernière catégorie correspond à des *témoignages d'agriculteurs* (Coulombel and Fontaine, 2009; Pousset, 2009; Waligora and Thomas, 2009; Lévêque, 2013) qui fournissent donc des informations très situées, mais qui peuvent être source d'inspiration pour la conception d'itinéraires techniques dans d'autres milieux.

¹⁰ Obtenue à partir de différentes recherches autour des mots clés « *Cameline* », « *Itinéraire technique de la cameline* », « *Fiche culture cameline* », « *Conduite de la cameline* »

¹¹ <https://www.saatbau.com/fr/saatgut/couverts-vegetaux>

¹² <http://www.sem-partners.com/guide.html>

¹³ http://www.fiches.arvalis-infos.fr/liste_fiches.php?fiche=ci&type=pures

¹⁴ Agridea, « la centrale de vulgarisation agricole encourage l'échange de connaissances et d'expériences entre les personnes » <https://www.agridea.ch/>

¹⁵ Tech&bio, « un outil de promotion pour le développement des pratiques de production agricoles durables » <https://www.tech-n-bio.com/fr>

Enfin, dans le cadre de la plateforme expérimentale régionale de Catenoy (localisée dans le bassin d'approvisionnement de notre cas d'étude), une étude de faisabilité technique autour d'un panel de cultures de diversification (incluant le soja, le quinoa, le sorgho, le millet et la cameline) a été engagée. Plus particulièrement, dans le cas de la cameline, des essais portant sur des stratégies de fertilisation azotée et de désherbage (mécanique et chimique) ont été mis en œuvre en 2015 et des tests d'associations d'espèces ont été réalisés en 2017 (Albaut et al., 2015, 2017). La réalisation de ces expérimentations a permis la production de références locales jusqu'alors inexistantes. Cependant, ces connaissances restent dépendantes du milieu dans lesquelles ont été produites, et une adaptation locale à la diversité des milieux rencontrés au sein du bassin d'approvisionnement est nécessaire. D'autre part, elles ne permettent pas de raisonner l'insertion de la cameline dans la rotation.

En conclusion de cette partie, nous retiendrons donc que :

- Des connaissances empiriques et techniques sur la cameline existent et ont potentiellement un intérêt pour accompagner la conception d'itinéraires techniques de la cameline.
 - Cependant ces connaissances restent limitées en raison du faible nombre d'agriculteurs producteurs de cette culture. D'autre part, elles ne permettent pas (i) de raisonner l'insertion de la cameline dans les systèmes de culture de l'Oise et (ii) de concevoir des itinéraires techniques adaptés à la diversité des milieux rencontrés dans le bassin d'approvisionnement.
-

4. Problématique

En s'appuyant sur cette revue de la littérature, nous faisons donc le constat que raisonner et accompagner l'introduction de la cameline dans les systèmes de culture de l'Oise pour approvisionner une bioraffinerie constitue un défi méthodologique.

Tout d'abord, comme nous l'avons mentionné au début de cet état de l'art, l'introduction d'une nouvelle espèce suppose la re-conception du système de culture. En inscrivant cette activité de re-conception à l'échelle d'un territoire, cela suppose de concevoir non pas *une* mais *des* façons de produire de la cameline pour prendre en compte la diversité des milieux rencontrés dans ce territoire (le bassin d'approvisionnement de la bioraffinerie dans notre cas). Cette adaptation à la diversité des milieux suppose d'explorer une large gamme de possibilités d'insertion et de conduite de la cameline. Par ailleurs, inclure cette activité de re-conception dans une perspective agroécologique suppose d'adapter finement ces propositions aux situations individuelles des agriculteurs rencontrées dans leurs exploitations agricoles. Dans la première partie de cet état de l'art (§ 1.1), nous avons montré que la combinaison d'approches de conception pas-à-pas et *de novo* offrait un bon support méthodologique pour répondre à ce double enjeu d'exploration et de conception située. De plus, en s'inscrivant à la fois dans un territoire et dans un projet de développement de filière, les systèmes de culture conçus doivent répondre aux attentes des agriculteurs, à celles des futurs transformateurs mais également aux exigences réglementaires territoriales (par ex. région d'étude située en zone vulnérable). Pour prendre en compte cette diversité d'objectifs, nous avons vu que l'implication de différents acteurs (reliés directement ou non à l'activité agricole) dans le processus de conception est un levier intéressant (§ 1.2). **Ainsi, l'introduction de la cameline dans la diversité des systèmes de culture de l'Oise suppose la mise en place d'un processus collectif de conception innovante de systèmes de culture au sein de ce territoire, en intégrant les acteurs potentiellement concernés par le développement (production et utilisation) de cette nouvelle culture.** La mise en place de cette activité de conception soulève alors la question des méthodes de conception à mobiliser et de la (ou des) posture(s) à adopter dans ce processus en tant que chercheur-agronome.

En parallèle, nous avons fait le constat que, pour alimenter ce processus de conception, des connaissances scientifiques et empiriques, caractérisées par leur caractère actionnable (i.e. permettant de renforcer les acteurs dans leur activité de conception) étaient nécessaires (§ 2.1). Or, nous avons également montré que de telles connaissances scientifiques et empiriques pour accompagner une activité de conception de systèmes de culture incluant de la cameline dans le territoire de l'Oise étaient particulièrement limitées (§ 3.2 et § 3.3). **Ainsi, l'introduction de la cameline dans les systèmes de culture de l'Oise suppose (i) de produire des connaissances scientifiques et techniques sur cette espèce, de manière à ce qu'elles soient appropriables par des agriculteurs pour accompagner leur activité de conception et (ii) de favoriser les apprentissages des agriculteurs sur cette culture.** Cette question interroge donc sur les méthodes à mettre en œuvre pour produire des connaissances actionnables permettant d'alimenter un processus de conception participatif et de tester au champ des systèmes de culture adaptés localement.

En m'appuyant sur ces deux constats, je propose de formuler la question de recherche suivante : **Comment articuler production de connaissances et conception dans une approche multi-acteurs pour raisonner et accompagner l'introduction de la cameline dans les systèmes de culture de l'Oise pour approvisionner une bioraffinerie ?**

Au-delà du cas d'étude de la cameline dans l'Oise, ce travail vise également à fournir des éléments méthodologiques génériques pour raisonner et accompagner le développement d'une nouvelle culture au sein d'un territoire.

5. Démarche générale

Nous avons proposé de répondre à cette question en mettant au point une démarche participative et multi-acteurs, combinant différents dispositifs (ateliers, tour de plaine, expérimentations, etc.) et alternant des phases de conception, de test au champ et d'échanges collectifs (Figure 8). Plus précisément, à partir de l'analyse de la littérature scientifique et de la littérature grise (présentée dans les § 3.2 et 3.3), deux processus de conception, dans lesquels nous avons fait le choix d'adopter deux postures différentes (une posture d'animation et d'observation, et une posture de concepteur/évaluateur), ont été engagés. Dans ces deux processus, l'objectif était d'utiliser la conception comme *moyen* pour produire des connaissances. Le choix du changement de posture a été fait, quant à lui, pour stimuler la production de différents types de connaissances. Après cette phase de production de connaissances – issue de la mise en culture de prototypes conçus-, un troisième processus de conception a été engagé, lors d'un atelier d'agriculteurs, en vue de concevoir des modalités d'insertion et de conduite de la cameline adaptées à la diversité des situations rencontrés dans le bassin d'approvisionnement. Au cours de cette étape, la conception a donc été une *finalité*.

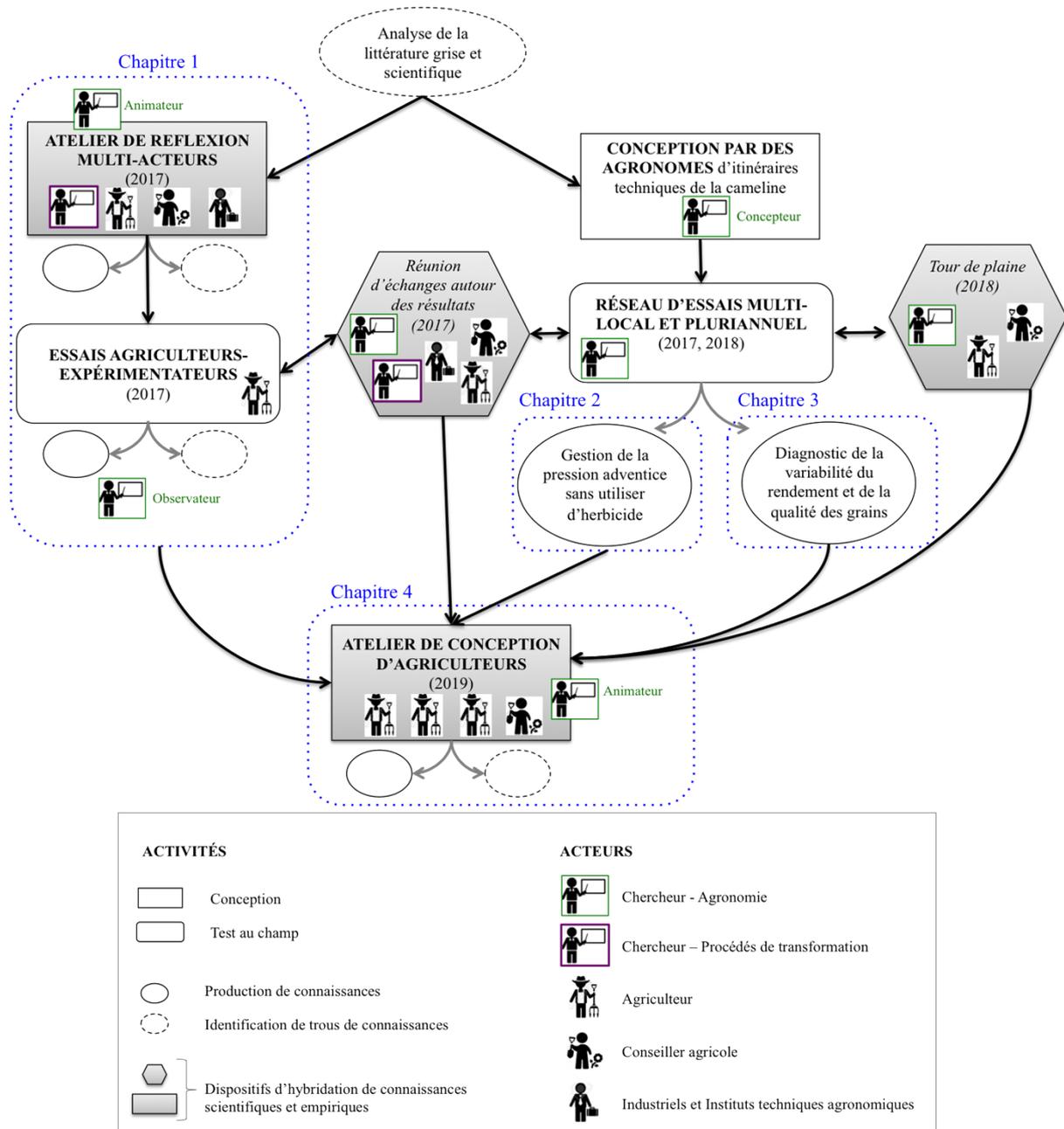


Figure 8. Schéma de la démarche générale : une approche participative et multi-acteurs articulant conception, test au champ et échanges collectifs.

○ *Chapitre 1*

Le premier processus de conception a consisté à combiner un atelier de réflexion multi-acteurs et des essais où la conduite de la cameline a été conçue, mise en œuvre, testée et évaluée par les agriculteurs dans leurs fermes (essais agriculteurs-expérimentateurs, voir Figure 8). L'objectif de l'atelier a été d'identifier des trous de connaissances sur la cameline et des critères d'évaluation pertinents pour l'ensemble de la filière en passant par une activité de conception collective. Les essais des agriculteurs, qui ont eu lieu dans la continuité de cet atelier, ont consisté à mettre en culture des modalités d'insertion de la cameline en double culture, conçues par les agriculteurs eux-mêmes, et à les évaluer. L'objectif de ce dispositif a été de stimuler la production de connaissances empiriques sur la cameline et de favoriser les apprentissages des agriculteurs. J'ai adopté une posture d'animatrice puis d'observatrice respectivement dans ce processus.

Le premier chapitre de ce manuscrit s'intéresse à ce dispositif couplé et à son intérêt vis à vis de la production de connaissances pour la conception, en s'appuyant sur le cas de la cameline en double culture. Plus particulièrement, ce chapitre répondra à la question suivante : **comment la combinaison d'une activité collective puis individuelle de conception permet-elle d'identifier des trous de connaissances et de produire des connaissances actionnables sur l'introduction de la cameline en double culture ?**

○ *Chapitres 2 et 3*

Le deuxième processus a consisté à concevoir des itinéraires techniques de la cameline de printemps à partir de l'analyse de la littérature, et à les mettre en œuvre dans un réseau d'essais multi-local et pluriannuel (Figure 8). Tout d'abord, nous [les agronomes-chercheurs] avons conçu quatre itinéraires techniques de la cameline pour répondre aux différents enjeux identifiés comme majeurs pour introduire durablement la cameline dans les systèmes de culture de l'Oise, incluant notamment la gestion sans herbicide des adventices. Puis ces itinéraires techniques ont été mis en culture et évalués, chez des agriculteurs, pendant deux années dans différents milieux représentatifs du bassin d'approvisionnement. L'objectif de ce dispositif était donc de produire à la fois des connaissances techniques sur la cameline à travers la mise en

œuvre par des agriculteurs de ces modalités de conduite et des connaissances scientifiques sur le fonctionnement et les performances de la cameline par une évaluation expérimentale conduite par des chercheurs.

Le deuxième et le troisième chapitre de ce manuscrit portent sur la production de connaissances issues de ce réseau d'essais multi-local et pluriannuel, conçu et évalué par des agronomes. Plus particulièrement, le chapitre 2 traitera la question suivante : **comment contrôler les adventices dans la culture de cameline sans utiliser d'herbicides ?** Le chapitre 3 visera, lui, à répondre à la question : **quelle est la variabilité des critères de production et de qualité de la cameline (rendement, teneur en huile et protéines et composition en acides gras) dans un réseau d'essais multi-local et pluriannuel dans l'Oise et quelles sont les facteurs expliquant cette variabilité ?**

○ *Chapitre 4*

Les deux processus de conception précédemment décrits ont été conduits simultanément et de manière interconnectée. En effet, afin d'identifier et de partager les connaissances produites et de favoriser leur hybridation, différents dispositifs d'échanges en salle ou au champ ont été mis en œuvre en parallèle de ces deux processus structurants (Figure 8).

Le quatrième et dernier chapitre s'intéresse à la mobilisation des connaissances produites localement, *via* l'ensemble de ces dispositifs, pour favoriser une activité de conception par et pour des agriculteurs. Plus particulièrement, ce chapitre abordera la question suivante : **comment favoriser la conception, par des agriculteurs, de modalités d'insertion et de conduite de la cameline, adaptées à leurs propres situations, en se basant sur une formalisation de connaissances scientifiques et empiriques produites localement ?**

La partie RÉSULTATS de ce manuscrit étant composée de différents articles scientifiques publiés ou en cours de publication, le choix a été fait de ne pas présenter en détail les différents dispositifs dans cette partie. Nous invitons le lecteur à se reporter aux parties « matériels et méthodes » de chaque chapitre pour plus d'informations.



CHAPITRE 1

Cultiver de la cameline en double culture dans l'Oise : exemple d'une approche de conception participative pour produire des connaissances actionnables sur une espèce de diversification



Ce chapitre a fait l'objet d'une publication scientifique dans la revue 'European Journal of Agronomy' et d'une communication orale sous forme de poster lors du XV^{ème} congrès de la Société Européenne d'Agronomie.



Leclère, M., Loyce, C., Jeuffroy, M.-H., 2018. Growing camelina as a second crop in France: A participatory design approach to produce actionable knowledge. *European Journal of Agronomy* 101, 78–89. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.08.006>

Leclère, M., Loyce, C., Jeuffroy, M.-H. Growing camelina as a second crop in Northern France to supply a local biorefinery. Using a participatory design approach to produce actionable knowledge. XV^e European Society for Agronomy Congress, 27-31 August 2018, Geneva, Switzerland.

Ce premier chapitre s'intéresse à la mise en place d'une démarche de conception participative, combinant un atelier de réflexion multi-acteurs et des essais « agriculteurs-expérimentateurs », pour accompagner la production de connaissances actionnables sur une espèce de diversification, orpheline de recherche, la cameline.

En juin 2017, un atelier de réflexion multi-acteurs, regroupant des agriculteurs, des conseillers agricoles, des instituts techniques, des chercheurs de différentes disciplines et des industriels, a été organisé autour de la thématique « *produire durablement de la cameline dans l'Oise pour approvisionner une bioraffinerie oléagineuse* ». En faisant un focus sur les modalités d'insertion de la cameline en double culture conçues lors de cet atelier, nous verrons que cette activité de conception collective a permis d'identifier des critères d'évaluation pour la cameline à partir des attentes formulés par les acteurs et de mettre en évidence des trous de connaissances sur le fonctionnement, la conduite et les effets précédents de la cameline qui étaient bloquant pour la conception de systèmes de culture dans l'Oise. À l'issue de cet atelier, il a été proposé de fournir des semences de cameline aux agriculteurs intéressés pour mettre en place des essais autour de la cameline en double culture dans leur exploitation agricole. Quatre agriculteurs ont été volontaires. Ces agriculteurs ont été autonomes dans la conception, la gestion et le suivi de ces essais en fonction de leurs propres

objectifs et questionnements. Nous montrons que la compréhension de ces objectifs et de la logique d'action de l'agriculteur, à travers des visites de terrain et des entretiens, permet d'identifier des indicateurs de pilotage et d'évaluation mobilisés par l'agriculteur et de faire émerger des connaissances issues de ses apprentissages (règle de décision, éléments de fonctionnement de la culture, etc.). Enfin, après avoir discuté de l'originalité de nos deux dispositifs, nous montrons en quoi leur combinaison a conduit à une production de connaissances spécifique (*i.e.* qui n'aurait pas eu lieu sans cette combinaison).

Growing camelina as a second crop in France: a participatory design approach to produce actionable knowledge

Margot Leclère^a, Chantal Loyce^a, Marie-Hélène Jeuffroy^a

^a UMR Agronomie, INRA, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, F-78850 Thiverval-Grignon, France

Highlights

- Actionable knowledge on a little-known crop was produced using participatory design
- A multi-actor workshop and on-farm trials were combined to enhance innovative design
- Farmers introduced camelina as summer second crop in their cropping systems
- Assessment and monitoring indicators for camelina were identified
- Knowledge gaps hampering the development of camelina in fields were identified

Abstract

New cropping systems are needed to meet the increasing demand for sustainable feedstock for food, feed, fibre, and fuel. However, the lack of agronomic knowledge has been shown to hinder the introduction of new crops in current cropping systems. In design sciences, the C-K theory, which was developed to model design logics, shows that a design process could be a relevant tool to produce knowledge. In this study, an original participatory design approach combining a multi-actor workshop and on-farm trials was developed to produce actionable knowledge and identify knowledge gaps. The work was based on a case study: the introduction, in the cropping systems of northern France, of a little-known oilseed crop, camelina [*Camelina sativa* (L.) Crantz], to supply a local oilseed biorefinery. During the workshop, farmers, researchers, and industrialists collectively designed eight crop sequences that included camelina as a second crop, and two crop management options, as a relay crop and a double crop. These design activities allowed for the identification of: (i) assessment indicators derived from participants' expectations; and (ii) knowledge gaps about camelina crop functioning, management,

and preceding crop effects. After the workshop, four farmers implemented on-farm trials. They autonomously designed and managed thirteen crop management options, and appraised them according to their own indicators. These on-farm trials were monitored through interviews, field tours, and measurements. Eleven criteria used by the farmers to appraise their trials were identified. Four crop management options were considered as conclusive, three as not conclusive, and six as promising. The monitoring of these original on-farm trials allowed for: (i) the identification of farmers' monitoring indicators; (ii) the formulation of decision rules for camelina management; (iii) a better understanding of camelina crop functioning; and (iv) the identification of farmers' questions, revealing knowledge gaps to be fulfilled to enhance camelina areas. In this study, we demonstrated that participatory design could be used to: (i) support, at a low cost, the production of actionable knowledge on a little-known crop; and (ii) pursue the identification of relevant topics lines for research-action programs. We also showed that the combination of a multi-actor workshop and new kinds of on-farm trials is relevant to reach these objectives. In conclusion, this approach could be an interesting way to support the design of diversified cropping systems, including little-known crops such as camelina, and to help in the setting of research priorities for these crops.

Keywords

Camelina sativa; design workshop; on-farm research; assessment indicators; diversification; cropping system

1. Introduction

Over the past decade, there has been a growing demand for sustainable feedstock to produce food, feed, fibre, and fuel (Cherubini, 2010; Ghatak, 2011; Jong et al., 2009). The introduction of new food and non-food crops in cropping systems has been recognized as a lever to meet this challenge. More than ten minor oilseed crops have already been identified as good candidates, owing to their agronomic and industrial characteristics (Aresta et al., 2012; Carlsson, 2009; Vollmann and Laimer, 2013). For example, *Brassica carinata* has been investigated in Italy to produce biodiesel (Cardone et al., 2003; Lazzeri et al., 2009), while the production of *Cuphea* (*Cuphea* sp., Lythraceae) was studied in the Northern Corn Belt for industrial uses (Gesch et al., 2006). *Camelina* (*Camelina sativa* (L.) Crantz) and *Crambe* (*Crambe abyssinica*) were also described as industrial crops suitable to various European environments (Righini et al., 2016; Zanetti et al., 2016, 2017). However, the total surface area under these oil crops is currently very small. Lack of agronomic knowledge, along with technological and socio-economic lock-in, have been identified as obstacles to the development of these diversification crops (Magrini et al., 2016; Meynard et al., 2013).

Camelina is an oilseed crop with specific fatty acid and protein profiles, and consequently with multiple potential food and non-food uses (Righini et al., 2016; Zubr, 1997). It is well suited to a wide range of environments, as shown by trials in Chile (Berti et al., 2011), Australia (Campbell et al., 2013), the United States (Gesch et al., 2017), Canada (Gugel and Falk, 2006) and Europe (Vollmann et al., 2007). Because of its short cycle, around 1200 degree-days with a 5 °C base temperature (Gesch, 2014), camelina can be grown as a second crop: either as a double crop, sown after the harvest of the first crop, or as relay crop, sown in an already established first crop (Berti et al., 2015; Dobre et al., 2014). In the US Corn Belt, winter camelina is considered as an alternative crop to produce fuel and food when double or relay cropped in the fallow-wheat or soybean-maize crop sequences (Berti et al., 2017b; Chen et al., 2015). In Europe, camelina is mostly grown as a spring crop on organic farms to produce oil and press cake for animal feed. In these cropping systems, camelina is often mixed with legumes to avoid weed competition and to enhance nitrogen supply (Paulsen, 2007; Saucke and Ackermann, 2006). With the development of oilseed biorefineries in Europe,

new opportunities are emerging for the camelina market (Zanetti et al., 2013). Hence, to meet future demand, new camelina-based cropping systems are needed.

In order to design sustainable cropping systems, the combination of empirical and scientific knowledge is essential (Girard and Navarrete, 2005; Malézieux, 2012; Toffolini et al., 2016a). In the case of camelina, cultivation areas are still limited in Europe compared to major oilseed crops. Farmers therefore have little empirical knowledge and expertise on this crop. The interest for this crop has increased this last decade, leading to an increase number of scientific publications. Even though, numerous scientific knowledge gaps on camelina genetics, breeding, ecophysiology, management, and uses remain (Berti et al., 2016). Many studies looked up at the effect of various camelina management techniques, such as sowing date, rate and/or depth (Schillinger et al., 2012; Urbaniak et al., 2008), soil tillage (Gesch and Cermak, 2011), nitrogen and sulphur fertilisation (Jiang et al., 2013; Mohammed et al., 2017; Wysocki et al., 2013), or irrigation (Hergert et al., 2016; Hunsaker et al., 2013), on camelina physiology, growth and/or production. All these results might support the design of camelina management. However, they are difficult to be mobilized by farmers for their technical action. For instance, the emphasis of response curves of camelina to nitrogen is a scientific knowledge that justifies for nitrogen inputs, but it does not support farmers to design a nitrogen fertilisation strategy suited to their own environment (i.e. mineral nitrogen content in the soil, weather conditions) and objectives. Hence, there is a need to produce actionable knowledge on camelina, which means knowledge mobilized in and for the design and the implementation of cropping systems.

In agronomy, various methods to produce and capitalize knowledge have been developed to support agricultural change (Doré et al., 2011). Historically, experiments are the most common way to produce agronomic knowledge but they are time-and labour-consuming, and are often thought by researchers only. More recently, expert elicitation (Cornelissen et al., 2003) or on-farm innovations tracking (Salembier et al., 2016) have been proposed as alternative methods to valorise empirical knowledge. Finally, meta-analysis has been used to synthesize available scientific knowledge (Philibert et al., 2012). All these methods require deep expertise or a sound scientific background, neither of which yet exists for camelina.

In design sciences, the C-K theory has been developed by (Hatchuel and Weil, 2003) to model design logics. In this theory, innovative design, which could be helpful to address new issues in agriculture (Berthet et al., 2016; Prost et al., 2016), is defined as a joint expansion of a space of concepts (C) and a space of knowledge (K). More precisely, it means that the exploration of new concepts, i.e. objects to be designed, depends on existing knowledge but also leads to the expansion of knowledge. Thus, a design process generally results in the production of new knowledge or at least in the identification of knowledge to be produced. Until now this theory has been used primarily to support innovative design processes in industry (Hatchuel and Weil, 2009; Potier et al., 2015). Some applications in agriculture can nevertheless be found with the design of agroecosystems (Berthet et al., 2014), the characterization of the knowledge produced during a design process (Prost, 2008) or the identification of knowledge gaps hindering the design (Ravier et al., 2017).

Our study aimed to: (i) identify knowledge gaps that hamper the development of camelina-based cropping systems in northern France; and (ii) produce actionable knowledge, defined here as any knowledge mobilized for the design and the implementation of cropping systems. With the aim of producing knowledge on the introduction of a new crop in current cropping systems, a participatory design approach combining a multi-actor workshop and on-farm trials was developed.

2. Material and methods

2.1. The case study: background and characteristics of the study area

A new company (SAS PIVERT, <https://sas-pivert.com/>) undertook a project in 2012 to develop the basis of an oilseed biorefinery in northern France. The future supply area of the biorefinery corresponded to a fifty-kilometre radius around the city of Compiègne (F.Valter, personal communication, 11 November 2016). The climate of this supply area is oceanic, with a mean annual temperature and rainfall respectively equal to 11 °C and 681 mm, over the 1981-2010 period. The three main types of soil in the area are: (i) deep loamy soil (120 cm) characterized by a high maximum available soil water content (ASW = 175-200 mm); (ii) moderately-deep sandy loamy soil (90 cm; ASW = 150-155 mm); and (iii) shallow limestone soil (60 cm; ASW = 120 mm) (Begon et al., 1977).

This study area is characterised by a diversity of crops, such as winter wheat (*Triticum aestivum* L.), barley (*Hordeum vulgare* L.), maize (*Zea mays* L.), sugarbeet (*Beta vulgaris* L.), potato (*Solanum tuberosum* L.), carrot (*Daucus carota* L.), French bean (*Phaseolus vulgaris* L.), rapeseed (*Brassica napus* L.), and pea (*Pisum sativum* L.). In the supply basin as a whole, twenty-nine typical crop sequences were identified and then classified in three types: (i) short crop sequences with cereals and oilseed crops (3 or 4 years); (ii) medium crop sequences with sugarbeet (minimum 4 years); and (iii) long crop sequences with sugarbeet and/or potato and/or vegetables (maximum 8 years). The spatial distribution of these crop sequences is mainly linked to soil characteristics, with long crop sequences located in the most fertile soils.

2.2. General frame of the participatory design approach

A participatory design approach combining a multi-actor workshop and on-farm trials designed, managed and appraised by farmers was developed. At each step, some of the outputs were used to support the global design process (Figure 9).

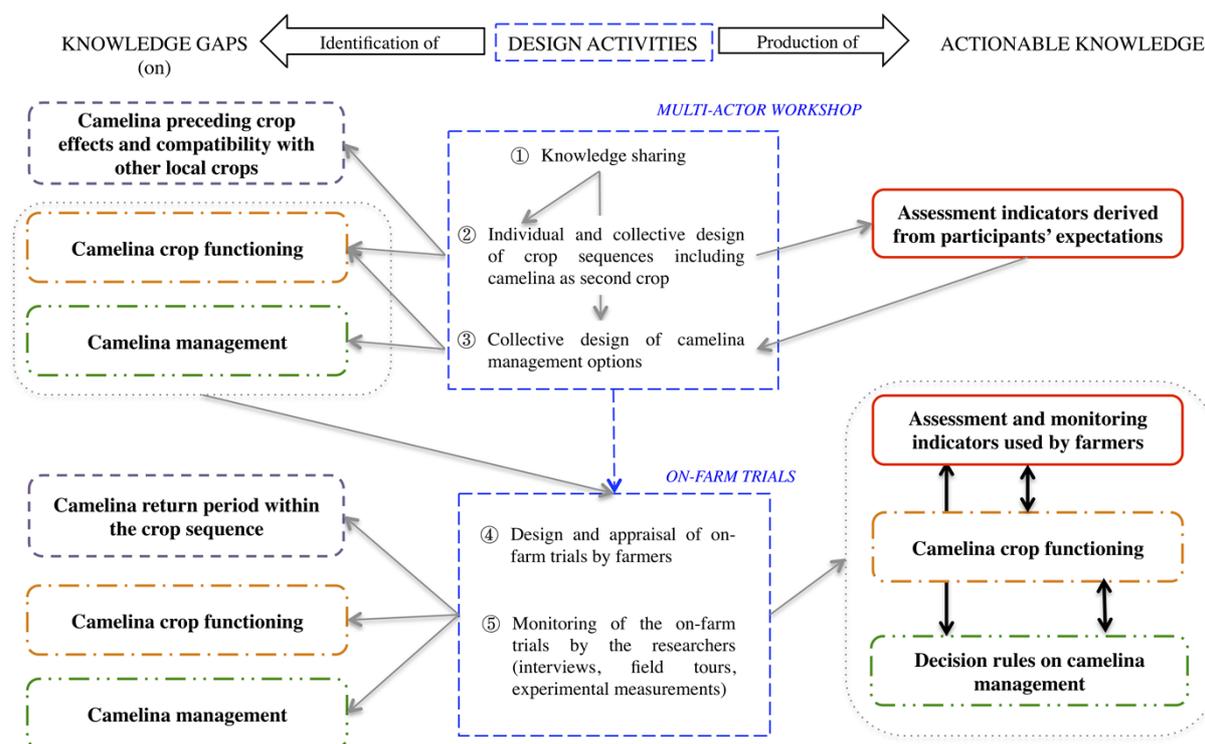


Figure 9. A participatory design approach to produce actionable knowledge and identify knowledge gaps

The objective of the multi-actor workshop was to identify: (i) assessment indicators for camelina and camelina-based cropping systems; and (ii) knowledge gaps hampering the design and implementation of these cropping systems. The workshop involved farmers from the study area, interested in the introduction of camelina and motivated to set up experiments on their own farms, and actors with skills concerning crop management, camelina and oilseed crop processing, or biorefinery processes. Twenty-two individuals attended the workshop: seven farmers, two local advisors from agricultural extension services, one representative of a French technical centre for oilseed and legume crops, Terres Inovia, two researchers specialized in oilseed crops extraction and processing, from the university of Compiègne, two members of oilseed industrial groups (Lesieur and Avril), and two representatives of the company SAS PIVERT. Lastly, four researchers involved in the research project were either facilitators or observers. The workshop was organized in three phases to support design activities. Observers were focused on the participants' questions and expectations, to identify respectively knowledge gaps and assessment indicators.

The objective of the on-farm trials was to create an original experimental device in which farmers were the experimenters who designed, tested and assessed their trials

autonomously. No specific directions were given by the researchers about the camelina crop management options to be tested, or about the observations to make. All the technical choices and decision rules derived from (i) the assimilation by the farmers of the knowledge from the literature shared during the workshop, combined with their expertise on other crops, and (ii) the design activities during the workshop (Figure 9). These trials were monitored in order to: (i) understand the agronomic assumptions underlying the choice of the crop management options tested for camelina; (ii) identify the indicators used by farmers to assess their own trial; and (iii) formulate decision rules on camelina management derived from farmers observations.

2.3. Multi-actor workshop

The one-day multi-actor workshop was organized in June 2017. The first step consisted in sharing knowledge to provide the same initial level of knowledge on camelina to all the participants. Information from the scientific literature about camelina's characteristics, management, industrial uses, and production areas were provided (Berti et al., 2016; Jiang et al., 2013; Righini et al., 2016; Sintim et al., 2016; Urbaniak et al., 2008). Examples of the diversity of cropping systems worldwide that included camelina as a spring or winter crop were also presented (Berti et al., 2015; Chen et al., 2015; Dobre et al., 2014; Saucke and Ackermann, 2006). The second step of the workshop was focused on the introduction of camelina into a crop sequence within the case study area. Each farmer was asked to design one or two crop sequence(s) that included camelina and were suited to one soil type on his own farm. Advisors, researchers, and manufacturers were asked for their questions or their comments on opportunities or warnings regarding the various crop sequence prototypes designed by the farmers. After an individual reflexion, a collective debriefing was held to share, explain, and discuss the proposed crop sequence prototypes and associated remarks. Before starting the last step, the workshop facilitators synthesized this previous exploratory work. The diversity of crop sequences designed was assigned to categories, according to the expectations and the possible industrial uses proposed by the participants. Combining these three aspects, ambitious targets were set for camelina management. The objective of the third step was to collectively design management options for camelina, to reach each target. At the same time, actors of the value chain

were asked to examine the consistency between the farmers' proposals and their own assessment indicators. The entire workshop was recorded. All the supports (paperboard, post-it notes, etc.) were kept to be re-used during the analysis phase.

2.4. On-farm trials

Four farmers who had participated in the workshop set up trials to test and appraise camelina as a second crop on their own farms during the summer and the autumn of 2017 (Table 4).

Table 4. (a) Locations and soil types of the on-farm trials and (b) main climatic characteristics of the growing period for 2017 and for the reference climate (20-years period from 1996 to 2016)

(a) Farmer	Site	Coordinates	Soil type	
1	Estrées Saint Denis	49°25'N; 2°38'E	Deep loamy	
2	Francières	49°26'N; 2°40'E	Deep loamy	
2	Francières	49°26'N; 2°40'E	Shallow limestone	
3	Amy	49°39'N; 2°49'E	Deep loamy-clay	
4	Gury	49°34'N; 2°47'E	Deep loamy-sandy	

(b) Month	Mean temperature (°C)		Rainfall (mm)	
	2017	1981-2010	2017	1981-2010
June	18.8	16.4 (± 0.7)	30.5	65.2 (± 35.1)
July	19.2	18.4 (± 1.4)	40.5	60 (± 27.6)
August	18.4	18.6 (± 1.3)	48	69 (± 34.3)
September	14.4	15.6 (± 1.5)	36	44.8 (± 30.4)
October	13.1	11.7 (± 1.5)	36	60 (± 30.6)
November	6.8	7.1 (± 1.5)	79.5	60.6 (± 28.2)
Mean / Total	15.1	14.6	270.5	359.6

In total, thirteen different crop management (CM) options were designed and tested by the farmers (Table 5). Camelina was introduced either as a relay crop or as a double crop, which means sown respectively in or after the preceding crop. The crop management options CM1 and CM2 consisted in double cropping camelina after the harvest of canned pea respectively in sole crop or intercropped with white clover (*Trifolium repens* L.). The crop management options CM3, CM4, and CM5 consisted in relay-sowing camelina respectively in winter wheat in deep or shallow soil or in winter barley. For these three crop management options, camelina was broadcasted by hand just few weeks before the harvest of the preceding crop, during the ripening, i.e. stage 90

to 99 of the Zadoks scale (Zadoks et al., 1974). Crop management options tested by the farmer 4 (CM6 to CM13) corresponded to camelina double cropped after a winter barley crop. Two types of soil tillage (with or without tillage), two levels of seeding rates (4 or 8 kg ha⁻¹) and two nitrogen strategies (S1 and S2) were combined. For these eight crop management options 0.4 L ha⁻¹ of a broadleaf herbicide (clethodim at 240 g L⁻¹) was applied on July 21. All the farmers used the same spring variety Calena, because of its availability in the French seeds market. The trials were managed without irrigation. Depending on the objectives of the farmers, the total trial area varied from 0.25 to 2.5 ha. Each crop management modality corresponded to a unique strip without replicates (strip dimensions varied depending on farmer equipment) except for CM5 for which an entire field of 2.5 ha was sown (Table 5).

Table 5. Description of the crop management options tested in 2017

Global description of the trial	Crop management tested	Area (ha)	Soil tillage before sowing	Sowing date	Seeding rate (kg ha ⁻¹)	Sowing method ^b	Nitrogen fertilisation strategy ^c
Farmer 1 Camelina as double crop after canned pea	CM1 Sole camelina	0.5	Shallow soil tillage	24 June	4	BS with a slug pellets spreader	-
	CM2 Camelina intercropped with white clover	0.5	Shallow soil tillage	24 June	4 / 2 ^a	BS with a slug pellets spreader (the two crops are mixed)	-
Farmer 2 Sole camelina as relay crop in winter wheat	CM3 In deep soil	0.25	No tillage	30 June	10	BS by hand	-
	CM4 In shallow soil	0.25	No tillage	30 June	10	BS by hand	-
Farmer 3 Sole camelina as relay crop in winter barley	CM5	2.5	No tillage	25 June	4	BS by hand	-
Farmer 4 Sole camelina as a double crop after winter barley	CM6	0.5	Ploughing	6 July	4	RS	S2
	CM7	0.5	Ploughing	6 July	4	RS	S1
	CM8	0.5	No tillage	6 July	4	RS	S2
	CM9	0.5	No tillage	6 July	4	RS	S1
	CM10	0.5	Ploughing	6 July	8	RS	S2
	CM11	0.5	Ploughing	6 July	8	RS	S1
	CM12	0.5	No tillage	6 July	8	RS	S2
	CM13	0.5	No tillage	6 July	8	RS	S1

^a 4 / 2: camelina seeding rate / white clover seeding rate

^b BS: Broadcast sowing ; RS: Row sowing

^c S1:10 kg ha⁻¹ at sowing ; S2:10 kg ha⁻¹ at sowing + 40 kg ha⁻¹ the 31 July

At the beginning of the trials, each farmer was interviewed to describe and explain the modalities tested, and to formulate the underlying hypotheses. The farmers were asked to determine *ex ante* which criteria they would use to appraise their trials, and what exactly they would monitor during the crop cycle, to understand the physiology, the growth and the production of the crop, i.e. the crop functioning, and to test their hypotheses. Between crop flowering and maturity, an individual field tour was organised in each farmer's field. The visit consisted in accompanying and observing farmers while they were examining their own trial. Farmers described and commented crop growth since sowing. Through these interactions, farmers made qualitative appraisals of their trials. At physiological maturity i.e. when the seeds inside the pods were detached from the placenta but were easy to squeeze between the nails (Martinelli and Galasso, 2011), six camelina plots of 0.5 m² were harvest by hand for each modality. All samples were threshed, then dried for 48 h at 80 °C. The harvest was weighed before and after drying, so that grain yield and seed moisture content could be calculated. The six plots were considered as replicates and mean yield for each modality was estimated by averaging the six values. At the end of the experiment, semi-directive interviews were held with each farmer. Six questions were asked to the farmers to guide the discussion: (1) Did the trial meet your expectations? (2) Can you explain the reasons of the success or the failure of your trial? (3) What would you do if you had to sow camelina again as a second crop? (4) Did the trial help you to answer your initial questions? (5) Were new questions raised through the observation of your trial? (6) What did you learn about camelina?

3. Results

3.1. Individual and collective design of crop sequences that included camelina during the workshop

3.1.1. The crop sequences prototypes designed

During the workshop, eight crop sequence prototypes (P) including camelina as a second crop were designed (Table 6). Six of them were directly designed by the farmers and were based on a specific crop sequence already practised on the farm. The other two crop sequence prototypes (P6 and P7) resulted from a co-design involving all the participants. As a second crop, camelina was mostly introduced after winter barley (4 of the 8 prototypes), but was sometimes proposed after winter wheat, winter pea or canned pea. Of the eight prototypes, only two considered camelina mixed with another crop, within no-till or direct seeding farming systems (P5 and P8). Mostly, camelina was added in the crop sequence without any other change. Yet, in some prototypes (P2, P4 and P7) the introduction of camelina led respectively to the discontinuation of rapeseed and to the re-introduction of winter barley or winter pea into the initial crop sequence (Table 6). All the prototypes proposed by the farmers were in soils with low or medium agronomic potential (sandy soil, limestone loamy soil, etc.). In this type of soil, the introduction of camelina as a second crop was identified as an opportunity to: (i) diversify the cropping systems; (ii) increase productivity and profitability; or (iii) replace non-profitable crops because of limiting factors (water, weeds, pests, etc.). By contrast, in deep loamy soils, due to the presence of profitable industrial crops and diversified crop sequences, the introduction of camelina as a second crop was not considered as a viable option, except for specific cases like after early harvested crop as canned pea (P6).

3.1.2. Assessment indicators derived from participants' expectations

The eight crop sequence prototypes, combined in four different ways to introduce camelina, were characterized by a specific combination of farmers' expectations (Table 6). All the prototypes introduced camelina to replace or take the role of a catch crop while increasing profitability.

Table 6. Description of the crop sequence prototypes designed during the workshop

Crop sequence prototypes ^a		Initial crop sequence practised by farmers ^a	Soil type ^b	Category	Farmers' expectations	
P1	Wheat – Wheat – Camelina - Maize – Maize	Wheat – Wheat – Maize – Maize	S			
P2	Wheat – WBarley – Camelina – Wheat – SBarley – Sugarbeet – Wheat - Maize – Wheat	Wheat – WBarley – Rapeseed – Wheat – SBarley – Sugarbeet – Wheat - Maize – Wheat	CL	1	Replace catch crop / Increase profitability	
P3	Rapeseed – Wheat – WBarley - Camelina – Sugarbeet - Wheat	Rapeseed – Wheat – WBarley – Sugarbeet - Wheat	LL	Introducing pure camelina as second crop after a winter cereal		
P4	Sugarbeet – WBarley – Camelina - Wheat – Rapeseed – Wheat – WPea	Sugarbeet – Wheat – Rapeseed – Wheat – WPea	SL or LL			
P5	Potato – Wheat – Camelina/Legume - Carrots /Sugarbeet – Wheat	Potato – Wheat – Carrots /Sugarbeet – Wheat	S	2	Limit mineral nitrogen inputs/ Manage weeds during camelina growing	
P 6	Crop1-Crop2-Canned Pea- Camelina – Crop3 - ...	∅ (collective proposition)	L	3		
P 7	Crop1- Crop2- WPea- Camelina – Crop3 - ...	∅ (collective proposition)	na	Introducing camelina as second crop after a early harvest legume	Limit mineral nitrogen inputs/ Harvest camelina at the right moisture for commercialisation	
P 8	Rapeseed – Wheat – WBarley – Camelina/ Buckwheat ^c - Sugarbeet - Wheat	Rapeseed – Wheat – WBarley – Sugarbeet - Wheat	LL	4	Introducing camelina as second crop intercropped in a full winter crops succession	Manage weeds during camelina growing / Manage weeds at the crop sequence scale

^a WBarley or WPea: Winter barley or Pea; SBarley: Spring Barley

^b S: Sandy soil; CL: Clay-Loamy soil; LL: Limestone Loamy soil; SL: Sandy-Loamy soil; L: Loamy soil; na: No described

^c *Fagopyrum esculentum* Moench

All the categories were also expected to meet some environmental and quality expectations targeted by the other actors of the workshop (advisors, researchers, industrialists): reduction of the greenhouse gases emissions, carbon storage in the soil, low levels of erucic acid content (<5%) and impurities, and high protein or oil content in camelina seeds. Other expectations were more specific to some categories. For example, growing intercropped camelina was expected to manage weeds at the crop scale (categories 2 and 4), while introducing camelina in a winter crop sequence helped to

manage weeds at the crop sequence scale (category 4). Introducing camelina after (or intercropped with) a legume was considered as a way to reduce the use of mineral nitrogen fertiliser and consequently environmental impacts (categories 2 and 3). Finally, introducing camelina after an early crop, as canned pea (category 3), would allow an early sowing that reduces the risk of having a high moisture content in camelina seeds at harvest, which would otherwise require post-harvest drying. Based on these results, we can posit that, to assess camelina production or camelina-based cropping systems for biorefinery, the following indicators are relevant: (1) camelina seed yield, oil and protein content, fatty-acid profile, and seed moisture content at harvest, (2) level of impurities in the harvested camelina production, (3) nitrogen fertiliser rate of camelina, (4) weed pressure, (5) greenhouse gases emissions, (6) soil carbon storage, and (7) profitability.

3.1.3. Knowledge gaps linked to the introduction of camelina in a crop sequence

For economic and agronomic reasons, farmers chose to introduce camelina in shallow soils. However, the capacity of camelina to be grown in such soil types was debated. First, because sandy or limestone loamy soils are characterized by low water content, the ability of camelina to grow in such dry environments was a question raised by farmers. On the other hand, the sensitivity of camelina to waterlogging was also questioned, for clay soils.

In the crop sequence P2, the introduction of camelina led the farmer to remove rapeseed from his crop sequence, assuming that this crop would be sensitive to the same pests as camelina. The sensitivity of camelina to common pests and diseases of the *Brassicaceae* family, such as pollen beetle (*Meligethes aeneus* F.), flea beetle (*Phyllotreta nemorum* L.), or mildew (*Peronospora*), raised the question of the return period to be observed between camelina and other crops from the *Brassicaceae* family within the crop sequence. In two crop sequence prototypes in which camelina was introduced as a second crop after winter barley, camelina was also grown just before sugarbeet (P3 and P8). Because of sugarbeet cyst nematode (*Heterodera schachtii* Schmidt) damage, the possibility that camelina could be a nematode host crop was considered. Intercropping camelina with another crop was suggested to control weeds (§ 3.1.2), but another lever was also examined: the potential allelopathic effect of camelina. More information about

the mechanisms of this effect during camelina development and on the following crops was however required before it could be used to control weeds.

In conclusion, designing crop sequences that included camelina led the farmers to raise specific questions about: (i) crop functioning of camelina; (ii) camelina preceding crop effects and its introduction in the crop sequence (Table 7).

Table 7. Knowledge gaps identified during the design processes

Knowledge gaps (about)	Design of crop sequences with camelina	Design of camelina management options	Design and appraisal of on-farm trials
<i>Camelina management</i>	<i>Sowing</i>	-	Adaptation of the rate and the date according to the sowing method (in row or broadcasted) and the preceding crop.
	<i>Nitrogen Fertilisation</i>	-	Method to estimate N rate to apply Date and form of N application
	<i>Weeding</i>	-	Feasibility of a mechanical or a chemical weeding
	<i>Pests</i>	-	- Control of mildew or white rust. Control of slugs
<i>Camelina crop functioning (physiology, growth, production)</i>	Sensitivity to drying soils. Sensitivity to waterlogging. Sensitivity to pests.	Germination capacity of camelina. Sensitivity of the camelina seeds to heat and drying.	Water requirement and consequences on management (need of irrigation).
<i>Camelina preceding crop effects and introduction in crop sequence</i>	Return period between two camelina or between camelina and crops of the Brassicaceae family. Preceding crop effects on sugarbeet. Allelopathic effects of camelina on the following crops (mechanisms involved and impacts).	-	-

3.2. Collective design of camelina management as a second crop during the workshop

3.2.1. Management options designed

Based on previous information provided during the workshop, the participants decided to work on the following target: “growing low-input camelina as a second crop after winter barley while maintaining quality for high-value products”. For farmers, the two challenges to reach this target were: (i) to develop a camelina cover that would compete with weeds and especially with winter barley volunteers; and (ii) to ensure that the camelina reached maturity before winter. Two management options were collectively designed to meet these challenges: a relay crop and a double crop (Figure 10).

The first management option consisted in early broadcast-sowing of camelina in winter barley few weeks before its harvest, i.e. stage 90 to 99 of the Zadoks scale (Zadoks et al., 1974) (Figure 10a). Neither chemical nor mechanical weed control were considered, because the objective was to benefit from the protection of the preceding crop, combined with a nitrogen fertiliser application to establish a sufficiently competitive crop at barley harvest. The early sowing period might also allow to take advantage of the long and warm days of the summer, and consequently to ensure that the camelina reached maturity around the beginning of October.

For the second management option, camelina was sown in rows after the winter barley harvest (Figure 10b). Soil tillage was done before camelina sowing to bury barley residues that could limit the emergence of camelina. Nitrogen was applied right after sowing to stimulate camelina growth and increase its competitiveness. Weeding was also carried out during crop growth to reduce weed pressure. In this case, camelina maturity and harvesting would coincide, in early November. In view of the climate, high seed moisture content at this time of the year was expected, and would require seeds drying after harvest.

3.2.2. Knowledge gaps linked to camelina management

For both management options, common questions were asked about the amount of nitrogen fertiliser to be applied, and the method to estimate it. The form and the date of nitrogen fertiliser application were also considered, in relation to the European nitrate directive. As camelina is a crop with small seeds, uncertainties remained about

the ability of this crop to emerge when sown by broadcasting (Figure 10a) or sown in rows in dense and green barley straws (Figure 10b). The question was therefore raised of whether to increase the seeding rate, compared with the recommended one (between 2 and 4 kg ha⁻¹) in the French technical documentation on the crop (<http://www.fiches.arvalis-infos.fr/>, <http://www.semest.com/>), in order to enhance camelina soil cover. However the optimal seeding rate to use for camelina remained unfixed. For camelina as a second crop, the feasibility and efficacy of mechanical or chemical weeding were discussed, as no herbicide was certified for camelina, and mechanical weeding was not suitable with dense barley mulch. The date of the weeding operation was also questioned regarding climatic conditions and delay of use before harvest for chemical weeding. Lastly, uncertainty remained about the effect on seeds quality of a post-harvest drying of camelina to reduce seed moisture. In conclusion, the collective design of these two management options allowed us to identify knowledge gaps about: (i) the crop functioning of camelina, and (ii) the management of sowing, nitrogen fertilisation and weed control of camelina (Table 7).

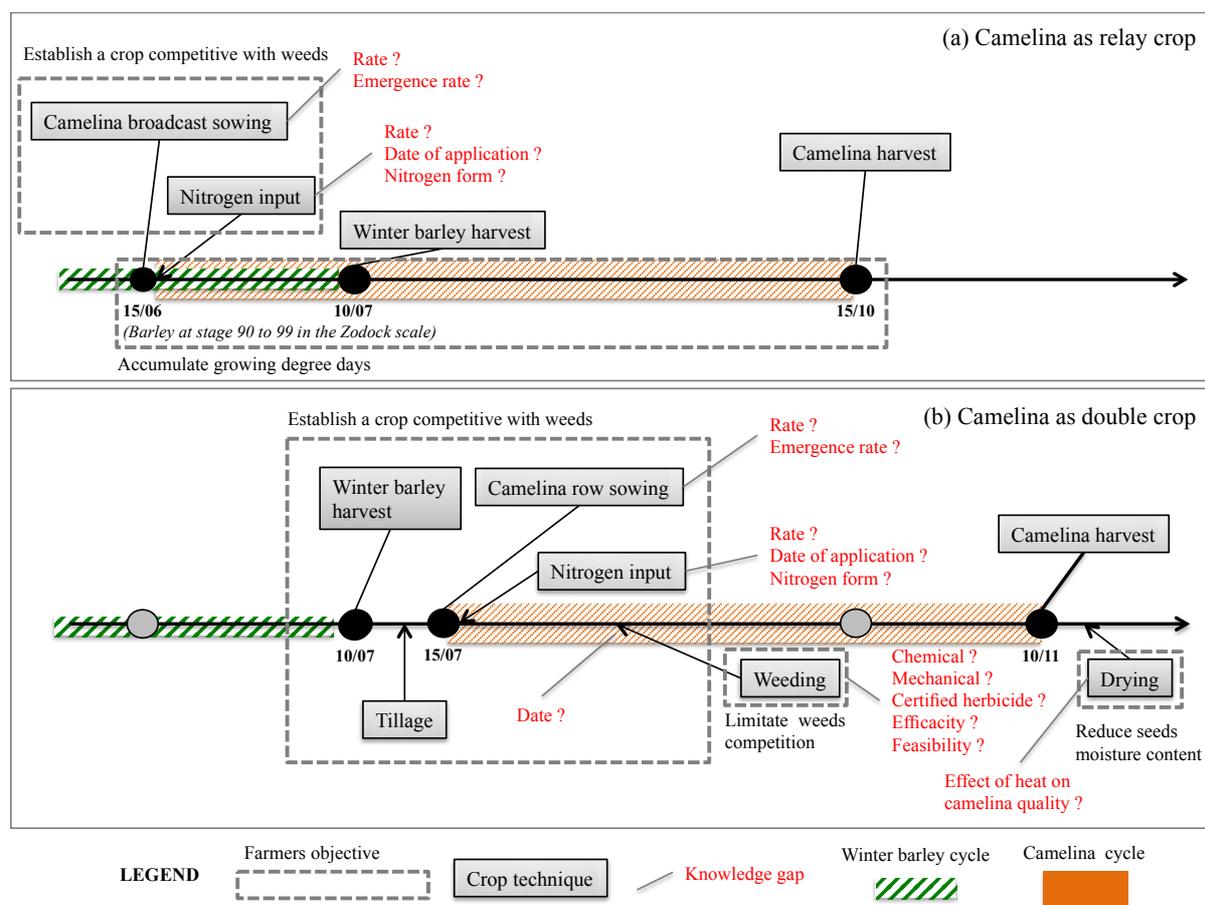


Figure 10. Camelina management options designed during the workshop : Camelina as second crop after barley as relay crop (a) and double crop (b).

3.3. Farmers' design and assessment of on-farm trials

3.3.1. Elicitation of farmers' assessment criteria and monitoring indicators

Through the design of each crop management modality, farmers wanted to test some specific hypothesis about the impact of their practices on camelina physiology, growth and production.

More precisely, farmer 1 wanted to assess the feasibility of growing camelina after canned pea with specific questions about (i) the effect of herbicide residuals from canned pea on camelina and (ii) the effect on weeds of intercropping camelina with a legume (farmer 1, CM2). Farmer 2 and 3 wanted to assess the feasibility of growing camelina after winter cereals (respectively wheat and barley) in different soil types (Table 4a). Farmers 1, 2 and 3 also wanted to assess the effect of broadcast sowing on camelina establishment, the competition between camelina and weeds, and the ability of camelina to reach maturity before the sowing of the following winter crop, when sown at the end of June. The objective of farmer 4 through the design of the crop management options CM6 to CM13 was to assess the effects of: (i) soil tillage on camelina emergence; (ii) seeding rate increase on weeds pressure; (iii) nitrogen fertiliser at sowing combined with herbicide on weed pressure; and (iv) nitrogen fertiliser before flowering on yield. This farmer also wanted to observe the effect of the interactions between the various crop practices tested on yield and weed pressure.

To assess their trials regarding these criteria, farmers used various indicators to appraise camelina development, pest pressure, and camelina performance (Figure 11). Depending on their initial hypothesis not all the criteria were assessed by each farmer (NA in Figure 11). For instance, farmer 4 did not assess the impact of residual herbicide from preceding crop on camelina development and farmers 1 and 2 did not evaluate diseases or pest pressure on camelina. Camelina establishment, sensitivity to herbicide residuals from the preceding crop, and nitrogen status were assessed by means of visual indicators as the emergence rate, the percentage of soil cover, the plant height and vigour, or the leaves' colour and size. For the appraisal of diseases and pests, farmers considered their presence or absence, and their impact on yields. Weeds were assessed based on abundance and plant species, with a distinction between annual and perennial weeds. Abundance of volunteers of the preceding crop was also visually estimated. Date

of maturity was considered as “satisfactory” if camelina maturity occurred before a deadline set by the farmer according to weather and the usual sowing date of the following crop (between 1 and 31 October depending on the farmers). Yield was assessed using the experimental data for each trial. During the interviews, all farmers defined a minimum threshold of 1.5 t ha⁻¹, based on a selling price of 600 € t⁻¹. Based on these observations, the farmers concluded on the suitability of each criterion in relation to their expectations.

Criteria assessed	Indicators used by farmers	Crop Management options ^c												
		CM1	CM2	CM3	CM4	CM5	CM6	CM7	CM8	CM9	CM10	CM11	CM12	CM13
Camelina establishment ^a	Emergence rate	Dark grey	NA	Light grey	Dark grey	Dark grey	Dark grey	Dark grey	Light grey	Light grey	Dark grey	Dark grey	Light grey	Light grey
	Soil cover	Dark grey	NA	Light grey	NA	Dark grey	Light grey	Light grey	Light grey	Dark grey	Dark grey	Dark grey	Dark grey	Dark grey
Sensitivity to herbicides residual	Plant vigour and density	Light grey	NA	Light grey	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Nitrogen status ^b	Plant vigour and height; leaves' colour	Light grey	NA	Dark grey	NA	Dark grey	Dark grey	Dark grey	Light grey	Dark grey	Dark grey	Dark grey	Light grey	Dark grey
Date of maturity ^b	Grain ripening, change in plant colour	Dark grey	NA	Light grey	NA	Dark grey	Light grey	Light grey	Light grey	Light grey	Light grey	Light grey	Light grey	Light grey
Annual weeds ^a	Abundance and species	Dark grey	NA	Light grey	NA	Light grey								
Perennial weeds ^b	Abundance and species	Dark grey	Dark grey	Light grey	Dark grey	Light grey								
Volunteers of the previous crop ^a	Abundance	NA	NA	Light grey	NA	Dark grey	Light grey	Light grey	Light grey	Light grey	Light grey	Light grey	Light grey	Light grey
Diseases ^a	Presence/Absence	NA	NA	Dark grey	NA	Dark grey								
Pests ^a	Presence/Absence	NA	NA	NA	NA	Dark grey	Light grey	Light grey	Light grey	Light grey	Light grey	Light grey	Light grey	Light grey
Yield ^a	Yield value (≥ 1.5 t ha ⁻¹)	Light grey	NA	Dark grey	NA	NA	Dark grey	Light grey	Light grey	Light grey	Dark grey	Dark grey	Light grey	Light grey
FARMER APPRAISAL		Dark grey	Dark grey	Light grey	Dark grey	Dark grey	Light grey	Dark grey	Light grey	Dark grey	Dark grey	Dark grey	Light grey	Dark grey

Figure 11. Farmers’ qualitative appraisal of the on-farm trials (Light grey = satisfactory, Dark grey = satisfactory but with some concerns, Black: unsatisfactory, NA: Non-assessed). ^a assessment indicator, ^b monitoring indicator (used to estimate the N fertilizer rate to be applied or to destroy the crop before harvest), ^c CM1: Pure camelina after canned pea; CM2: Intercropped camelina after canned pea; CM3 and CM4: Pure camelina in winter wheat in shallow and deep soil; CM5: Pure camelina in winter barley; CM6 to CM13: Pure camelina after winter barley; CM6 to CM9= single sowing rate (4 kg ha⁻¹) ; CM8, CM9, CM12, and CM13: no tillage; CM6, CM8, CM10, and CM12: higher nitrogen input (S2).

3.3.2. Farmers’ learning and identification of knowledge gaps

Results of farmers’ qualitative assessment are presented in Figure 11. They found that four crop management options were broadly conclusive (CM3, CM6, CM8, and CM12), although some criteria were considered unsatisfactory. Three crop management options were destroyed by farmers before maturity because of the presence of thistle (*Cirsium Arrvense*) (CM2 and CM4), or because maturity exceeded the deadline (CM5).

The other crop management options were considered as promising but required improvement because they presented both satisfactory and unsatisfactory results.

As the emergence rate of camelina was satisfactory overall, the farmers described camelina as a crop with a good germination capacity. However, they noticed that emergence was strongly determined by sowing method and depth. Deep or broadcast sowing respectively led to heterogeneous emergence times or rates (farmers 4 and 1). Camelina ability to cover the soil was mostly considered as insufficient by farmers because of its morphology (“*it's only a stem with small leaves*”). However, combining a seeding rate of 8 kg ha⁻¹ with a low nitrogen fertiliser rate (10 kg ha⁻¹) at sowing was proposed by one of them (farmer 4) as a technical option to obtain an appropriate soil cover (CM6 and CM8). Based on their findings, farmers concluded that camelina seemed to be insensitive to herbicide residuals from the preceding crop but required nitrogen for its development. Consequently, in order to limit nitrogen fertiliser use, legumes were considered as interesting preceding crops for camelina as a second crop (as a relay or double crop). None of the trials reached maturity before the deadline initially set by the farmers, and when physiological maturity occurred, the estimated moisture content ranged between 11 and 34 %. Considering the weather in 2017, the farmers concluded that camelina growth, and particularly maturity, were impacted by cold temperatures after flowering (Table 4). These findings raised the question of the storage of high-moisture seeds and the technical and economic feasibility of a post-harvest drying. To avoid these problems, all farmers proposed to move sowing forward by about two weeks compared to the sowing dates tested. They did not identify annual weeds as a limiting factor of camelina growth for the year 2017, except for the crop management CM1. In this case, the farmer explained the presence of goosefoot (*Chenopodium album*) in camelina crop because of the failure of weed management in the preceding crop, which had been canned pea. He therefore concluded that soil tillage before sowing to control weeds and limit competition could be useful in the case of a double crop. In addition, because camelina has a limited soil cover capacity, questions about the feasibility of chemical or mechanical weeding during the crop's development remained unanswered. Symptoms (eaten leaves) of grey slugs (*Deroceras reticulatum*) were found in one case (CM5) but no impact on camelina growth was noted. In all trials, white mycelium on the stems and the pods were observed with, in some cases, likely negative impacts on camelina yields. The nature and the origin of this disease, possibly downy

mildew caused by *Peronospora parasitaca* or white rust caused by *Albugo Candida* (Séguin-Swartz et al., 2009), were presented as crucial questions for farmers if they were to design an appropriate management approach limiting the risk of occurrence. Of the ten yield values estimated, six were considered as satisfactory by farmers while only one (CM3) was significantly below the threshold of 1.5 t ha⁻¹ (Figure 12). According to the farmer, the low density and a nitrogen deficit could explain this low value. However, he had managed his trial not with the aim of assessing the production level, but of appraising the feasibility of growing camelina as a second crop after wheat. Accordingly, he considered his trial to be conclusive even if yield was low. Because most trials were totally or partially conclusive, farmers confirmed their wish to introduce camelina in their cropping systems. They therefore raised questions again about the return period between two camelina crops, and the compatibility between rapeseed and camelina in time and space. The water requirements of camelina were moreover identified as another knowledge gap hindering the design of camelina-based cropping systems in a context of climate change. In conclusion, through the design and assessment of on-farm trials managed and appraised by farmers, actionable knowledge for the design and the implementation of camelina-based cropping systems was produced, such as assessment and monitoring indicators (Figure 11), or decision rules on camelina sowing management as second crop (Table 8). Moreover, knowledge gaps were identified about camelina crop functioning and management of pests, N fertilisation and weeds (Table 7).

Table 8. Example of decision rules for the management of camelina based on farmer's observation

Farmers' observations	Decision rules
Presence of annual weeds when camelina is sown as double crop (CM1).	If camelina is double cropped, a shallow tillage is needed between the harvest of the preceding crop and camelina sowing to limit weeds growth.
Late maturity of camelina for all the trials.	When camelina is introduced as second crop, if possible, camelina has to be sown in the first fortnight of June, otherwise it could be better to choose an earlier maturing cultivar than Calena.
Heterogeneous emergence rates when camelina is broadcast at low density (CM1, CM3 and CM5) and heterogeneous emergence times when camelina is row-sown deeply (2 – 3 cm).	When camelina is broadcast, camelina seeding rate can reach 10 kg ha ⁻¹ to obtain a good emergence rate and soil cover. If it is row-sown, seeding rate can be lower (around 6 kg ha ⁻¹) but sowing has to be very shallow to avoid heterogeneous emergence and then heterogeneous maturity time.

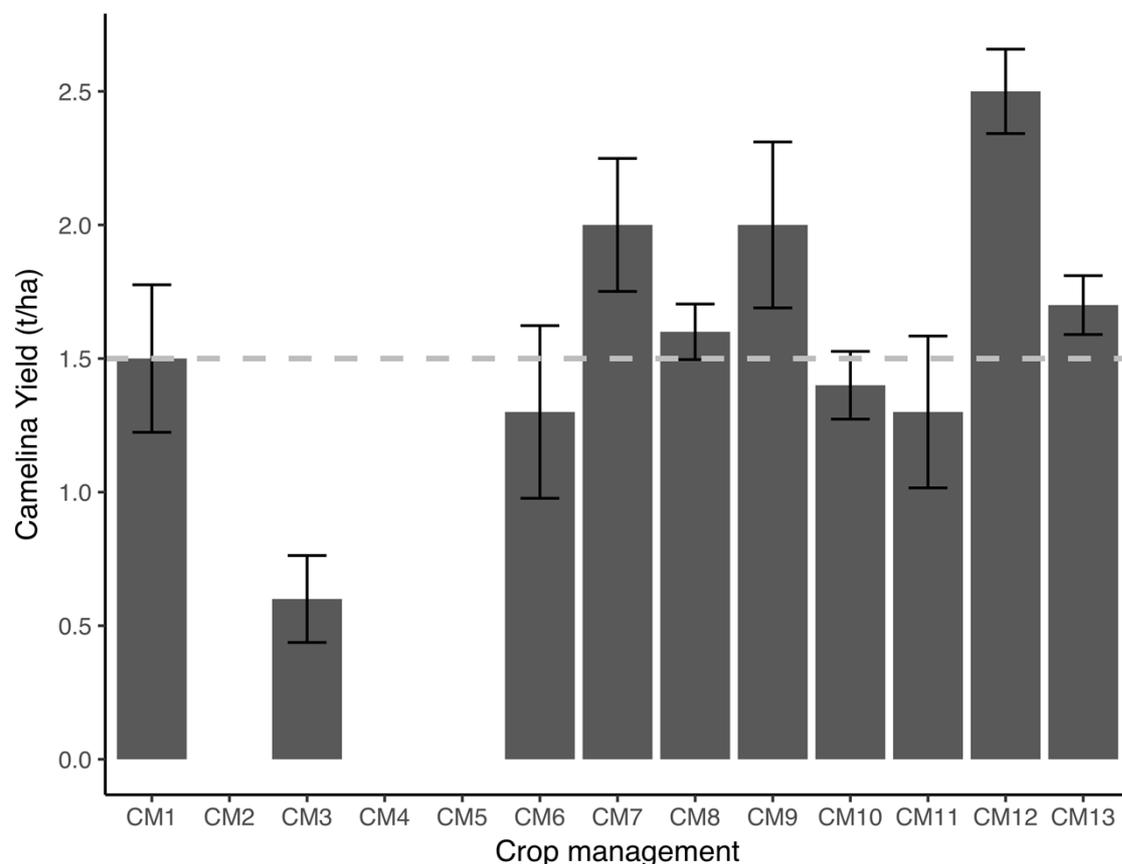


Figure 12. Camelina yields measured in the on-farm trials. Dotted line represents the threshold of 1.5 t ha⁻¹ defined by the farmers as acceptable for camelina yields. Each value is the mean of six repetitions across each strip. Missing values are due to the destruction of the trials by farmers before the maturity of camelina. CM1: Pure camelina after canned pea; CM2: Intercropped camelina after canned pea; CM3 and CM4: Pure camelina in winter wheat in shallow and deep soil; CM5: Pure camelina in winter barley; CM6 to CM13: Pure camelina after winter barley; CM6 to CM9: single sowing rate (4 kg ha⁻¹); CM8, CM9, CM12, and CM13: no tillage; CM6, CM8, CM10, and CM12: higher nitrogen input (S2)

4. Discussion

4.1. **Contribution of our approach to the production of actionable knowledge**

Actionable knowledge can be defined as any knowledge mobilized or produced in/for action (Argyris, 1996). For instance, in agronomy it has been described as knowledge that can support decision making and design processes by stakeholders (Geertsema et al., 2016) or by farmers (Ravier et al., 2017b; Toffolini et al., 2014). Considering this definition, actionable knowledge was produced by (i) identifying monitoring and assessment indicators; (ii) formulating farmers' decision rules for camelina management; and (iii) better understanding camelina crop functioning.

Monitoring indicators have already been reported to be used by farmers during the design of agricultural systems (Toffolini et al., 2016b). More precisely, farmers mobilized these indicators throughout the crop cycle to assess their practices and adapt their management (Meynard, 2014; Salembier et al., 2016). We observed this in our study when farmers managed their own trials. For example, when farmer 4 noticed, from the colour of the leaves, that his camelina was depressed during vegetative growth ("*some leaves were yellow*"), he chose to compare four additional modalities in his field, in which an additional N fertiliser rate of 40 kg ha⁻¹ was applied (CM 6, 8, 10, and 12). The usual assessment indicators developed in the literature (Bockstaller et al., 1997; Bockstaller et al., 2009) cannot be considered as actionable knowledge because they are used at the end of the design process for ex-ante assessment, generally to compare cropping system prototypes or for the selection of the most promising ones (Craheix et al., 2012; Sadok et al., 2009). However, in our study, assessment indicators were defined early in the design process, and were used during the next steps of the approach (Figure 1). First, they contributed to the definition, during the workshop, of a set of objectives shared by all the actors (e.g. the ambitious target) for the design of crop management options. Second, farmers took these assessment indicators into account in the design, management, and appraisal of their own trials. For instance, we noticed that, even though they were unable to appraise grain quality themselves, they mentioned this assessment indicator during the interviews as an additional criterion needed for a complete evaluation of their trials. Unfortunately, as none of the trials reached maturity

before the deadline considered as acceptable by the farmers in 2017, no qualitative analyses on the grains were carried out because it would not be representative.

During the final interviews, farmers spontaneously proposed changes to be implemented in their camelina crop management options in order to meet their objectives. This shows that they followed a process of continuous improvement of their crop management as described in the PDCA (Plan-Do-Check-Act) loops (Meynard et al., 2002; Platje and Wadman, 1998). More precisely, they applied the decision rules and the knowledge about camelina functioning derived from their understanding of the relationship between their observations and their practices (Do/Check) to re-design (Act) their initial intentions (Plan).

4.2. Contribution of our approach to the identification of relevant topic lines for research programs

Our approach contributed to identifying knowledge gaps about camelina management, crop functioning, and preceding effect that hampered the introduction of camelina in cropping systems of northern France (Table 7).

Some of them can be considered as partial knowledge gaps because scientific knowledge is available on the topics but it has to be adapted to the farm conditions of the study area (climate, soils, crop sequences, or farmers' equipment). For instance, Hunsaker et al. (2011) studied camelina water use, and determined evapotranspiration crop coefficients to provide farmers practical tools to manage camelina irrigation in arid regions. These results could be helpful to fill the gap in knowledge on camelina water requirement mentioned by farmers of the study area, and answer the question of the possible need of irrigation for camelina as second crop, sown at the beginning of the summer. Moreover, while the on-farm trials highly contributed to answer the questions raised during the workshop about camelina sowing management by learning-by-doing, the mobilization of previous findings (Berti et al., 2011; Pavlista et al., 2011; Schillinger et al., 2012; Sintim et al., 2016; Urbaniak et al., 2008) to support these decisions rules for sowing could be valuable.

Other knowledge gaps identified in the study also had been reported to feed further research activities in a recent review about camelina, as the need to understand camelina response to waterlogging or the need to develop efficient weed control

strategies (Berti et al., 2016). However, not all the knowledge gaps mentioned in this review were pointed out by local actors as hampering the design of camelina-based cropping systems in northern France. Therefore, our approach contributed to prioritised knowledge gaps among a list of generic scientific areas needing research, which, by definition, cannot support practical purposes (Naustdalslid, 2011; van Kerkhoff and Lebel, 2006).

On the contrary, our work also allowed farmers to identify needs for research not reported in the scientific literature, such as the allelopathic effects of camelina on following crop. Walsh et al. (2014) studied the allelopathic effects of camelina on wild oat (*Avena fatua*), flax (*Linum usitatissimum*), and radish (*Raphanus sativus*), but no others studies were reported. Yet, the knowledge of the preceding effect of a crop when studying its introduction in cropping systems used to be essential. Other knowledge gaps identified by farmers had not been reported elsewhere, probably due to their high anchorage to the case study and the farming systems considered. For instance, no specific studies concerned the compatibility of camelina with sugarbeet or rapeseed in the crop sequence, as the studied cropping systems with camelina did not include these crops (Berti et al., 2015; Dobre et al., 2014; Gesch and Archer, 2013). Berthet et al. (2016) showed that identifying accurate knowledge gaps can be helpful to build participatory action research programs, and several authors have considered them as the best way to produce actionable knowledge (Evans et al., 2012; Onguene et al., 2011; Theau et al., 2010).

4.3. An original participatory design approach

Even if several participatory design approach have already been proposed (Cardoso et al., 2001; Falconnier et al., 2017; Husson et al., 2016; Le Bellec et al., 2012; Lefèvre et al., 2014; Moraine et al., 2017a; Reau et al., 2012; Sautier et al., 2017; Vereijken, 1997), our approach differs from them in: (i) the actors involved; (ii) the progress of the workshop; and (iii) the on-farm trials implemented by the farmers.

Participatory design is characterized by the involvement of farmers and/or experts in the design process, as opposed to model-based cropping systems design (Jeuffroy et al., 2008; Lançon et al., 2008). Some approaches also propose the involvement of additional stakeholders such as agricultural technical advisors, NGOs or

State representatives (Cardoso et al., 2001; Moraine et al., 2017a). However, to our knowledge, industrialists or researchers from industrial processing have never been involved in the design process of cropping systems, which are not their usual object for innovation.

Moreover, when various actors were involved, several workshops used to be organized over time but each actor did not participate in all of them (Le Bellec et al., 2012; Lefèvre et al., 2014). In our case study, a single multi-actor workshop was preferred to enhance interactions between the participants and to support the collective identification of a panel of shared assessment indicators for emerging value chains based on camelina (Meynard et al., 2016). Usually, cropping system prototypes (e.g. both crop sequence and management) are designed using agronomic logics (Lefèvre et al., 2014; Reau et al., 2012; Vereijken, 1997). We chose to first design crop sequences with camelina, before camelina crop management options. This chronology could be discussed from an agronomic perspective, but the distinction between these two steps allowed for a better understanding of farmers' expectations and questions at each step, and helped actors without agronomic skills to identify some strengths and weaknesses in relation to their own activities (Moraine et al., 2017b). They consequently contributed to the collective definition of a desirable future, i.e. the ambitious target (Béguin et al., 2012).

In the literature, several types of on-farm trials following design activities are described. In Reau et al. (2012), only one farmer set up on his farm the prototype specifically designed by the collective for his situation, while in Cardoso et al. (2001) and Falconnier et al. (2017), each farmer of the group chose the most appropriate prototypes for his situation to test them on his farm. In our case, each farmer designed his own trial adapted to his own objectives and constraints, but also inspired by the design of the crop sequence prototypes and the crop management options during the workshop. The farmers thus ran a heterogeneous network of on-farm trials characterized by a diversity of modalities tested, field observations, and indicators. Also, an original monitoring approach combining interviews, field tours, and experiments was proposed to enhance the interactions between the researchers' scientific knowledge and the farmers empirical knowledge (Doré et al., 2011; Girard and Navarrete, 2005; Lefèvre et al., 2014; Malézieux, 2012). Using such types of on-farm trials has inherent limits due

to the farmers' autonomy in the trial management, and to the heterogeneity of the network, for they preclude the statistical analysis that is usually carried out in multi-environment experimental trials (Dejoux et al., 2003; Fan et al., 2007; Loyce et al., 2012; Mohammadi et al., 2010). In our case study, for example, the fact that farmers decided to destroy camelina before maturity stage because of weeds, led to missing values in our yield analysis (Figure 12). Clearly, scaling out major conclusions from this type of on-farm trial and, more generally, capitalizing on and validating empirical knowledge is now a real challenge for scientists (Doré et al., 2011).

4.4. The need for combining a multi-actor workshop and on-farm trials to foster the production of actionable knowledge on a little-known crop

In the literature, design workshops and on-farm trials are shown to be used independently for the design of cropping systems (Husson et al., 2016; Lefèvre et al., 2014; Sautier et al., 2017; Simon et al., 2017), and the implementation of each device is shown to have led to knowledge production. However, by combining the multi-actor workshop and the on-farm trials, we fostered synergies that made it possible to produce specific knowledge that otherwise would not have emerged.

For instance, from on-farm trial appraisal, farmers concluded that there were benefits to have legumes preceding camelina as a second crop. Yet, during the workshop, they did not propose crop sequences with camelina after legumes. In fact, this proposition emerged from a collective aim of “establishing a camelina crop that is competitive with weeds while meeting environmental expectations” by mobilizing participants' knowledge about legumes' effects as a preceding crop, camelina capacity to cover soil and sensitivity to weeds, and nitrogen dynamics. One farmer decided to introduce camelina after canned pea on his farm (CM1 and CM2) because of the contribution of canned pea residues to enhancing mineral N in the soil and because it was a crop that was harvested early. Amongst other things, this trial specifically helped to produce knowledge about the effects on camelina of legume as a preceding crop, which led farmers to see the benefits of legumes.

We also noticed that the collective and accurate identification of knowledge gaps during the workshop affected farmers' individual design of on-farm trials. In the case of camelina after winter barley, two crop management options were proposed, based on

the initial knowledge shared at the beginning of the workshop and the individual knowledge of each participant. During the design phase, the actors expressed uncertainties about camelina seeding rate, nitrogen fertilisation rate, and the impact of cereal straw residues. Based on these findings, farmer 4 designed a factorial trial combining these three elements (i.e. eight crop management options), which afforded an understanding of their individual and combined effects.

Based on these two examples, we showed that the combination of a multi-actor workshop and on-farm trials resulted in the production of actionable knowledge because it enhanced the actors' large exploration of the ideas as exposed in the C-K theory (Hatchuel and Weil, 2009). Moreover, it seems that the workshop also helped farmers to overpass fixation effects that are common in collective innovative design (Agogu e et al., 2014a 2014b). Regarding initial propositions from farmers in the workshop and modalities tested on field, it is clear that the on-farm trials network would have been totally different if the workshop had not occurred. Finally, this combined approach also allowed the integration of the users (i.e. actors of the value chain) into the various design activities that contributed significantly to turning the desirable into the achievable (B eugin, 2003).

5. Conclusion

In the particular case study of growing camelina as a second crop in northern France, we combined a multi-actor workshop and on-farm trials to identify assessment and monitoring indicators and decision rules for camelina management. We also produced knowledge about camelina crop functioning to support the design of camelina-based cropping systems for supplying a local biorefinery. Knowledge gaps identified should be helpful to guide the production of knowledge on camelina with more classical scientific tools, such as modelling or analytical experiments. More broadly, we demonstrated that participatory design could be used to: (i) support the production of actionable knowledge at a low cost; (ii) mobilize existing knowledge for action; and (iii) pursue the identification of a line of work for research-action programs. Lastly, the combination of a multi-actor workshop and on-farm trials appears to be a fruitful way to support the design of diversified cropping systems that include little-known crops such as camelina, and the setting of research priorities for these crops.

Acknowledgements

This work was carried out in partnership with the SAS PIVERT, as part of the Institute for Energy Transition (ITE) P.I.V.E.R.T (www.institut-pivert.com), selected as one of the “*Investissements d’Avenir*”. It received State support under the Future Investments Program with reference number ANR-001-01. This study contributed to the CONSYST project of the GENESYS research program carried out by the SAS PIVERT. It was also implemented under the umbrella of IDEAS (Initiative for Design in Agrifood Systems). We thank all the participants of the multi-actor workshop, and particularly Philippe Carpentier, Vincent Cavrois, Alex Vandeputte, and Vincent Vecten who set up trials on their farms and contributed significantly to this work. We are grateful to Christophe Chatain (*Chambre d’Agriculture des Hauts-de-France*) and Jérôme Le Nôtre (SAS PIVERT) for their help in the organisation of the multi-actor workshop.

Préambule aux chapitres 2 et 3

Conception et évolution du réseau d'essais multi-local et pluriannuel

La question de la gestion des adventices sans utiliser d'herbicide nous a semblé intéressante à traiter dans le cadre de la thèse en raison du manque de connaissances sur cette thématique pour la cameline mais également en raison du contexte de bioraffinerie, dans lequel des itinéraires techniques à bas niveaux d'intrants sont recherchés pour limiter, à l'échelle de la chaîne de production, les impacts environnementaux.

En parallèle d'un traitement de référence (SD), s'appuyant sur une gestion par lutte chimique des adventices, trois stratégies alternatives ont été conçues en mobilisant des connaissances sur (i) la conduite de la cameline dans l'Oise et ailleurs, (ii) des pratiques alternatives aux herbicides mobilisées sur d'autres cultures, notamment le colza et (iii) les systèmes de culture présents dans la région d'étude (Figure 13). Nous avons fait le choix, souvent pour des raisons pratiques ou de faisabilité technique, de ne pas explorer certaines voies (en gris et pointillé dans la Figure 13, par exemple : le désherbage mécanique, l'association avec des cultures non présentes dans la zone d'étude, etc.). La conception des itinéraires techniques associés à chaque modalité a, par ailleurs, mobilisé des connaissances sur la gestion de la fertilisation azotée et la gestion des associations de culture (en vert dans la Figure 13). Un suivi expérimental a ensuite été déterminé pour permettre de tester nos hypothèses sur la gestion des adventices et plus globalement pour permettre une évaluation multicritères de ces itinéraires techniques dans une perspective de bioraffinerie (voir le protocole expérimental en Annexe 1). Ce protocole expérimental a été conçu avec l'équipe technique de l'UMR Agronomie, puis, a été présenté et discuté au cours d'une réunion (février 2017) avec les agriculteurs volontaires pour mettre en œuvre ces essais dans leur exploitation et leur conseiller agricole.

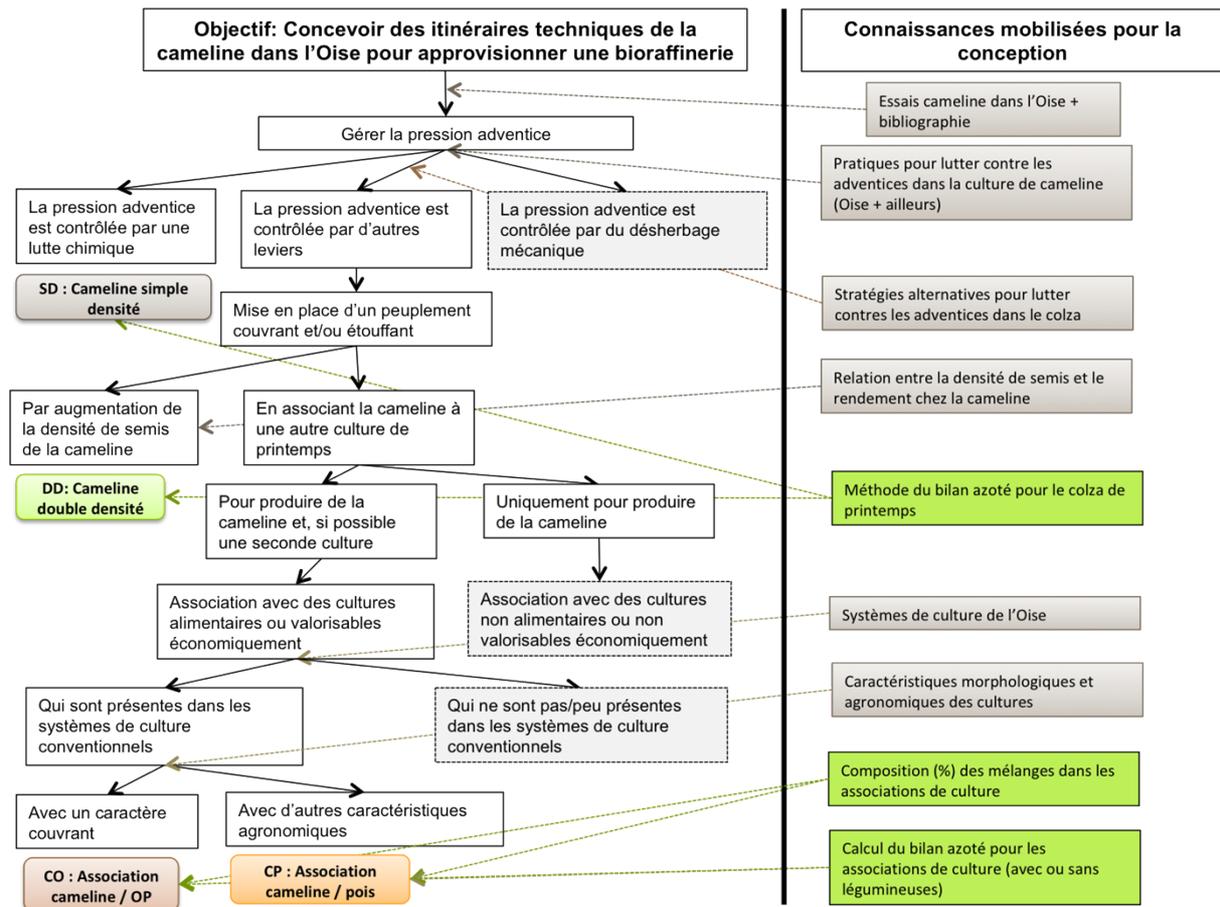


Figure 13. Schéma du raisonnement de conception des modalités testées au sein du réseau multi-local et pluriannuel

Après la première année d'expérimentation (printemps 2017), une réunion d'échange autour des résultats a été organisée en janvier 2018 (Annexe 2), et a conduit à une évolution du dispositif expérimental en 2018. En effet, compte tenu de la forte compétition de l'orge sur la cameline, la mise en place d'une cinquième modalité avec une densité de semis d'orge réduite (25 % de la densité optimale) a été proposée par les agriculteurs. Les principaux éléments de l'itinéraire technique et les hypothèses associées aux cinq modalités sont présentés dans la Figure 14.

Ce cinquième traitement n'a pas été intégré dans le CHAPITRE 2, visant à étudier l'effet des différents itinéraires techniques sur la biomasse adventices pour bénéficier d'un dispositif équilibré nécessaire à l'analyse statistique mise en place. En revanche, les données de ce cinquième traitement (CO_25) ont été intégrées à l'analyse de la variabilité du rendement et de la qualité des grains de cameline (CHAPITRE 3), permettant ainsi d'explorer une gamme plus diversifiée de situations.

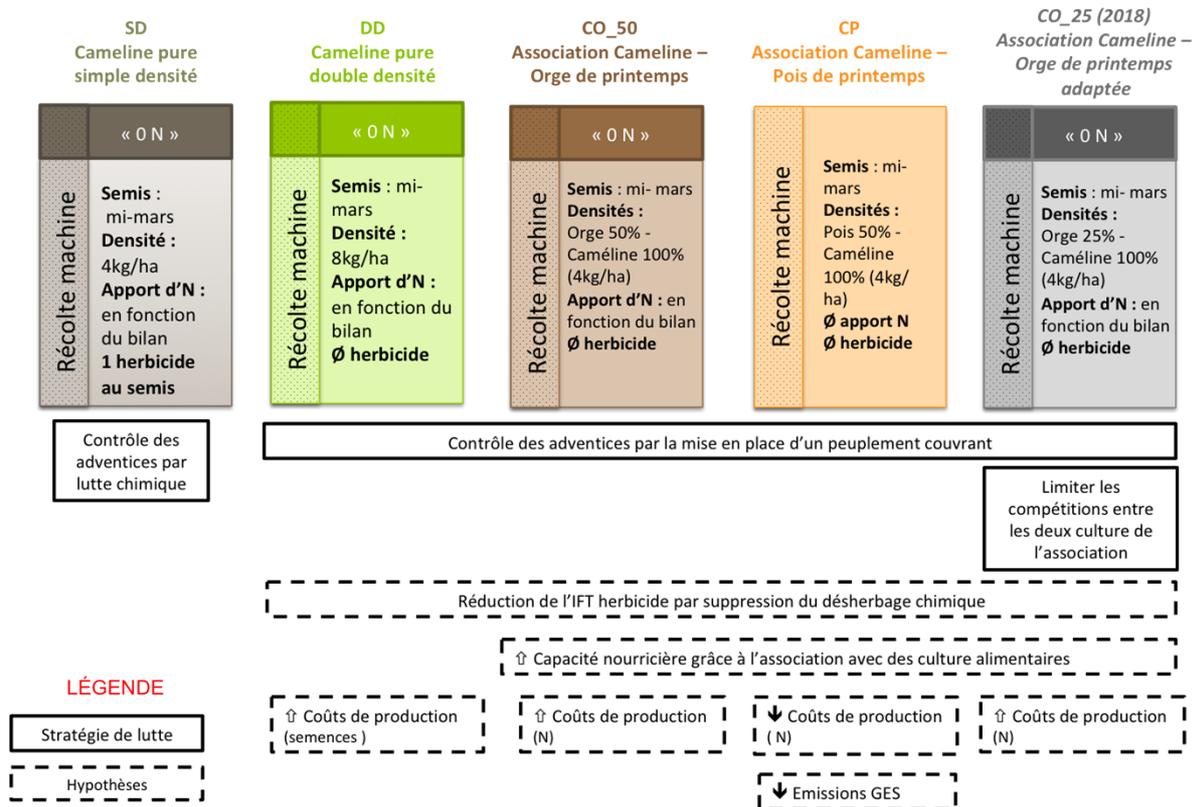


Figure 14. Principaux éléments de l'itinéraire technique des cinq modalités testées dans le cadre du réseau multi-local et pluriannuel et hypothèses associées.



CHAPITRE 2

Contrôler la pression adventice dans la cameline avec des itinéraires techniques innovants sans herbicide dans différents environnements



Ce chapitre a fait l'objet d'une publication scientifique dans la revue 'Industrial Crops and Products' et d'une communication orale lors du congrès annuel de la Société Américaine d'Agronomie (ASA) en 2018.



Leclère, M., Jeuffroy, M.-H., Butier, A., Chatain, C., Loyce, C., 2019. Controlling weeds in camelina with innovative herbicide-free crop management routes across various environments. *Industrial Crops and Products* 140, 111605. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111605>

Leclère, M., Loyce, C., Jeuffroy, M.-H. Assessment of camelina crop management options without herbicide across a multi-environment trial in Northern France. 2018 ASA and CSSA Meeting, 04-07 November 2018, Baltimore, ND, USA.

Dans le CHAPITRE 1 nous nous sommes intéressés, entre autre, à la production de connaissances issue d'un dispositif expérimental original, mis en place et évalué par des agriculteurs de manière autonome. Dans ce deuxième chapitre, nous nous appuyerons sur un dispositif expérimental agronomique plus classique, où quatre itinéraires techniques de la cameline ont été testés, en 2017 et en 2018, dans différents environnements représentatifs du bassin d'approvisionnement. Plus particulièrement, ce deuxième chapitre s'intéresse à la capacité de ces quatre itinéraires techniques à limiter la pression adventice dans la culture de cameline.

Nous montrons que les modalités alternatives sans herbicide (*i.e* la double densité et les associations de culture) permettent de réduire significativement la biomasse adventice par rapport au témoin avec herbicide. Puis, nous mettons en évidence que la biomasse adventice est également impactée par le milieu et le système de culture mis en place par l'agriculteur (absence ou présence de travail du sol, longueur de la rotation). Compte tenu de leur capacité à limiter la pression adventice, sans diminuer le rendement de cameline par rapport au témoin, l'augmentation de la densité de semis et l'association de la cameline avec du pois, semblent être des propositions prometteuses pour introduire la cameline dans l'Oise.

Controlling weeds in camelina with innovative herbicide-free crop management routes across various environments

Margot Leclère^a, Marie-Hélène Jeuffroy^a, Arnaud Butier^a, Christophe Chatain^b, Chantal Loyce^a

^a UMR Agronomie, INRA, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, 78850, Thiverval-Grignon, France

^b Adane, Association de développement agricole du Nord-Est, Rue Adrien-Lhomme, 60400, Noyon, France

Highlights

- Herbicide-free camelina crop management routes were designed to compete with weeds
- Weed biomass was lower for each herbicide-free alternative than for the chemical weed control
- Increased camelina sowing rate reduced weed biomass and maintained camelina yield
- Camelina-barley intercrop significantly reduced weed biomass and camelina yield
- Camelina-pea intercrop highly reduced weed biomass without reducing camelina yield

Abstract

Camelina (*Camelina sativa* L. Crantz) is a minor oilseed crop identified as a candidate crop for biorefinery in Europe. This crop should therefore meet specific quantitative, qualitative and environmental requirements. Weeds have been identified as a major problem for growing camelina. Weed competition may result in low camelina yields and poor seed oil quality. Herbicide application during the crop cycle is moreover often not effective enough and does not match with a sustainable production. This study aimed at assessing the effect of four crop management routes (CMRs) on weed biomass and camelina yields across various environments in northern France. Three spring camelina

CMRs without herbicide were specifically designed: one consisted in doubling camelina sowing rate (DD), and two others consisted in intercropping camelina with either barley (CB) or pea (CP). These CMRs were compared with a current chemical weeding-based crop management route (SD). These four CMRs were tested in nine on-farm trials covering two growing seasons and three soil types. Crop and weed biomass were measured at camelina flowering and maturity stages, and crop yields were estimated at harvest. Across the nine environments, crop biomass was significantly higher in both intercrops than in pure stand (SD and DD). Weed biomass varied across CMRs and environments, and was negatively correlated with total crop biomass, thus explaining the better weed control observed in the intercrops. Considering the nine environments, DD and CP did not significantly impact camelina yields in comparison to SD. However, camelina yields were reduced by 90% in CB due to strong competition from barley. In conclusion, both DD and CP seemed to be promising alternatives to reduce weed competition without using herbicides. In the future, multi-criteria assessment covering quality, environment, and economic performances would be useful to conclude on the implementation of these CMRs in on-farm conditions.

Keywords: *Camelina sativa*; Weed control; Intercropping; Zero-herbicide; Multi-environment trial

1. Introduction

Camelina (*Camelina sativa* L. Crantz) is a minor oilseed crop that is increasingly considered to be a promising new crop in various environments across the world (Angelini et al., 1997; Berti et al., 2011; Bonjean and Le Goffic, 1999; Chaturvedi et al., 2018; George et al., 2017; Vollmann and Laimer, 2013; Zanetti et al., 2013). This renewal of interest has been motivated by both industrial and agronomic characteristics (Berti et al., 2016; Righini et al., 2016). Indeed, camelina has multiple food and non-food uses because of its diversified and unique fatty acid and protein profiles. For example, camelina oil can be used for biofuel production (Mohammad et al., 2018) or agrochemicals (Pernak et al., 2018), while its proteins can be used in chemicals such as wood adhesive (Zhu et al., 2017). Camelina has been also investigated as feed for livestock and fish farming (Juodka et al., 2018; Yildiz et al., 2018). Concerning its agronomic traits, camelina is: (i) tolerant to drought and low temperatures (Hunsaker et al., 2011; Putnam et al., 1993); (ii) not very sensitive to current pests of the Brassicaceae family (Soroka et al., 2017); and (iii) requires few nutrients (Mohammed et al., 2017). It has also been reported to be a short-cycle crop, requiring around 1200 growing degree-days with a 5°C base temperature to reach maturity (Gesch, 2014). However, to be used for biorefinery – i.e. the sustainable production of food and non-food products based on biomass (Aresta et al., 2012; Cherubini, 2010; Jong et al., 2009) –, camelina crop will need to meet quantitative, qualitative and environmental requirements.

Weeds are a major problem for growing camelina (Berti et al., 2016; Lenssen et al., 2012). The presence of weeds can impact both seed yield and quality: either by increasing the amount of impurities in the harvest, or by competing with camelina for light, water or nitrogen. For example, competition for nitrogen have been shown to decrease camelina seed yields, protein content, and polyunsaturated fatty acids percentages, as these variables positively respond to nitrogen (Jiang et al., 2013; Jiang and Caldwell, 2016). Additionally, the use of chemical weeding during the crop cycle is not fully effective to manage weeds. Camelina is tolerant to only a few broadleaf herbicides, most of which are characterized by a narrow spectrum of action (Berti et al., 2016; Obour, 2015). Moreover, most pre-emergence herbicides cause injuries on camelina, even if yield is not affected (Jha and Stougaard, 2013; Scheliga and Petersen, 2016). At the same time, European agriculture is facing new challenges, such as the

reduction of pesticides use, in order to meet environmental and human health expectations (Aubertot et al., 2007; Barzman and Dachbrodt-Saaydeh, 2011). Few studies have so far investigated zero-herbicide alternatives to control weeds in camelina crop, including mechanical weeding (Heiska et al. 2009) and intercropping (Saucke and Ackermann, 2006), and they were conducted in organic systems only. Designing camelina crop management routes that effectively reduce weeds without using herbicides therefore seems to be a priority to sustainably introduce this diversifying crop into the French – and even European – conventional agricultural systems.

Several alternatives to chemical weeding have been reported in the literature for crops other than camelina (Wei et al., 2010). Among existing alternatives, promoting crop-weed competition has recently been presented as a key component in the biological regulation of weeds, i.e. using natural processes as competition (Petit et al., 2018). Crop-weed competition can be enhanced using various agronomic techniques (Sardana et al., 2017). One option consists in increasing the sowing rate of the crop to increase the use of resources by the crop at the expense of the weeds (Carlson and Hill, 1985). Increasing sowing rates have been shown to be an effective way to reduce weed biomass in several crops, such as rice (*Oryza sativa*), oat (*Avena sativa*), and wheat (*Triticum sativum*) (Dass et al., 2017; Li et al., 2018; van der Meulen and Chauhan, 2017). Another option consists in introducing a third competitor into the crop-weed system that can modify the dynamics of resource use and consequently crops' competitiveness against weeds (Carton et al., 2018). This other competitor can be a non-harvested cover crop (Amossé et al., 2013) or an intercropped cash crop (Corre-Hellou et al., 2011). Both positive and negative effects on yield or biomass production are reported for these alternative strategies. For example, Bajwa et al. (2017) illustrated, with several examples in Australia, a positive effect on wheat yields of increasing sowing rates, except in some specific low rainfall regions in which higher wheat sowing rates induced lower grain size, thus reducing yields. Similarly, intercrops and especially cereal-grain legume intercrops have been shown usually to lead to higher and more stable grain yields than sole crops (Bedoussac et al., 2015; Hauggaard-Nielsen et al., 2001), even though some studies showed no significant yield difference between intercrop and pure stand crop, depending on location or crop management (Naudin et al., 2010; Pelzer et al., 2012).

Our study aimed to assess the effect of three herbicide-free crop management routes based on enhancing camelina-weed competition (in comparison with a herbicide-based camelina crop management route) on (i) weed biomass and (ii) camelina yield, in a range of environments in northern France. This work was based on experimental data from a multi-environment trial, designed in the context of a sustainable introduction of camelina in the cropping systems of northern France for industrial uses.

2. Material and methods

2.1. The multi-environment trial

Nine trials (named as environments hereafter) were settled in farmers' fields in northern France: five in 2017 and four in 2018 (Table 9). Monthly mean temperatures (°C) and cumulated rainfall (mm) during the growing period (March to July) for 2017, 2018, and a reference period of twenty years (1996-2016) are presented in Figure 15. The year 2017 was characterized by two months (April and June) with dryer conditions than the reference period. In 2018, mean monthly temperatures were higher than the reference period, except in March. A period of drought was also observed in June 2018, with significantly lower rainfall than for the reference period.

Farmers' fields were selected among the three main soil types encountered in the study area (Table 9). Four environments (E1, E3, E4, and E9) were characterized by a deep loamy soil with (i) a high silt content, (ii) a soil depth around 120 cm, (iii) a high available soil water content (ASW = 175-200 mm), and (iv) a high yield level (wheat potential yield varying from 9 to 10 t.ha⁻¹). Two lower-yielding environments (E5 and E6) were characterized by a moderately deep sandy soil (high sand content, soil depth = 90 cm, and ASW = 150 mm, wheat potential yield varying from 6 to 8 t.ha⁻¹). The last three environments (E2, E7, and E8) were in shallow calcareous soils, mainly characterized by a heterogeneous soil depth (from 60 to 90 cm), a high CaCO₃ content, and variable potential yields, ranging from 5 to 8 t.ha⁻¹ for wheat (Table 9). Long crop rotations including a diversity of species (cereals, industrial crops, legumes, or oilseed crops) were mainly grown in the experimented fields, except for E1 and E6 characterized by short crop rotations (Table 9). The preceding crop for all the trials was winter wheat. Occasional ploughing was practiced in 6 of the 9 environments, while E5

and E6 were characterized by no ploughing for at least ten years. Minimum tillage combined with a direct seeding system was practiced on the E8. Each environment was thus described by the combination of a year, a location, a soil type and a cropping system practiced by the farmer (Table 9).

Table 9. Description of the nine environments of the experimental network. Each environment corresponds to a combination of a year, a location, a soil type and a cropping system.

E ¹	Year	Location and coordinates	Field soil characteristics				Cropping system characteristics	
			Soil type	Soil texture	CaCO ₃ (%)	Wheat potential yield (t.ha ⁻¹)	Tillage system ²	Crop rotation type ³
1	2017	Amy 49.655°N, 2.825°E	Deep loamy (L)	Silt loam	3	9 to 10	OP	Short <i>OSR-W-B</i>
2	2017	Autrêches 49.444°N, 3.126°E	Shallow calcareous (C)	Silt loam	32	7	OP	Long <i>Po-W-SB-W-OSR-W-B</i>
3	2017	Moulin-sous-Touvent 49.456°N, 3.072°E	Deep loamy (L)	Silt loam	5	9	OP	Long <i>Po-W-SB-W-Pea-W</i>
4	2017	Mortemer 49.570°N, 2.680°E	Deep loamy (L)	Loam	2	9	OP	Long <i>Pea-W-OSR-W-LS-W</i>
5	2017	Rethondes 49.417°N, 2.939°E	Moderately deep sandy (S)	Loamy sandy	18	6 to 7	NP	Long <i>Po-W-SB-W-M-W-B</i>
6	2018	Amy 49.655°N, 2.825°E	Moderately deep sandy (S)	Sandy loam	< 1	8	NP	Short <i>W-M</i>
7	2018	Autrêches 49.444°N, 3.126°E	Shallow calcareous (C)	Silt loam	15	8	OP	Long <i>Po-W-SB-W-Pea</i>
8	2018	Gury 49.570°N, 2.799°E	Shallow calcareous (C)	Sandy clay loam	60	5 to 7	MTDS	Long <i>OSR-W-M-W-B-SB-W</i>
9	2018	Moulin-sous-Touvent 49.456°N, 3.072°E	Deep loamy (L)	Silt loam	1	9	OP	Long <i>Po-W-SB-W-Pea-W</i>

¹E: environment

²OP: Occasional Ploughing, NP: No Ploughing, MTDS: Minimum-Tillage Direct Seeding

³OSR: Oilseed rape (*Brassica napus*), W: winter Wheat (*Triticum aestivum*), B: winter Barley (*Hordeum vulgare*), Po: Potato (*Solanum tuberosum*), SB: Sugarbeet (*Beta vulgaris*), M: Maize (*Zea mays*)

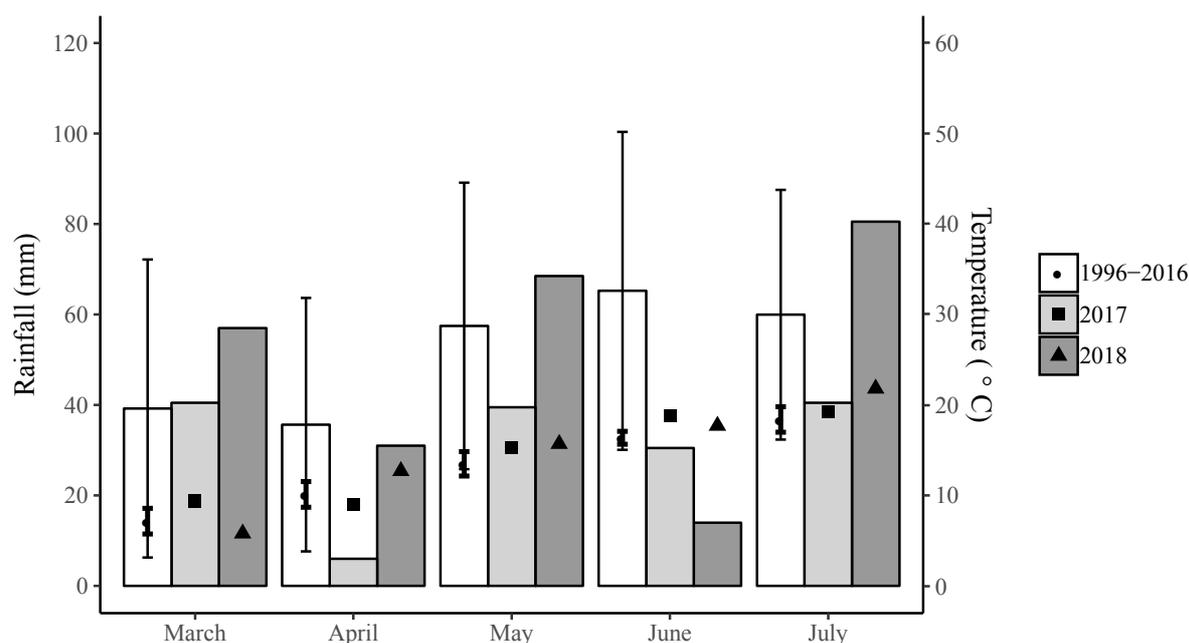


Figure 15. Monthly rainfall (in mm) and monthly mean temperatures (in °C) during the growing season of camelina for 2017, 2018 and the 20-year reference period (1996-2016). Monthly rainfalls are represented with bars and mean temperatures with points. Error bars for the reference period correspond to the inter-annual variability across the twenty-year period. The weather data used were those of the Estrées-Mons meteorological station (49.875°N, 3.031°E), extracted from the on-line platform CLIMATIK (https://intranet.inra.fr/climatik_v2/ClimatikGwt.html).

2.2. Camelina crop management routes

Four camelina crop management routes (CMRs) were tested on each trial of the multi-environment network (Table 10). The first one (SD) corresponded to a CMR advised by agricultural extension services and was used as a control. This CMR was characterized by the application of a pre-emergence herbicide (Novall: 400 g.l⁻¹ metazachlor + 100 g.l⁻¹ quinmerac) just after sowing to control weeds. In the case of filtering sandy soils (E5 and E6), the rate was reduced from 1 l.ha⁻¹ (the preconized rate) to 0.8 l.ha⁻¹ to avoid diffuse pollution (Table 10). Three alternative CMRs to control weeds without using an herbicide were designed. All these CMRs were based on increased soil coverage to compete against weeds. The first strategy consisted in doubling the camelina sowing rate (DD) and the second one in intercropping camelina (Table 10). Only food crops were chosen as candidates for intercrop, to promote the “food first” strategy for biorefinery. These crops were also already grown in the study

area for the sake of technical feasibility. Two intercrops were tested: spring barley (*Hordeum vulgare*), a cereal known to compete fiercely with weeds (CB), and spring pea (*Pisum sativum* L.), a legume with specific agronomic characteristics, as the symbiotic fixation of atmospheric nitrogen (CP). Barley and pea were sown at half of the sowing rate recommended in the study area (Table 10), and two varieties, widely spread in the area, were used (Sangria and Kayanne for spring barley and spring pea respectively). The variety Calena was used for camelina. The experiments did not receive any fertilisation based on soil mineral N measurements performed before sowing; nor did they receive irrigation, fungicides, or insecticides. The trials were sown on the 16th and the 23rd March respectively in 2017 and 2018. All trials were harvested at the maturity stage of camelina, on the 17th July for both years, after 1178 growing degree-days in 2017, and 1244 growing degree-days in 2018 (5 °C base temperature).

Table 10. Description of the four camelina crop management routes tested in the multi-environment trial, and the associated hypotheses related to weed control. In the three alternative crop management routes (DD, CB and CP), no herbicide was applied. For the intercrops (CB and CP), barley and pea respectively were sown at half of the advised rate.

Camelina crop management route	Hypotheses related to weed control	Sowing rate		Herbicide application (Novall)	
		kg.ha ⁻¹		l.ha ⁻¹	
		Camelina	Intercrop	Sandy soils	Other soil types
SD Pure camelina at Single Density	Weeds are controlled by chemical weeding (current management route)	4	-	0.8	1
DD Pure camelina at Double Density	Camelina competition against weeds is enhanced by doubling camelina sowing rate compared with SD	8	-	0	0
CB Camelina intercropped with Barley	Camelina competition against weeds is enhanced by intercropping camelina with a competitive spring cereal	4	70	0	0
CP Camelina intercropped with Pea	Camelina competition against weeds is enhanced by intercropping camelina with a legume	4	100	0	0

2.3. Experimental design and main measurements

On each field, four large strips were sown. Each strip corresponded to a crop management route. The dimensions of the strips were adapted to each farmer's field and equipment, with a minimal area of 0.25 hectares for each strip. Based on discussions with farmers and field observations, strips were located in the most homogeneous part of the field. However, if a soil gradient was suspected, strips were positioned perpendicularly to it. Lastly, strips were organized to avoid herbicide discharge between the SD and the other crop management routes.

Six plots of 0.25 m² were sampled on each strip at camelina flowering and maturity stages (respectively stage 65 and 85 on the BBCH scale, Martinelli and Galasso, 2011). Weeds, camelina, pea, and barley were separated, and then dried for 48h at 80°C to measure the aerial biomass of each species (named as biomass hereafter). At maturity, camelina, pea, and barley samples were threshed, and grains were dried and weighed to measure the yield of each species. At both dates, the total aerial crop biomass (named as total crop biomass hereafter) was defined as the camelina biomass for the SD and DD crop management routes, and as the sum of the camelina biomass and the corresponding intercrop (respectively pea and barley) for the CP and CB crop management routes.

2.4. Statistical analysis

All analyses were performed with the statistical software R (version 3.5.1, 2018). In order to test the significance of crop management and environment effects on total crop biomass and weed biomass at flowering and maturity stages, and on camelina yield, four statistical models, including either no effect, or CMR or environment effect, or both (Table 11) were compared using the Akaike information criterion (AIC, Akaike 1987), as previously done by Pelzer et al. (2012). In these models, soil, year, site, rotation, and soil tillage effects were confounded with the environment effect, which is considered as a random effect. Parameters were estimated from individual data using different functions, depending on the model type (Table 11). The model with the lowest AIC was considered as the model that fitted best with the data. The selection of the best model made it possible to conclude about the significance of the crop management effect or the environment effect (Table 11). In the cases where the best model was one with a

crop management effect (M2 or M4), the significance of this effect was also tested in an analysis of variance (using the Anova function of the R package “car”). When the crop management effect was significant, the difference between crop management routes was evaluated using a Tukey test with a 0.05 confidence level. For pea and barley yields, only the environment effect was analysed using the same method (comparison of M1 and M3 models). Finally, considering the thirty-five crop management route by environment combinations studied (named as situations hereafter), linear regression was estimated to analyse the effect of the total crop biomass on weed biomass at harvest.

Table 11. Description of the four models tested with the data to identify the significance of the environment and the crop management effects on total crop biomass, weed biomass and yields.

Model	Equation ¹	Model type	Function used for the parameter estimation	Significant effect(s) if best model
M1	$Y_{ijk} = \mu + \varepsilon_{ijk}$	Regression model	glm (package nlme)	Neither crop management nor environment effects
M2	$Y_{ijk} = \mu + t_i + \varepsilon_{ijk}$	Regression model	glm (package nlme)	Only crop management effect
M3	$Y_{ijk} = \mu + E_j + \varepsilon_{ijk}$	Mixed model	lmer (package lme4)	Only environment effect
M4	$Y_{ijk} = \mu + t_i + E_j + \varepsilon_{ijk}$	Mixed model	lmer (package lme4)	Both crop management and environment effects

¹ where Y_{ijk} is the measurement of the variable for the kth repetition (k=1 to 6) of the ith crop management (i= 1 to 4) in the jth environment (j= 1 to 9), μ is the global mean, t_i is the fixed crop management effect, E_j is the random environment effect ($E_j \sim iid N(0, \sigma_E^2)$), and ε_{ijk} is the residual associated to Y_{ijk} ($\varepsilon_{ijk} \sim iid N(0, \sigma^2)$).

3. Results

3.1. Total crop biomass

Considering all the crop management routes, the average total crop biomass varied across environments from 244 to 520 g.m⁻² at flowering, and from 303 to 786 g.m⁻² at maturity. At both stages, the model M4 explained the best the total crop biomass (lowest AIC, Table 12), meaning that both crop management route and environment had a significant effect on this variable. The analysis of variance confirmed the significance of the crop management route effect at both stages ($p=1.24 \times 10^{-5}$ and $p < 2.2 \times 10^{-16}$ respectively). More precisely, the crop management route explained 10% and 44% of the variability of total crop biomass observed at flowering and maturity respectively. At flowering, the total crop biomass for the DD and CP crop management routes did not differ significantly from the SD crop management route (Figure 16). At this stage, the total crop biomass for the CB crop management route was significantly higher than the other three (417 g.m⁻² compared to 339 g.m⁻² on average for the other three CMRs; Figure 16). At maturity, only the DD crop management route did not differ significantly from the control SD. The CB crop management route had the higher total crop biomass of the four CMRs with a production of 698 g.m⁻² compared to a production of 435, 466, and 603 g.m⁻² respectively for SD, DD, and CP (Figure 16).

Table 12. Akaike information criterion (AIC) for the four models tested (described in Table 3), for the total crop biomass and the weed biomass at two stages (flowering and maturity), and for camelina, pea and barley yields. For each variable studied, the lowest values, which correspond to the best model, are in bold. For barley and pea yields, only M1 and M3 were compared.

Model	Total crop biomass		Weed biomass		Yield		
	Flowering	Maturity	Flowering	Maturity	Camelina	Barley	Pea
M1	2592	2829	2286	2400	3360	791	861
M2	2590	2780	2290	2396	3261	-	-
M3	2434	2708	2121	2249	3295	758	833
M4	2416	2588	2122	2221	3095	-	-

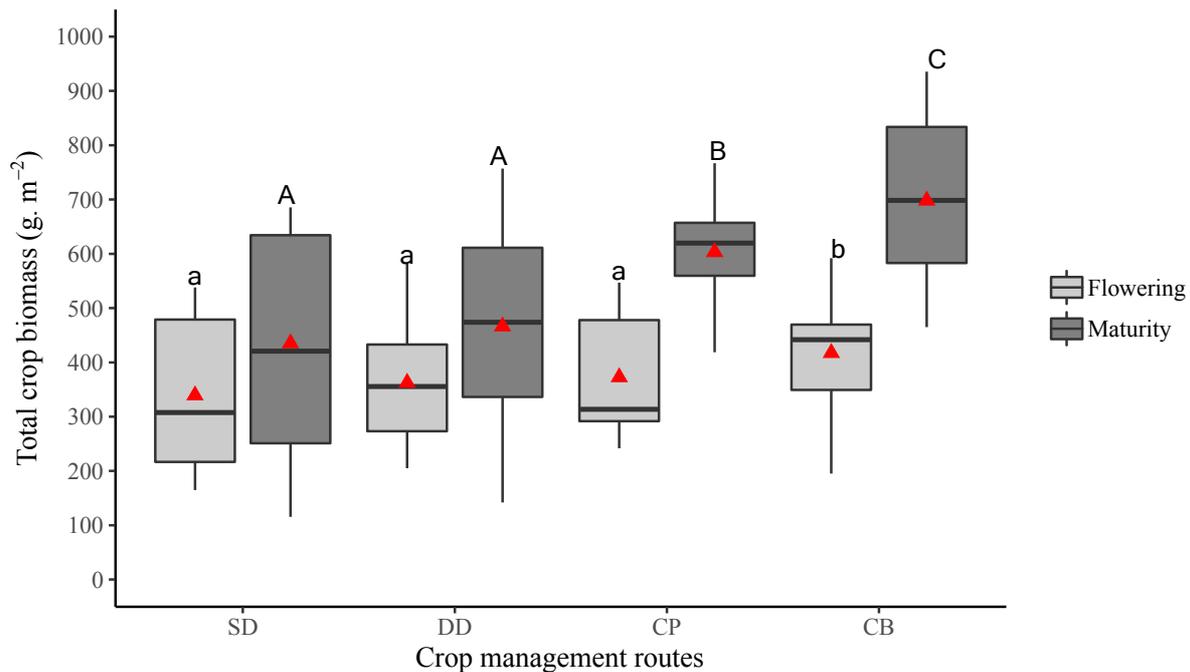


Figure 16. Average (triangle), median (bold black line), 25th and 75th percentiles (black fine line) of the total crop biomass (g.m^{-2}) for the four camelina crop management routes at flowering and maturity. SD: Camelina single density, DD: Camelina double density, CP: Camelina/Pea intercrop, CB: Camelina/Barley intercrop. Different letters indicate significant mean differences between crop management routes according to Tukey test at 0.05 confidence level. Lowercase letters are for flowering and capital letters for maturity.

3.2. Weed biomass

Weed biomass varied from 3 to 179 g.m^{-2} , and 13 to 219 g.m^{-2} respectively at flowering and maturity across the environments. At flowering, AIC for Models M3 and M4 were quite similar (2121 and 2222 respectively; Table 12). However, the lowest value was for the M3 and the analysis of variance run on M4 did not show a significant effect of CMR ($p=0.14$), indicating that only the environment had a significant effect on weed biomass at flowering (Figure 17a). At maturity, the lowest AIC was for Model M4 (Table 12), indicating that both environment and crop management route significantly affected weed biomass. At this stage, CMR significantly affected weed biomass ($p=1.95 \times 10^{-7}$) and explained 15% of the variability of weed biomass. At this stage, weed biomass in the control (87 g.m^{-2}) was significantly higher than in the DD and CP crop management routes (respectively 61 and 65 g.m^{-2}). The CB crop management route showed the lowest weed biomass (36 g.m^{-2}). For the SD, DD, and CP crop management routes, outliers were observed, meaning that some environments had much higher weed biomass than the others (Figure 17a). These outliers corresponded to the environments

E5 and E6, both characterized by a sandy soil and a no-ploughing tillage system (Figure 17b).

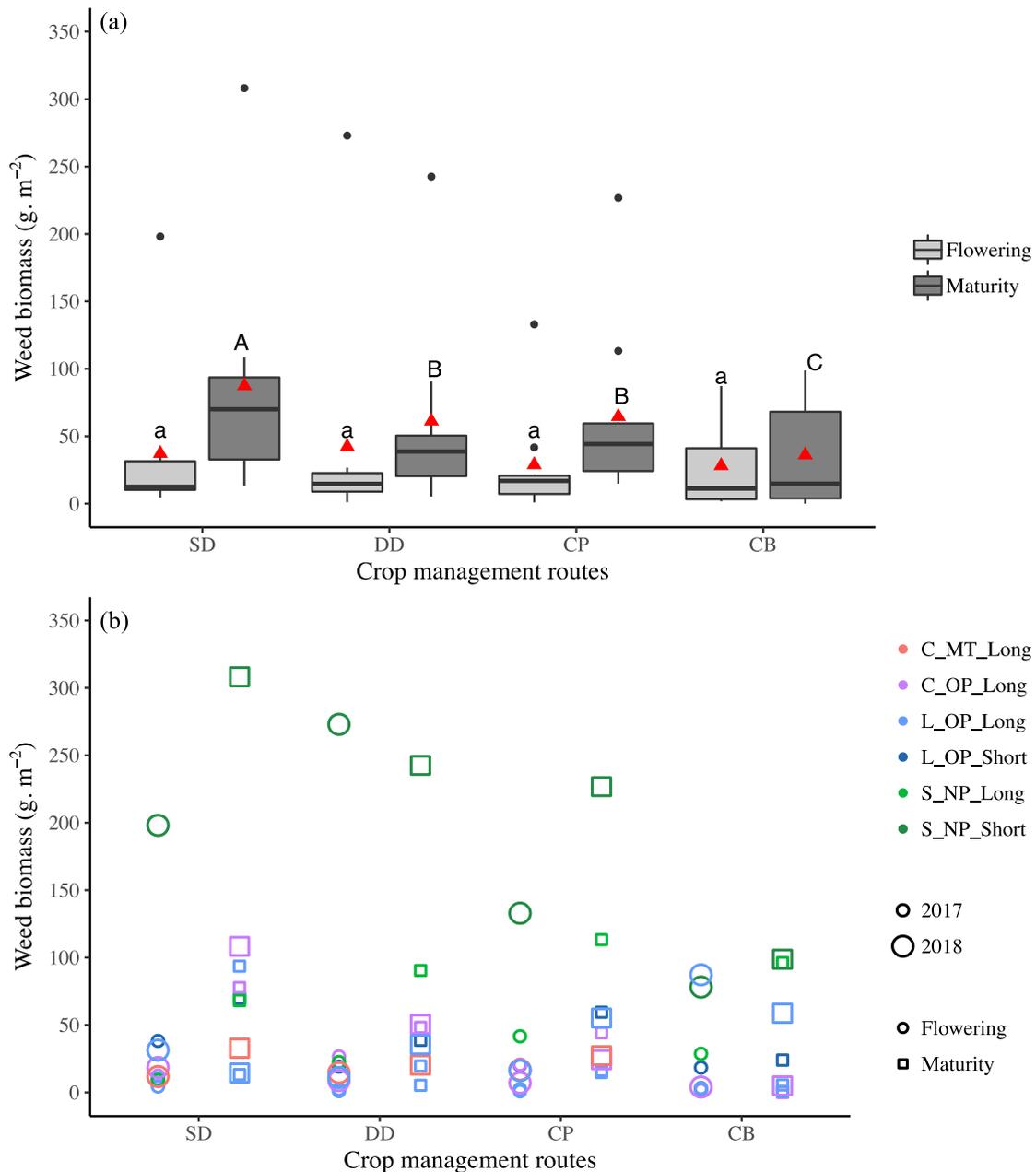


Figure 17. (a) Average (triangle), median (bold black line), 25th and 75th percentiles (fine black line) of the weed biomass (g.m⁻²) and outliers (small black point) for the four camelina crop management routes at flowering and maturity, and (b) weed biomass for each environment and crop management route at flowering and maturity. In (a), different letters indicate significant mean differences between crop management routes according to Tukey test at 0.05 confidence level. Lowercase letters are for flowering and capital letters for maturity. In (b), shape, colour of the outline, and symbol size represent respectively the stage, the “soil type by tillage system by crop rotations length” combination, and the year. Acronyms signification are SD: Camelina single density, DD: Camelina double density, CP: Camelina/Pea intercrop, CB: Camelina/Barley intercrop, C_MT_Long: calcareous-minimum tillage-long crop rotation, C_OP_Long: calcareous-occasional ploughing-long crop rotation, L_OP_Long: loamy-occasional ploughing-long crop rotation, L_OP_Short: loamy-occasional ploughing-Short crop rotation, S_NP_Long: sandy-no ploughing-long crop rotation, S_NP_Short: sandy-no ploughing-short crop rotation.

3.3. Effect of total crop biomass on weed biomass at maturity

Weed biomass was negatively correlated to total crop biomass at maturity ($p < 0.0001$, $R^2=0.4$; Figure 18). For the situations (i.e. the crop management route by environment combinations, see 2.4.) with high total crop biomass production ($\geq 600 \text{ g.m}^{-2}$), weed biomass was low, ranging from 0 to 94 g.m^{-2} . All these situations corresponded to environments with occasional ploughing in deep loamy or shallow calcareous soils (Figure 18). They also mainly corresponded to the crop management routes CB or CP (11 over 17 situations, Figure 18). For the situations with lower crop biomass production ($< 600 \text{ g.m}^{-2}$), higher weed biomass was observed overall (95 g.m^{-2} on average, compared to 30 g.m^{-2} on average for the high biomass situations), but with a larger variability, ranging from 14 to 308 g.m^{-2} (Figure 18). More precisely, high weed biomasses were observed in environments characterized by sandy soil with no ploughing, with the highest values when, in addition, the crop rotation practised was short, whereas the lower ones corresponded to the environment with minimum tillage and direct seeding systems (E8) or to SD and DD crop management routes in environments in loamy soils with occasional ploughing combined with long crop rotation (Figure 18).

3.4. Crop yields

Camelina yields varied between 311 and 1725 kg.ha^{-1} across environments. The comparison of the AIC of the four statistical models showed that both environment and crop management route significantly affected camelina yield (Table 12). Crop management route had a significant effect on camelina yield ($p < 2.2 \times 10^{-16}$) and explained 64% of the variability of camelina yield. Average camelina yield of the control (SD) reached 1289 kg.ha^{-1} (Figure 19a). Camelina yields for the DD and CP crop management routes did not significantly differ from the control but the yield for the DD crop management route was significantly higher than for the CP (1401 and 1214 kg.ha^{-1} respectively; Figure 19a). Camelina yield for the CB crop management route was rather stable across environments but was much lower than the other three CMRs (148 kg.ha^{-1} ; Figure 19a). For each CMR, higher camelina yields were mostly observed in the environments in loamy soils and with occasional ploughing, while lower ones mainly corresponded to environments in sandy soils without ploughing (Figure 19b).

Pea and barley average yields reached respectively 1157 and 3540 kg.ha⁻¹ and yields of these crops varied across environments (Table 12, Figure 19a). The same trend as for camelina yields – i.e. high yields for environments in loamy soils and with occasional ploughing and low yields for environments in sandy soils without ploughing – was observed for barley yields but not for pea (Figure 19b).

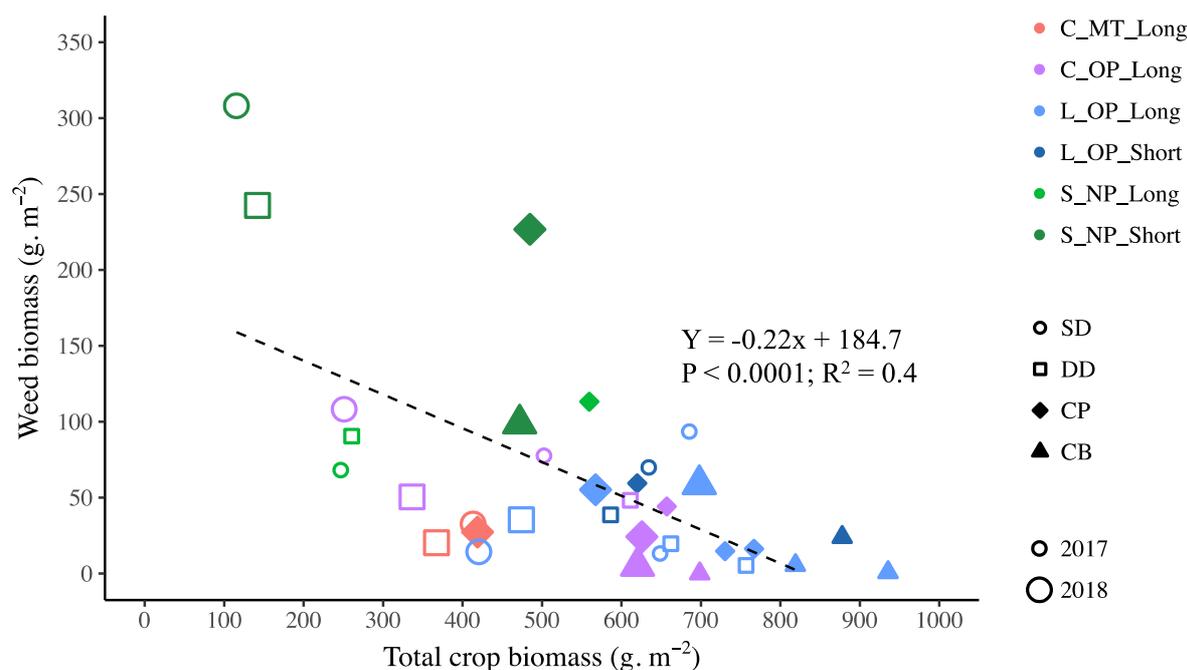


Figure 18. Weed biomass related to the total crop biomass (g.m⁻²) at harvest in which situations are characterised by the crop management route, the year, and the “soil type by tillage system by crop rotation length” combination. Symbols correspond to crop management routes, full symbols correspond to intercropped crop management routes (CB or CP) and empty ones are for camelina pure stand (SD or DD). Symbols’ colour and size represent the “soil type by tillage system by crop rotation length” combination and the year, respectively. Acronyms’ signification are as follows: SD: Camelina single density, DD: Camelina double density, CP: Camelina/Pea intercrop, CB: Camelina/Barley intercrop, C_MT_Long: calcareous-minimum tillage-long crop rotation, C_OP_Long: calcareous-occasional ploughing-long crop rotation, L_OP_Long: loamy-occasional ploughing-long crop rotation, L_OP_Short: loamy-occasional ploughing-Short crop rotation, S_NP_Long: sandy-no ploughing-long crop rotation, S_NP_Short: sandy-no ploughing-short crop rotation.

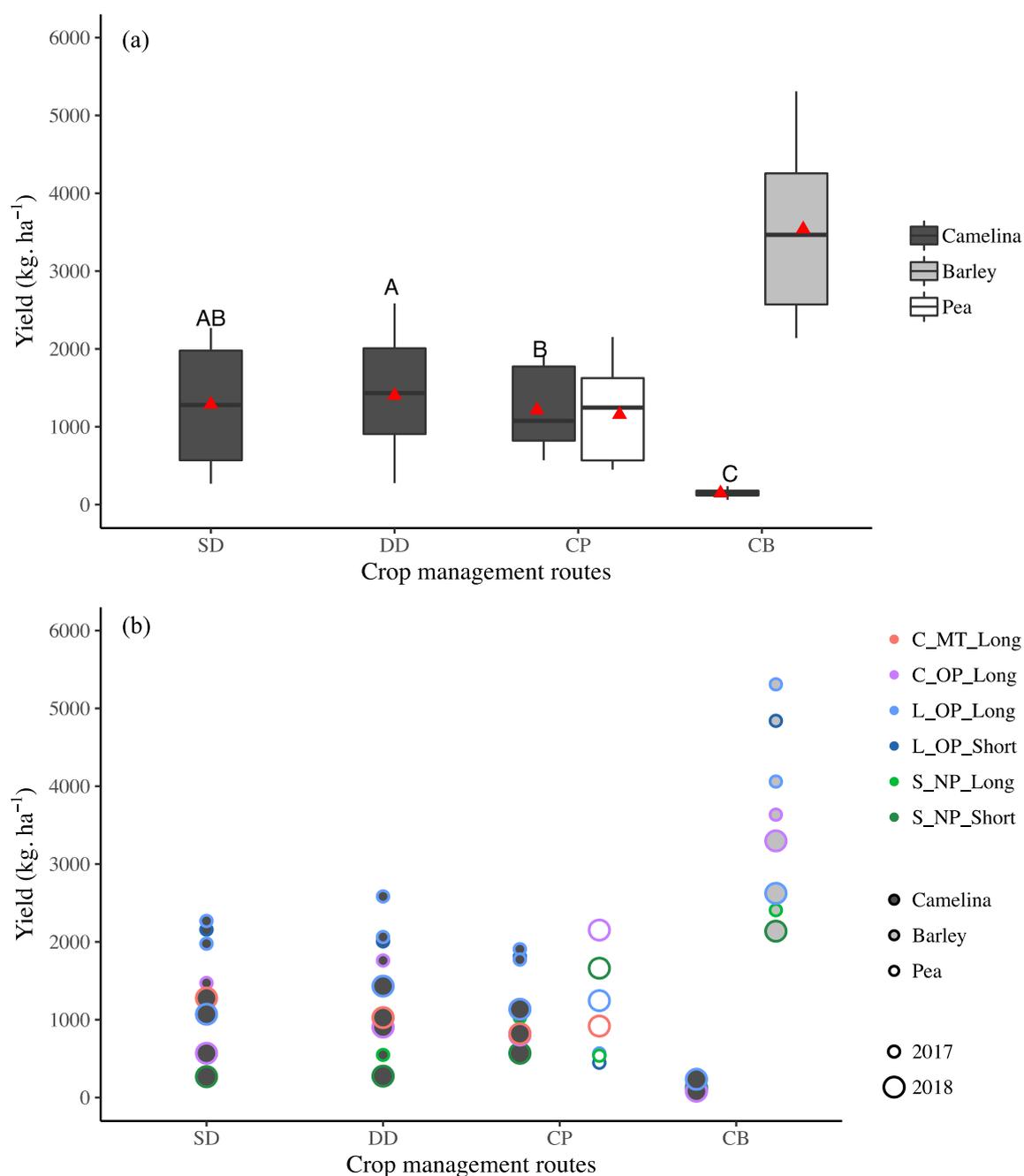


Figure 19. (a) Average (triangle), median (bold black line), 25th and 75th percentiles (black fine line) for the camelina, pea and barley yields (kg. ha⁻¹) for the four camelina crop management routes, and (b) camelina, pea and barley yields for each environment and crop management route. In (a), different letters indicate significant mean differences between crop management routes according to Tukey test at 0.05 confidence level. Lowercase letters are for flowering and capital letters for maturity. In (b), the colour filling of symbols, colour of the outline, and symbol size represent respectively the stage, the "soil type by tillage system by crop rotation length" combination, and the year. Acronyms' signification are as follows: SD: Camelina single density; DD: Camelina double density; CP: Camelina/Pea intercrop; CB: Camelina/Barley intercrop; C_MT_Long: calcareous-minimum tillage-long crop rotation; C_OP_Long: calcareous-occasional ploughing-long crop rotation; L_OP_Long: loamy-occasional ploughing-long crop rotation; L_OP_Short: loamy-occasional ploughing-Short crop rotation; S_NP_Long: sandy-no ploughing-long crop rotation; S_NP_Short: sandy-no ploughing-short crop rotation.

4. Discussion

4.1. Identifying promising alternatives to chemical weeding to manage weeds in camelina

Considering all the environments tested in our study, the three herbicide-free alternative crop management routes resulted in a significant decrease in weed biomass at harvest compared to the control, in which weed management was based on herbicide application. On the opposite, Heiska (2009) showed that weed chemical control (with trifluralin) was more effective to control weeds than mechanical control on both spring and winter camelina cultivars. In our experiment, lower rates than those recommended for Novall® on brassicas (1.5 to 2.5 l ha⁻¹, <https://ephy.anses.fr/ppp/novall>) were applied, because of reported phytotoxic effects on camelina of several active ingredients at high rates of application (Scheliga and Petersen, 2016). We assumed that this could have affected the efficacy of the herbicide to manage weeds in the control CMR. In 2017, dry weather conditions during the spring (Figure 15) could also be an explanatory factor for the low efficacy of the herbicide. In their study on the socio-technical lock-in hindering crop diversification in France, Meynard et al. (2018) identified that pest management was a major obstacle to the introduction of minor crops in cropping systems, mainly due to the lack of authorized active ingredients. In the case of camelina, for which few herbicides were available, we showed that the efficacy of chemical weeding could depend on the active ingredient used, but also on the conditions of application. However, we identified effective herbicide-free crop management routes, which could be promising alternatives in the European context of pesticide reduction.

In our study, both intercrops (CP and CB) led to a lower weed biomass, compared to both pure stand crops of camelina, thanks to a higher total crop biomass. This result is consistent with previous studies on the effect of intercropping with camelina (Raslavicius and Povilaitis, 2013; Saucke and Ackermann, 2006) but also with other crops (Baumann et al., 2000 ; Szumigalski and Acker, 2005) on weeds. We assumed that the complementarity of the species involved in the intercrops, in terms of aerial and root architecture, or nutrient and water uptake efficiency, induced a higher use efficiency of the resources (nitrogen, light, or water) at the expense of weeds (Brainard and Bellinder, 2004; Corre-Hellou et al., 2011). As a result, measurements regarding these processes would have been useful to better understand the origin of the weed regulation

observed. For the double density CMR, weed biomass was reduced by 30 %, without a significant increase of the total crop biomass, compared to the control. In the literature, weed suppression in high-density treatments for various crops usually went along with a higher crop biomass (Kristensen et al., 2008; Olsen et al., 2005; Tollenaar et al., 1994). We assumed, based on field observations, that the lower number of camelina plants, in the SD crop management route, was compensated by branching, thus leading to similar total crop biomass between the SD and the DD crop management routes (Gesch et al., 2017; Urbaniak et al., 2008). However, the camelina competitive ability for resources in the double density was more efficient than in the single density, probably because of a higher and/or earlier soil coverage or a wider root exploration, as previously observed and described for other crops (Gallandt and Weiner, 2007; Li et al., 2018; Mohler et al., 2001). No significant effect of crop management routes on weeds at flowering was showed while this effect was significant at maturity. This suggests that the competition for resources previously described was higher after flowering, likely due to differing growth rates of the species involved (crops and weeds). Indeed, significant differences on crops growth rates between the CMR after flowering (respectively 28, 29, 62, and 68% for SD, DD, CP, and CB) were found while crops growth rates before flowering were not significantly different. In addition, the predominance of spring germination weeds, characterised by a growth between May and July (ex: *Chenopodium album*, *Mercurialis annua*, *Polygonum persicaria*, *Polygonum aviculare*, or *Fallopia convolvulus*), could also explained this result.

In addition to the effect on weed biomass, camelina yields in the DD and CP crop management routes did not differ from the control (SD) and reached a satisfying level, consistent with previous studies in Europe (Vollmann et al., 2007; Zanetti et al., 2017). By contrast, camelina yield for the camelina-barley intercrop was reduced by 90% compared to the control. We assumed that the well-known characteristics of barley – ability to enhance its competitiveness against weeds, its high early vigour or its potential allelopathic activity (Bertholdsson, 2005; Kokare and Legzdina, 2010) – also impacted camelina growth, even at a reduced sowing rate of barley. Even if weed biomass was significantly reduced in this CMR, the repetition of this effect on camelina yield between the two years and also for even lower sowing rate of barley – up to a quarter of the recommended rate (data not shown) – clearly challenged the advantages of this CMR for an industrial use of camelina. Moreover, even though it did not occur in our

environmental conditions, camelina yields could have been reduced in the other CMRs tested. For example, Krupinsky et al. (2002) showed, for various crops, that higher sowing rates resulted in more favourable conditions for diseases, thus impacting yields. In summary, the consideration of a second assessment criterion (here, camelina yield), in addition to the impact on weed biomass, modified the global assessment of the CMRs. Therefore, a multi-criteria assessment, based not only on agronomic indicators, but also on environmental and economic ones (Bockstaller et al., 2009), would be useful to extend the debate about the relevance of the CMRs to sustainably supply a biorefinery in the study area, in addition to their capability to manage weeds.

4.2. Towards a better explanation of the environment effect on weeds

In our study, weed biomass was strongly affected by the environment. Yet it is well-known that various environmental or management factors may impact weed communities in cultivated fields, i.e. weed biomass and diversity (Dale et al., 1992; Fried et al., 2008). In our trial, weed biomass distinctly varied across soil tillage systems. Environments with occasional ploughing (OP in Table 9) had lower weed biomass than environments without any ploughing (NP). Similar conclusion had already been reported in various studies that compared the effect of conventional tillage systems, i.e. with ploughing, no-tillage systems, or reduced tillage systems, i.e. non-inversion tillage, on weeds (Légère et al., 2013; Nichols et al., 2015; Ozpinar, 2006). A combined effect of the soil tillage, the soil type, and the crop rotation on weed biomass was also observed, as previously described for example for winter wheat, by Shahzad et al. (2016). A no-ploughing system combined with a short crop rotation in a low-yielded soil (E6, Table 9), for instance, corresponded to the highest weed biomass, while a reduced tillage system, combined with long crop rotation and regular use of cover crops (E8), resulted in low weed biomass, in line with results on conservation agriculture (Mirsky et al., 2012; Nichols et al., 2015). In conclusion, the description of each environment, based on a combination of soil type and cropping system traits, contributed to a better understanding of the weed biomass variability across the experimental network. However, the diversity of the combinations identified, and, more widely of the crop sequences practiced by the farmers of the network, was substantially reduced. Thus, exploring a wider range of cropping systems and soil types could be useful to explain

statistically the effect of the environment on weed biomass in camelina stands. Moreover, we assumed that environmental factors could influence weed diversity and composition, as previously reported in the literature (Cardina et al., 2002; Doucet et al., 1999; Peters et al., 2014). For instance, a higher density of *Matricaria recutita* was observed in 2018 than in 2017 during the regular monitoring of the trial, and was probably linked to the specific wet and hot weather conditions in the beginning of spring 2018 that favoured the development of this species. Therefore, measurements about species' diversity and abundance would help to better understand the effect of environmental conditions on weed community and not only on weed biomass.

4.3. Opening a path to innovative agroecological ways to control weeds in camelina crop and camelina-based cropping systems

Until now, in the scientific literature, two paths have been explored to manage weeds in camelina: chemical and biological control. One is based on the use of herbicides combined with mutants that are resistant or at least highly tolerant to these herbicides (Walsh et al., 2012; Lu et al., 2018), while the other is based on biological regulations to eliminate the use of herbicides, and has been exclusively described in organic systems (Heiska, 2009; Paulsen, 2007, 2011). So far, the chemical control path for camelina weed management had been much more promoted, as a consequence of the actual paradigm between the dominant agricultural innovation regime, based on genetic engineering and biotechnologies, and the more marginal one, based on agroecology (Levidow et al., 2012; Vanloqueren and Baret, 2009). For instance, in a recent review on camelina, only the chemical control path was mentioned as a solution to manage weeds, and only topics on new herbicides or mutants were presented in the research agenda for camelina (Berti et al., 2016). Here, we have proposed to explore a new path based on agroecological ways to control weeds in camelina, inspired by biological control but in line with the context of biorefinery in Europe.

We already observed that our results could be easily integrated into a continuous design loop process (Meynard et al., 2012) to design innovative herbicide-free crop management routes for camelina. Two of the farmers who managed the trials decided to implement an additional crop management route on their trial in 2018, respectively an even higher sowing rate (three-fold normal sowing rate), and an intercrop with vetch

(*Vicia sativa*). These choices were motivated by their own expectations but based on the experimental results of 2017, combined with their personal observations of the trial.

In addition, this work also contributed to reflexion about the sustainable introduction of camelina in various agricultural systems for multiple industrial uses, especially regarding weed management. We previously discussed the fact that weed biomass in camelina was not only the result of the crop management but was also impacted by the combination of this crop management with an environment (soil type, weather conditions) and cropping system (soil tillage, crop rotation) (see 4.2). At the same time, as Royo-Esnal and Valencia-Gredilla (2017) recently showed for camelina, the crop management route may impact weeds in the long run, i.e. at the rotation scale. Therefore, a long-term assessment of the CMRs would provide useful knowledge for the design of an integrated management of weeds within the whole cropping system. Moreover, this study has explored only two agricultural techniques at the crop management scale to enhance crop-weed competition, i.e. sowing density, and intercropping. Other techniques, within the cropping system, such as crop rotation or the use of companion crops (Owen et al., 2015; Sardana et al., 2017) would therefore need to be studied to design more agroecological weed control strategies in camelina-based cropping systems.

5. Conclusion

In this paper we have shown that increasing camelina sowing rate, or intercropping camelina with pea or barley, reduced weed biomass in camelina crop in northern France in various agricultural conditions. Double sowing rate and pea-camelina intercrop did not affect camelina yield, and even increased total yield in the case of the camelina-pea intercrop. We thereby demonstrated that these herbicide-free crop management routes could be promising alternatives to chemical weeding in camelina. Yet further research is needed on the agronomic, environmental and economic performances of these alternatives and their variability across environments, in order (i) to conclude on the recommended implementation of these CMRs in on-farm conditions in the environments we explored, and (ii) to discuss their suitability to other environments. Finally, these results could be useful to design other agroecological camelina crop management routes and even cropping systems in other areas in France.

Acknowledgments

This work was performed, in partnership with the SAS P.I.V.E.R.T., within the frame of the French Institute for the Energy Transition (Institut pour la Transition Énergétique - ITE) P.I.V.E.R.T. (www.institut-pivert.com) selected as an Investment for the Future (“Investissements d’Avenir”). This work was supported, as part of the Investments for the Future, by the French Government under the reference ANR-001-01.

This study contributed to the CONSYST project of the GENESYS research programme carried out by the SAS PIVERT. We thank all the farmers (Mr. Béguin, Mr. Bullo, Mr. Carpentier, Mr. Delacour, Mr. De Smedt, and Mr. Vandeputte) who set up the trials on their farms and contributed significantly to this work. We also thank the technical staff of the lab (Mathieu Bazot, Arnaud Butier, Éléonore Courteau, Richard Gosse, Gilles Grandeau et Véronique Tanneau) that participated in the experimental work. We are furthermore grateful to Hugo Gibert and Anne-Raphaëlle Lorent for their help with the data collection and analysis, and to David Makowski for his expertise in the design of the statistical approach used in the paper.



CHAPITRE 3

Diagnostic de la variabilité du rendement et la qualité des grains de cameline au sein d'un réseau d'essais multi-local et pluriannuel dans le Nord de la France



Pour ce chapitre, une soumission dans la revue « Global Change Biology Bioenergy » est prévue.



Dans le CHAPITRE 2 nous avons vu que les trois itinéraires techniques alternatifs sans herbicide permettaient une meilleure régulation des adventices que le témoin avec herbicide. Nous avons également montré que les rendements de cameline pouvaient varier entre ces différents itinéraires techniques et également en fonction des différents environnements. En parallèle, lors de l'atelier de réflexion multi-acteurs, des attentes en termes de qualité des grains (teneur en huile, en protéines et composition en acides gras) avaient été formulées par les acteurs de la filière (voir notamment CHAPITRE 1, §3.1.2). Ce troisième chapitre s'intéresse à la caractérisation de la variabilité du rendement et de la qualité des gains au sein du réseau multi-local et pluriannuel et à l'identification de facteurs expliquant cette variabilité.

Nous montrons que les variations de rendement s'expliquent majoritairement par le statut azoté de la culture à floraison, et par la présence de mildiou en 2018 alors que la qualité des grains (teneur en huile et composition en acides gras) est principalement impactée par les conditions climatiques (durée de remplissage de grains, hautes températures pendant la période de remplissage). Puis, nous discutons l'intérêt de la réalisation de ce diagnostic pour concevoir des systèmes de culture incluant de la cameline adaptés au territoire de l'Oise.

Diagnosis of camelina seed yield and quality variability across an on-farm experimental network in northern France

Margot Leclère^a, Anne-Raphaëlle Lorent^a, Marie-Hélène Jeuffroy^a, Arnaud Butier^a, Christophe Chatain^b, Chantal Loyce^a

^a UMR Agronomie, INRA, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, 78850, Thiverval-Grignon, France

^b Adane, Association de développement agricole du Nord-Est, Rue Adrien-Lhomme, 60400, Noyon, France

Highlights

- Camelina yield was positively correlated to nitrogen crop status at flowering
- Downy mildew significantly reduced camelina yield and oil content in 2018
- Oil and polyunsaturated fatty acids contents increased with grain filling duration
- High temperatures during grain filling reduced linolenic acid content

Abstract

Camelina (*Camelina sativa* (L.) Crantz) is an emerging oilseed crop combining both industrial and agronomic advantages. Camelina quantitative and qualitative performances, i.e. seed yield, oil and protein contents, and fatty-acids composition, have been shown to vary across genotype, environment, and agricultural practices. However, no studies have been carried out in order to identify and rank major limiting factors explaining yield and quality variations in on-farm conditions. Camelina performances were measured on 39 experimental strips corresponding to five camelina crop management routes (grown as intercrops or sole crops), settled in nine farmers' fields of northern France in 2017 and 2018. The ranking of candidate limiting factors, defined *a priori* from scientific literature, was carried out using an AIC-based model mixing method. Main limiting factors of camelina yield (ranging from 62 to 2585 kg ha⁻¹) were nitrogen crop status at flowering stage and downy mildew. Camelina yield was indeed positively correlated with the Nitrogen Nutrition Index at flowering stage ($R^2=0.44$, $p=7.3\times 10^{-3}$). Oil content varied from 36.6 to 46.5 % and was negatively correlated with protein content. Main indicators explaining oil content variations were grain filling

duration and downy mildew. Both poly-unsaturated and linolenic acid contents were positively correlated to grain filling duration, and negatively correlated to high temperatures during grain filling period. Camelina nitrogen status at flowering stage was mainly explained by N uptake of the intercropped species, and the amount of available inorganic nitrogen in the soil. Downy mildew was influenced by both weather conditions and the amount of weed biomass. The contribution of this agronomic diagnosis to the production of useful knowledge to design crop management routes, cropping systems with camelina, and value chains at the territory scale, is then discussed.

Keywords: *Camelina sativa*; oil content; fatty-acids; nitrogen; downy mildew

1. Introduction

Camelina (*Camelina sativa* (L.) Crantz) is an oilseed crop increasingly studied due to its original seed composition and the diversity of its industrial uses (Chaturvedi et al., 2018; Righini et al., 2016). Camelina is characterized by high oil seed content (between 30 and 40 %) and high contents of poly-unsaturated fatty acids (PUFA, higher than 50%), and mono-unsaturated fatty acids (MUFA, around 30 %) (Popa et al., 2017). Main fatty acids (FAs) are linolenic (C18:3, around 30%), linoleic (C 18:2, around 18%), oleic (C18:1, around 15%), and ecosenoic (C20:1, around 15%) acids (Belayneh et al., 2015). As camelina seeds are also rich in proteins, camelina meals contain until 40 % of crude proteins, after oil extraction (Zubr, 2003a). Camelina has been widely investigated as feedstock for biofuels (biodiesel or renewable jet fuel) because of its oil properties (Campbell et al., 2013; Mohammad et al., 2018; Mohammed et al., 2017b; Neupane et al., 2018; Tabatabaie et al., 2018). However, there are plenty of other uses reported for camelina oil, meals, or specific compounds, such as human food, feed, or chemical derivatives (Berti et al., 2016; Waraich et al., 2013). Therefore, camelina can be considered as a flex-crop, i.e. “with multiple uses and that can be flexibly interchanged while some consequent supply can be filled by other flex crops” (Borras et al., 2016). For instance, camelina oil has been identified as possible source of polyols and consequently, as an alternative to castor oil, widely used in commercial applications (Omonov et al., 2017). Moreover, camelina meal can either be used in fish diet (Yildiz et al., 2018) or as raw material for bio-adhesive production (Zhu et al., 2017).

Besides its wide range of potential uses, camelina has many agronomic advantages (Bonjean and Le Goffic, 1999; Putnam et al., 1993; Vollmann et al., 1996; Zubr, 1997). Camelina is a short-cycle crop with low water and nutrient requirements, and has shown some tolerance to common pests and diseases of the Brassicaceae family (Hunsaker et al., 2011; Mohammed et al., 2017a; Séguin-Swartz et al., 2009; Soroka et al., 2017). Consequently, camelina has been grown successfully in diverse environments across the world with reported seed yield ranging from 400 to 3300 kg ha⁻¹ (Berti et al., 2016).

Hence, camelina, as a crop suited to low-input management and marginal lands, and with multiple uses, is clearly a good candidate to address several current environmental and production challenges of European agriculture (Murphy, 2016; Zanetti et al., 2013).

Camelina quantitative and qualitative performances, i.e. seed yield, oil and protein contents, and FAs composition, have been shown to vary across genotypes (Gesch, 2014) and environments, i.e. climatic and soil conditions (Vollmann et al., 2007; Zubr, 2003a; Zubr and Matthäus, 2002). Several studies showed that all these performances were also significantly affected by genotype by environment interactions (Obour et al., 2017; Zanetti et al., 2017). Camelina performances were also affected by several agricultural practices as sowing date or rate (Berti et al., 2011; Gesch and Cermak, 2011; Urbaniak et al., 2008), irrigation (Hunsaker et al., 2013), nitrogen and sulphur fertilisation (Jiang et al., 2016, 2013; Wysocki et al., 2013), or harvest time (Walia et al., 2018). So far, no studies have been carried out in order to identify and rank major limiting factors of camelina performances in on-farm experiments, which could be a basis for practices improvement (Meynard et al., 2001).

The objectives of this study were: (i) to describe the variability of camelina seed yield and composition (oil, protein and FAs) across a multi-environment on-farm trial in northern France, and (ii) to identify and rank the major causes of this variability.

2. Materials and methods

2.1. The on-farm experimental network

The experimental network corresponded to five camelina crop management routes, tested in several farmers' fields in 2017 and 2018, resulting in thirty-nine experimental strips of 2500 m² (Table 13). Fields were located within an area of 1000 km², ranging from 49.4 to 49.7°N, and 2.86 to 3.13°E, and covered the three main soil types of the region (deep loamy, moderately deep sandy, and shallow calcareous soils, previously described in Leclère et al., (2019)). The area was characterized by an oceanic climate with mean annual temperature and cumulative rainfall respectively equal to 11 °C and 681 mm over the 1981-2010 period.

Two crop management routes (SD and DD) corresponded to camelina in pure stand, respectively sown at 4 and 8 kg ha⁻¹. The three others corresponded to camelina (sown at 4 kg ha⁻¹) intercropped with spring pea (*Pisum sativum*) sown at a half of the advised rate for sole crop (CP), or with spring barley (*Hordeum vulgare*) sown at a half (CB_50), or at a quarter (CB_25) of the advised rate for sole crop (Table 13). The variety used for camelina was Calena. A pre-emergence herbicide (Novall®: 400 g.l⁻¹ metazachlor + 100 g.l⁻¹ quinmerac) was applied on the SD crop management route only. The experiments did not receive any fertilisation, nor irrigation, fungicides, or insecticides. Trials were sown on the 16th of March in 2017 and on the 23rd of March in 2018. For both years, trials were harvested on the 17th of July at the maturity stage of camelina.

2.2. Data collection

Six plots of 0.5 m² were sampled on each strip at camelina flowering and maturity stages (respectively stages 65 and 85 on the BBCH scale; Martinelli and Galasso, 2011). At both dates, the aerial dry biomass (in g m⁻²) of each species (weeds, camelina, pea, and barley) was measured by weighing the samples after a period of 48h of drying at 80°C. At maturity stage, camelina, pea, and barley samples were threshed, and seeds were weighed to measure the yield of each species (pYield in kg ha⁻¹).

Table 13. Description and location of the thirty-nine experimental strips. Each location is identified by a three-letter code corresponding to the municipality where the field is located: AMY for Amy (49.655°N, 2.825°E), AUT for Autrêches (49.444°N, 3.126°E), GUR for Gury (49.570°N, 2.799°E), MOU for Moulin-sous-Touvent (49.456°N, 3.072°E), MOR for Mortemer (49.570°N, 2.680°E), RET for Rethondes (49.417°N, 2.939°E). The field used to set the trial within a same municipality differs across years (for instance AMY in 2017 corresponds to a different field than AMY in 2018).

Crop management routes tested	Number and location of the trials in 2017	Number and location of the trials in 2018
SD – Pure camelina sown at Single Density (4 kg ha^{-1})	5 AMY, AUT, MOU, MOR, RET	4 AMY, AUT, GUR, MOU
DD – Pure camelina sown at Double Density (8 kg ha^{-1})	5 AMY, AUT, MOU, MOR, RET	4 AMY, AUT, GUR, MOU
CP – Camelina (4 kg ha^{-1}) intercropped with spring Pea (100 kg ha^{-1})	5 AMY, AUT, MOU, MOR, RET	4 AMY, AUT, GUR, MOU
CB_50 – Camelina (4 kg ha^{-1}) intercropped with spring Barley (70 kg ha^{-1})	5 AMY, AUT, MOU, MOR, RET	3 AMY, AUT, MOU
CB_25 – Camelina (4 kg ha^{-1}) intercropped with spring Barley (35 kg ha^{-1})	0	4 AMY, AUT, GUR, MOU

Sub-samples of all grown species were sent to analysis to determine nitrogen concentration in whole plants at flowering (in %), or in seeds and straws at maturity (respectively N_seed and N_straw in %). For pea, it was assumed that 73% of the total nitrogen content measured came from the symbiotic atmospheric nitrogen (N₂) fixation (Bedoussac et al., 2015). Consequently, the amount of nitrogen absorbed (NDFS for Nitrogen Derived From Soil, in KgN ha⁻¹) by pea (resp. barley) corresponded to 27 % (resp. 100 %) of the total nitrogen accumulated (in kgN ha⁻¹) by pea (resp. barley). Camelina protein content (in g/100g of dry matter) was calculated by multiplying N_seed of camelina by 6.25 (ISO 16634-2:2016, <https://www.iso.org>). Sub-samples of camelina seeds were also sent to analysis to measure oil content (in %) and to determine the fatty acids (FA) profile. Based on this analysis, the content of each group of FA (PUFA, MUFA and SFA respectively poly, mono-unsaturated FA, and saturated FA) was calculated (in %). At maturity, on each strip, three sub-plots of 60 m² in which no plants had been previously collected, were mechanically harvested with an experimental combine harvester to measure the commercial yield (cYield in kg ha⁻¹), i.e the yield that can be obtained in on-farm conditions.

Eight soil cores (0 to 90 cm depth) were collected on each strip at the end of the winter (respectively on February, 22nd in 2017 and March, 5th in 2018). On each sample,

the total soil inorganic nitrogen, available nitrogen for crops (in kgN ha⁻¹) was measured. Analyses were also performed to determine particle size and chemical composition (pH, CaCO₃, available P, total nitrogen and carbon, and organic matter).

Finally, local daily weather data, i.e. minimal, maximal, and mean temperatures (T_{min}, T_{max}, and T_{mean} in °C), rainfall (RR in mm), and evapotranspiration (ETP in mm), were extracted from a database of Meteo France (<https://donneespubliques.meteofrance.fr/>).

2.3. Indicators for limiting factors

Based on scientific literature and field observations, candidate indicators explaining the variability of camelina performances were defined *a priori*. Yield was assumed to be possibly impacted by nitrogen, water, downy mildew, and hail, whereas oil and protein contents were assumed to be possibly affected by nitrogen, water, downy mildew, and grain filling duration, and PUFA and MUFA contents by nitrogen, water, grain filling duration, and high temperatures (Cappelli et al., 2019; Hergert et al., 2016; Jiang et al., 2013; Vollmann et al., 2001b; Zubr and Matthäus, 2002).

2.3.1. Indicator for nitrogen crop status

The Nitrogen Nutrition Index (NNI) has been identified as a reference indicator of the crop nitrogen status (Lemaire and Meynard, 1997). It corresponds to the ratio between the measured nitrogen concentration and the critical nitrogen concentration, estimated with the critical curve of the species considered (Sadras and Lemaire, 2014). NNI values over 1 indicate a non-limiting crop nitrogen status, while NNI values below 1 indicate that growth is limited by N supply. The lower the NNI value, the higher the nitrogen stress. As no critical nitrogen curve for camelina has been established yet, the NNI for camelina was calculated using the critical dilution curve of oilseed rape (Colnenne, 1998), which is a species close to camelina (Cappelli et al., 2019). Lastly, NNI was calculated at flowering stage.

2.3.2. Indicator for water stress

The indicator for water stress (WS) was calculated from a dynamic water balance between the sowing date and the harvest date. WS was estimated over the entire growing period for yield, and over the grain filling period for seed quality. WS

corresponded to the average between sowing date (or flowering stage) and harvest date of a daily stress coefficient ($K_s(d)$, dimensionless) calculated as follows (Itier, 1996):

$$K_s(d) = 1 \text{ if } SWC(d-1) \geq 2/3 SWC_{max}$$

$$K_s(d) = SWC(d-1)/SWC_{max} \text{ otherwise}$$

where SWC_{max} is the maximal soil water content (in mm), i.e. the soil water content at field capacity, estimated for each location with a pedotransfer function (Bruand et al. 2004), and $SWC(d-1)$ is the soil water content on day $d-1$ (in mm).

The soil water content (SWC in mm) was calculated using the following equation:

$$SWC(d) = SWC(d-1) + R(d) - ETR(d)$$

where $SWC(d)$ is the soil water content (in mm) on the day d , $R(d)$ is the amount of rainfall on day d (in mm), and $ETR(d)$ is the actual evapotranspiration on day d (in mm) and calculated by:

$$ETR(d) = K_s(d) \times K_c(d) \times ETP(d),$$

where $ETP(d)$ is the potential evapotranspiration on day d (in mm) obtained with weather data, and $K_c(d)$ is a cultural crop coefficient (dimensionless) depending on crop development. For the intercrops, $K_c(d)$ was estimated by weighting the cultural crop coefficient of each species with its relative importance in the total biomass of the mixture calculated at flowering stage and harvest date. K_c values for pea and barley were those proposed by the FAO (Allen et al. 1998), and were extracted from George et al. (2018) for camelina.

WS equal to 1 indicates that no water stress occurred during the period considered. When WS is lower than 1, the lower the WS value, the higher the water stress.

2.3.3. Indicators for yield loss due to mildew and hail

In 2018, symptoms of downy mildew (caused by *Peronospora camelinae*) were observed on camelina (Figure 20a). The incidence and severity of this disease at harvest (MILDEW in %) were assessed by calculating the ratio between the number of diseased pods and the total number of pods on ten plants for each replicate, and then by averaging them for each strip.

On the 12th of July 2017, a hailstorm occurred on the three sites located in the south of the area. This climatic incident caused an opening of pods (Figure 20b).

Similarly to downy mildew, an indicator to assess the pod opening due to hailstorm (HAIL in %) was thus used: the ratio between the opened pods and the total number of pods on ten plants for each replicate was calculated, and then averaged for each strip.



Figure 20. a) Symptoms of downy mildew observed on camelina at the end of flowering in 2018 (Location: Gury), and b) opening of pods due to hailstorm in 2017 (Location: Rethondes).

2.3.4. Indicator for grain filling duration

Cumulative Growing Degree Days (CGDD) of the grain filling period were calculated for each site-by-year combination as follows:

$$CGDD = \sum_{d = \text{flowering stage}}^n GDD_d \text{ (if } GDD_d \geq 0\text{)}$$

$$\text{with } GDD_d = \frac{T_{min_d} + T_{max_d}}{2} - T_{Base}$$

where n is the harvest date, GDD_d is the growing degree days of the day d , T_{min_d} is the minimal temperature of the day d (in °C), T_{max_d} is the maximal temperature of the day d (in °C), and T_{Base} is the base temperature for camelina, i.e. 5 °C (Gesch, 2014).

2.3.5. Indicator for high temperature stress

High temperatures, greater than 25°C, have been reported to affect camelina seed FA composition (Rodríguez-Rodríguez et al., 2013; Zubr and Matthäus, 2002). This possible thermal stress was assessed by the number of days between flowering and harvest with maximal temperatures higher than 25 °C, as proposed for the indicator of winter wheat (Brancourt-Hulmel et al., 1999; Lecomte, 2005).

2.4. Data analysis

Data were analysed through a three-step approach adapted from the on-farm regional agronomic diagnosis (Doré et al., 1997, 2008). All the statistical analyses were run with the R software (version 3.5.1.).

2.4.1. Step 1

The variability of seven variables of interest (camelina yield and seed oil, protein, PUFA, MUFA, linolenic (ALA), and linoleic (LA) contents) across the experimental network was described. The two-by-two relationships between these variables were studied using linear regression models.

2.4.2. Step 2

Candidate indicators of each variable of interest (see 2.3.) were ranked using an AIC-based model mixing method (Burnham and Anderson, 2002) to identify major limiting factors, as it has been previously done to analyse wheat grain protein content and *Miscanthus x giganteus* yield variability (Casagrande et al., 2009; Lesur-Dumoulin et al., 2016). The package MMIX (Morfin and Makowski, 2009) was used. More precisely, each variable of interest was related to candidate explanatory variables (limiting factors) using a linear regression model. Then, all the possible linear combinations of the explanatory variables were fitted and both the Akaike Information Criterion (AIC) value (Akaike, 1974) and the Akaike weight (w_k) were computed for each combination (*mixAIC* function of the MMIX package). The Akaike weight was calculated with the following equation (Burnham and Anderson, 2002):

$$w_k = \frac{e^{-0.5(AIC_k - AIC_{\min})}}{\sum_{k=1}^n e^{-0.5(AIC_k - AIC_{\min})}}$$

where w_k is the Akaike weight obtained for the model M_k , corresponding to the k^{th} combination of explanatory variables (among the n possibilities), AIC_k is the Akaike Information Criterion computed for this same model M_k , and AIC_{\min} is the minimal value of AIC obtained across the n model tested.

The relative importance value of each explanatory variable ($w_+(x)$) was estimated by summing the Akaike weights of all the models tested in which the variable x occurred. The higher was the $w_+(x)$ value, the higher was the importance of the variable x , meaning that the variable x had a high probability to be in the best model. In addition, bootstrapping was used to assess the stability of the model mixing method used regarding the dataset (Prost et al., 2008). To do so, the *bootFreq* function of the package MMIX was used. A total of 1000 bootstraps were generated from the initial dataset by sampling data with replacement (Efron and Tibshirani, 1994), and the AIC-based model mixing method was applied for each bootstrap sample. As a result, for each explanatory variable, four values were computed: the frequency of selection across the bootstrap samples, the mean value of the parameter across the bootstrap samples, the standard deviation of the estimated parameter value across the bootstrap samples, and the mean value of the variable weights.

2.4.3. Step 3

When it was relevant, the effects of environmental conditions and crop management routes on major limiting factors identified in the previous step were analysed using multiple regression models. More precisely, for each major limiting factor, possible effects of environmental conditions or crop management routes were traduced in quantitative variables in order to be tested statistically. For instance, based on literature and field observations, incidence and severity of downy mildew infection at harvest were assumed to be possibly affected by weather conditions and especially cumulative rainfall and mean air temperatures (Desai et al., 2004; Vellios et al., 2017) but also by the amount of (i) camelina biomass (as indicator for the dispersion potential of the disease, Fitt et al., 2006), (ii) intercrop species biomass (as indicator for blocking effect, Boudreau, 2013), and (iii) weeds biomass (as an indicator of the development of the vegetative cover, Wisler and Norris, 2005).

3. Results

3.1. Camelina performances across the experimental network

Camelina yield from experimental plots (pYield) varied from 62 to 2585 kg ha⁻¹ with higher yields in 2017 than in 2018, and the lowest yields for the CB_50 and CB_25 crop management routes. Camelina commercial yield (cYield) varied from 77 to 2080 kg ha⁻¹ and was highly related to pYield ($p < 0.001$, $R^2 = 0.94$) (Table 14). As a result, all the analyses were run on pYield (named as camelina yield hereafter). No significant correlation was found between camelina yield and oil or protein content (Figure 21a). However, camelina yield was slightly positively correlated to MUFA ($R^2 = 0.11$, $p < 0.05$) (Table 14).

Table 14. Results of the linear regression models between the quantitative and qualitative variables studied. Values above the diagonal line represent the p-value and the R-square of the model and values below the diagonal line are the values of the slope estimated by the model. PUFA = polyunsaturated fatty acids, MUFA= monounsaturated fatty acids, ALA = α -linolenic acid, LA = linoleic acid, ns indicates that no significant relationship was found between the two variables.

Variables of interest	Yield	Oil content	Protein content	PUFA content	MUFA content	ALA content	LA content
Yield	-	ns	ns	p<0.1 R ² =0.08	p < 0.05 R ² = 0.11	ns	ns
Oil content	ns	-	p < 0.001 R ² = 0.44	ns	ns	ns	ns
Protein content	ns	-0.7	-	p < 0.05 R ² = 0,16	p < 0.05 R ² = 0.15	p<0.01 R ² =0.20	p<0.01 R ² =0.17
PUFA content	-118.6	ns	+0.44	-	p < 0.001 R ² = 0.98	p<0.001 R ² =0.94	p<0.001 R ² =0.58
MUFA content	+137.07	ns	-0.41	-0.98	-	p<0.001 R ² =0.87	p<0.001 R ² =0.48
ALA content	ns	ns	+0.45	+0.92	-0.90	-	p<0.001 R ² =0.78
LA content	ns	ns	-1.14	-1.95	+1.80	-2.39	-

Oil and protein contents reached average values of 41.7 and 24.1% respectively, and ranged from 36.6 to 46.5%, and from 20.9 to 28.1% respectively. A significant negative correlation was found between these two variables ($R^2 = 0.44$, $p < 0.001$) (Figure 21b). Protein content was also slightly negatively correlated to MUFA and LA contents, and positively correlated to PUFA and ALA contents (Table 14). PUFA and

MUFA contents respectively varied from 52.1 to 58.5 % (mean = 55.8 %), and from 31.6 to 37.9 % (mean = 34.3 %). A strong negative correlation between PUFA and MUFA content was found ($p < 0.001$, $R^2 = 0.98$) (Table 14). In 2017, camelina oil was characterised by a high content in MUFA and a low content in PUFA, and conversely in 2018 (Figure 21c). Finally, ALA content varied from 30.9 to 37.8 % and was negatively correlated to LA content (Figure 21d). This negative correlation thus explained the positive correlation between PUFA and ALA, and the negative one between PUFA and LA (Table 14).

Based on these relationships, the AIC-based model mixing method was run for camelina yield, oil content, PUFA content, and ALA content in order to identify their major limiting factors.

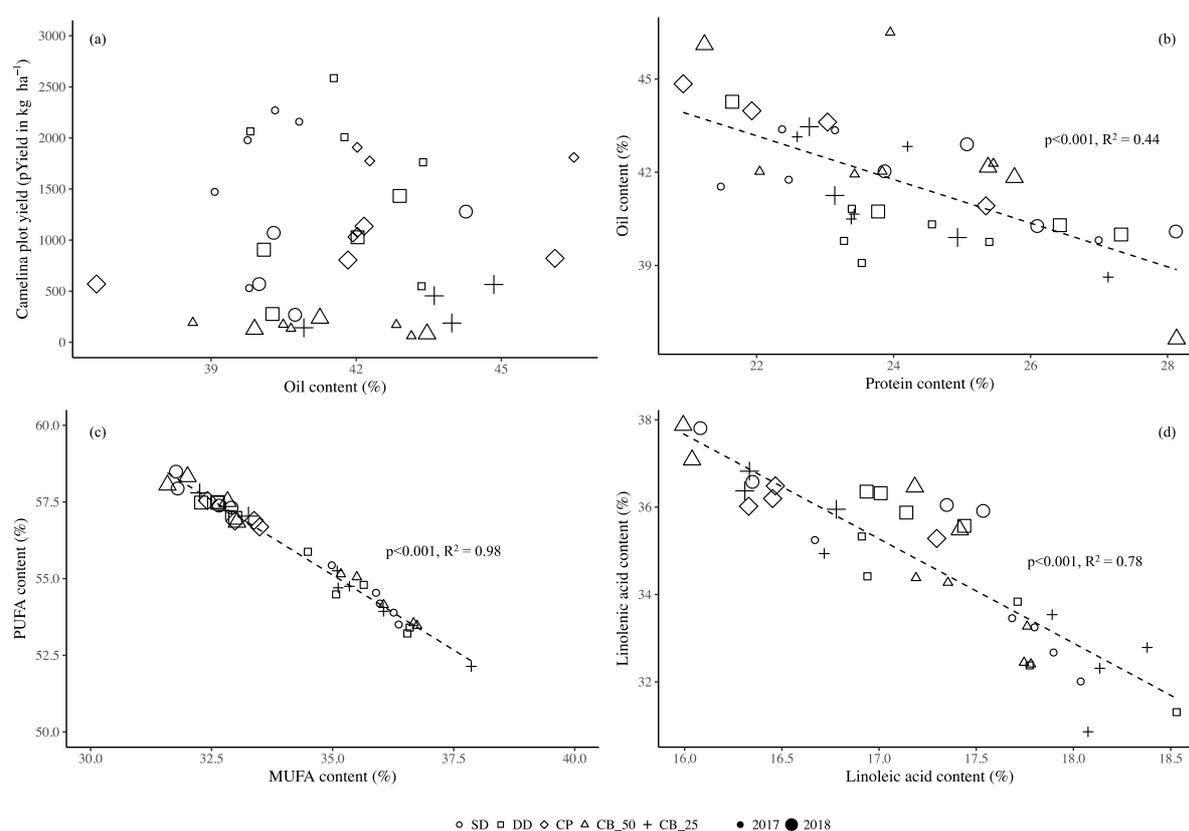


Figure 21. Camelina yield (in kg ha⁻¹) and oil, protein, PUFA, MUFA, ALA, and LA contents (in %) in camelina seeds across the experimental network: relationships between (a) camelina plot yield and oil content, (b) oil and protein content, (c) PUFA and MUFA content, and (d) ALA and LA content. Shape and symbols size respectively represent the crop management route and the year. SD: Camelina single density, DD: Camelina double density, CP: Camelina/Pea intercrop, CB_25 and CB_50: Camelina/Barley intercrop with barley respectively at 25 and 50% of the advised sowing rate for pure crop. PUFA = polyunsaturated fatty acids, MUFA= monounsaturated fatty acids, ALA = α -linolenic acid, LA = linoleic acid.

3.2. Major limiting factors of camelina yield and seed quality

Overall, the ranks of the limiting factors were preserved after bootstrap (Table 15), and the frequency of selection across the bootstrap samples of all the limiting factors was equal to 1, meaning that the results of the analyses were quite stable regarding the dataset. Major limiting factors, i.e. with a relative importance value equal or close to 1, differed from one variable to another (Table 15).

For yield, limiting factors with the higher probability to be in the best model were nitrogen status at flowering (NNI) and pod loss due to mildew (MILDEW), with relative importance values equal to 1 before and after bootstrap (Table 15). Both factors had significant effect on yield ($p = 6.25 \times 10^{-9}$ and $p = 2.22 \times 10^{-6}$ respectively), and together explained 69% of the yield variability observed. NNI varied from 0.27 to 0.79 and was positively related to yield (Figure 22). The higher NNI values were observed for the crop management route SD, and the lower ones for the camelina-barley intercrops (CB_50 or CB_25) (Figure 22). In 2018, mildew significantly reduced yield with a percentage of diseased pods ranging from 6 to 98% depending on site and crop management route (Figure 22). Neither water stress during the entire growing period, nor pod loss due to hail were identified as major limiting factors explaining yield variations. Both factors had indeed a low probability to be in the best model (Table 15), and no significant effect on yield.

For oil content, both mildew and cumulative growing degree-days during the grain filling period were identified as factors with high probability to be in the best model ($w_+ = 0.82$ and $w_+ = 0.7$ after bootstrap respectively) (Table 15). Both factors had significant effects on oil content ($p = 8.07 \times 10^{-3}$ and $p = 3.31 \times 10^{-2}$ respectively), but they only explained 21% of the variability observed. Overall, oil content slightly increased with longer grain filling period but decreased in 2018 because of downy mildew (Table 15). Neither nitrogen status nor water stress during the grain filling period were identified as major limiting factors for oil content, as their relative importance values were around 0.5 (Table 15).

The same limiting factors were observed for both PUFA and ALA contents (Table 15). Both variables were mainly affected by cumulative growing degree-days during grain filling, high temperatures, and in a less extend by water stress. More precisely, 88% (resp. 80%) of the PUFA (resp. ALA) content variability was explained with these

three variables (p-values equal to 3.14×10^{-13} , 3.06×10^{-13} , and 3.27×10^{-3} for PUFA, and 1.03×10^{-9} , 3.63×10^{-10} , and 3.46×10^{-2} for ALA). PUFA and ALA contents were positively correlated to CGDD during grain filling period, thus explaining the difference between 2017 and 2018 previously described (Table 15, Figure 23). However, a high number of days with maximal temperature above 25 °C appeared to significantly reduce PUFA and ALA contents (Figure 23). Finally, on average, higher PUFA and ALA contents were observed in situations with water stress indicator equal to 1, i.e. without water stress (data not shown).

Table 15. Relationship between yield, oil content, PUFA content, or ALA content and their candidate limiting factors estimated with model mixing method combined with bootstrap. Relative importance value is given before and after bootstrap to see the stability of the ranking, but parameter estimation and standard deviation (SD) are the values after bootstrap.

Variable of interest	Potential limiting factors ¹	Parameter estimation	SD	Relative importance value	
		After bootstrap	After bootstrap	Before bootstrap	After bootstrap
Yield	NNI	3624.14	793.29	1	1
	MILDEW	-16.67	3.93	1	1
	WATER STRESS ²	2204.32	1650.10	0.69	0.67
	HAIL	-0.45	2.77	0.3	0.41
Oil content	MILDEW	-0.03	0.01	0.87	0.82
	CGDD (grain filling)	0.03	0.02	0.73	0.7
	NNI	-2.21	2.20	0.48	0.53
	WATER STRESS ²	0.24	2.53	0.3	0.41
PUFA content	CGDD (grain filling)	0.06	0.01	1	1
	HIGH TEMPERATURES	-0.81	0.07	1	1
	WATER STRESS ²	3	1.47	0.97	0.86
	NNI	-0.35	0.81	0.34	0.45
ALA content	CGDD (grain filling)	0.06	0.01	1	1
	HIGH TEMPERATURES	-0.80	0.11	1	1
	WATER STRESS ²	1.85	1.77	0.67	0.64
	NNI	0.88	1.15	0.44	0.49

¹ NNI = Nitrogen Nutrition Index; CGDD = Cumulative Growing Degrees Days.

² Depending on the variable, WATER STRESS is calculated either over the entire growing period (for yield), or over the grain filling period (for oil, PUFA, and ALA contents).

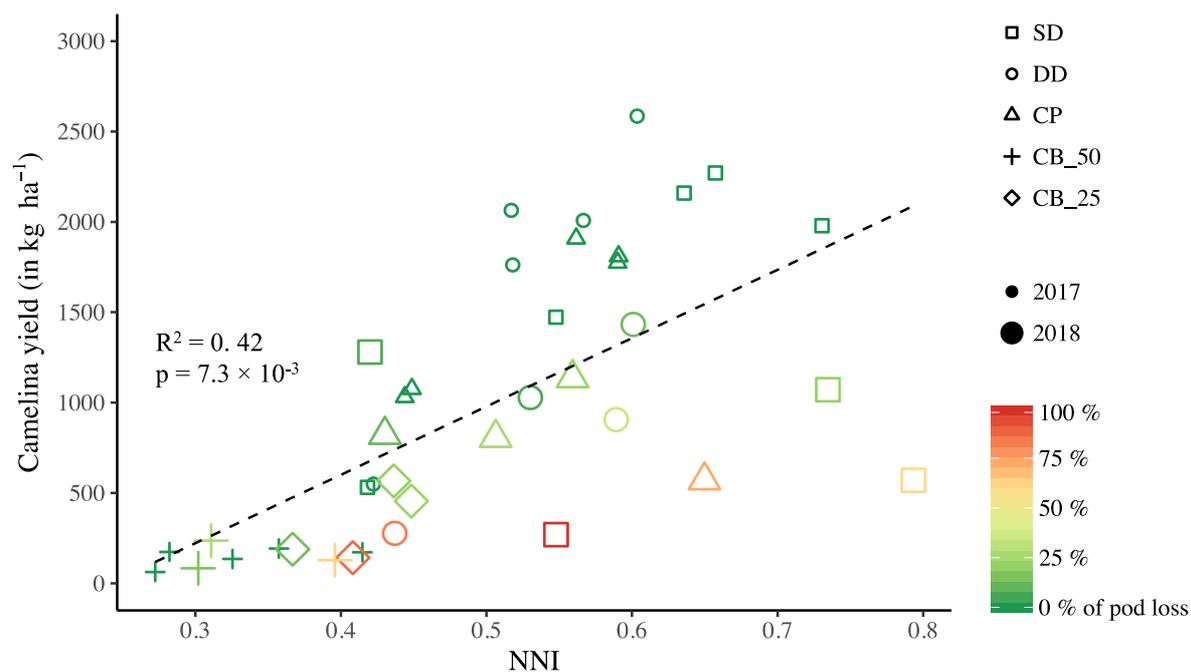


Figure 22. Camelina yield (in kg ha⁻¹) as a function of Nitrogen Nutrition Index of camelina at flowering (NNI, unitless) and pod loss due to mildew (in %). Symbols shape and size respectively represent the crop management route and the year. Colour gradient represents pod loss due to downy mildew: green corresponds to the lowest values and red to the highest ones. SD: Camelina single density, DD: Camelina double density, CP: Camelina/Pea intercrop, CB_25 and CB_50: Camelina/Barley intercrop with barley respectively at 25 and 50% of the advised sowing rate for pure crop.

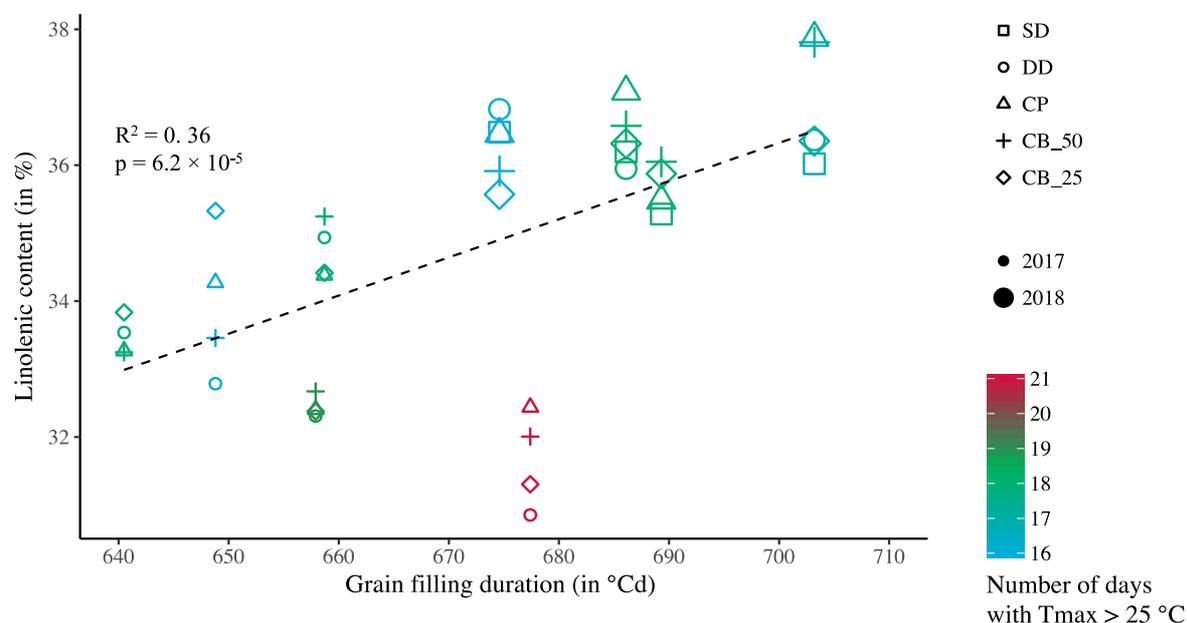


Figure 23. Linolenic content (in %) as a function of grain filling duration (in °Cd) and high temperatures. Symbols shape and size respectively represent the crop management route and the year. Colour gradient represents the number of days with maximal temperature above 25°C: blue tones correspond to lower values (<17 days), green tones to intermediate values (between 17 and 20 days), and red-pink tones to higher values (>20 days). SD: Camelina single density, DD: Camelina double density, CP: Camelina/Pea intercrop, CB_25 and CB_50: Camelina/Barley intercrop with barley respectively at 25 and 50% of the advised sowing rate for pure crop

3.3. Effects of environmental conditions and crop management routes on major limiting factors

Among the candidate limiting factors, four of them, namely nitrogen crop status (NNI), downy mildew, duration of grain filling period (CGDD), and high temperatures, appeared to impact significantly camelina seed yield and/or quality across the on-farm experimental network. As CGDD and high temperatures were indicators directly dealing with climatic conditions, they were not investigated further.

As no nitrogen fertilisation was applied, NNI at flowering stage was assumed to be affected by (i) the amount of available inorganic nitrogen in the soil, (ii) the amount of nitrogen uptake by other species (barley, pea and/or weeds) at flowering stage, and (iii) water stress between sowing and flowering. For barley and pea, the amount of nitrogen uptake corresponded to NDFS (in KgN ha⁻¹, see 2.2.). For weeds, total weed biomass at flowering was used as an indicator because we did not measure nitrogen concentration in weeds. The four-factor regression model tested ($R^2=0.69$, Table 16) showed that NNI was significantly correlated with N uptake of the intercropped species, the quantity of available inorganic nitrogen in the soil, and water stress. No significant effect of weed biomass was found (Table 16). More precisely, NDFS ranged from 2.8 to 80 kg N ha⁻¹, and was negatively correlated to NNI (Figure 24). Intercrop with pea resulted in higher NNI than intercrop with barley because of lower amount of soil-derived nitrogen absorbed by pea than barley, thanks to the symbiotic N₂ fixation. Conversely lower NNI were observed for camelina-barley intercrop due to the high amount of nitrogen uptaken by barley, except when the quantity of available inorganic nitrogen in the soil was high (Figure 24). NNI was positively correlated to NSOIL and to the indicator of water stress (Table 16) meaning that high amount of nitrogen in soil and no water stress (WATER STRESS = 1) induced higher NNI.

Incidence and severity of downy mildew infection at harvest date appeared to be significantly affected by weather conditions before flowering and by weed biomass at flowering. More precisely, the percentage of diseased pods was positively correlated to cumulative rainfall between sowing and flowering and weed biomass, both explaining together 74 % of the variability observed. Drier weather conditions in 2017 (79 mm (± 10) of cumulated rainfall between sowing and flowering on average over the five locations) than in 2018 (140 mm (± 19) on average over the four locations) thus explained the absence of disease in 2017. In addition, no significant effect of camelina or

intercrop species biomass was found (data not shown). Finally, in 2018, early large development of weeds induced higher level of diseased pods.

Table 16. Parameter estimation, standard deviation and p-value of the four-factor linear model defined to explain the effect of environmental conditions and crop management routes on NNI ($R^2 = 0.69$). NDFS is the quantity of nitrogen uptake from the soil by the intercropped species at flowering stage (in kg N ha^{-1}), NSOIL is the quantity of available nitrogen in soil between sowing and flowering, WATER STRESS is the value of WS calculated between sowing date and flowering stage, and BM WEEDS is the total aerial biomass of weeds at flowering stage.

Variable tested	Parameter estimation	Standard deviation	p-value
NDFS	-0.0041	0.0007	7.17×10^{-7}
NSOIL	0.0019	0.0006	0.0048
WATER STRESS	0.69	0.27	0.013
BM WEEDS	-0.00031	0.00027	0.25

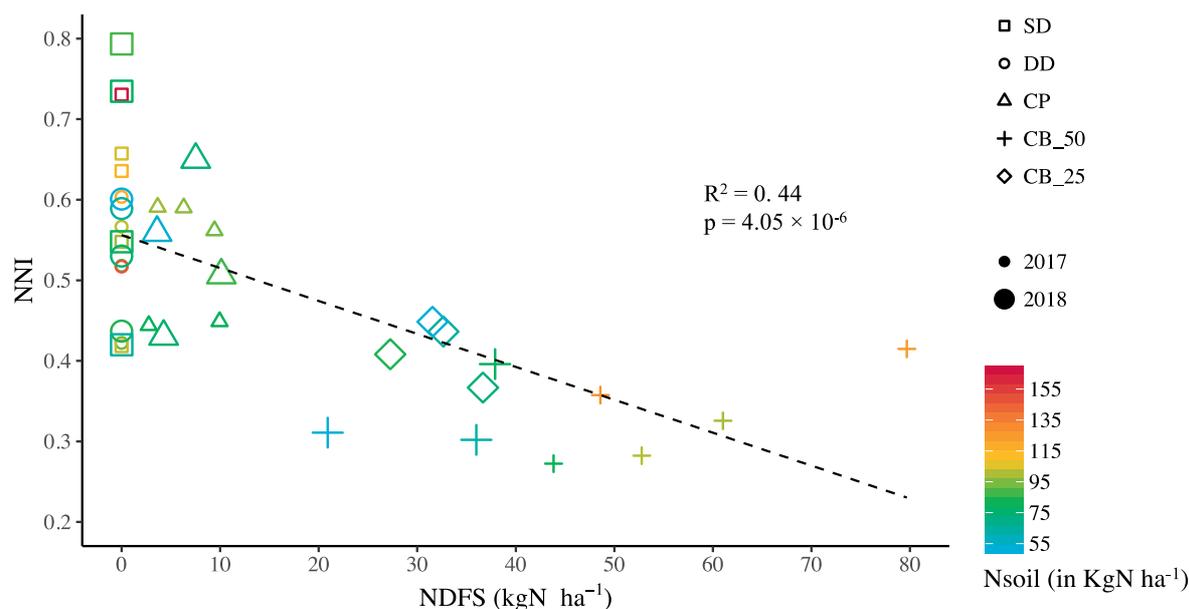


Figure 24. Nitrogen Nutrition Index (NNI) as a function of the amount of uptake nitrogen by the intercrop species at flowering stage (NDFS in kgN ha^{-1}) and the total nitrogen available in soil (Nsoil in kg N ha^{-1}). Symbols shape and size respectively represent the crop management route and the year. Colour gradient represents Nsoil: blue and green tones correspond to lower values ($<95 \text{ kg N ha}^{-1}$), yellow-orange tones correspond to intermediate values (between 95 and 135 kg N ha^{-1}), and red tones to higher values ($>135 \text{ kg N ha}^{-1}$). SD: Camelina single density, DD: Camelina double density, CP: Camelina/Pea intercrop, CB_25 and CB_50: Camelina/Barley intercrop with barley respectively at 25 and 50% of the advised sowing rate for pure crop.

4. Discussion

4.1. Camelina performances variability as an opportunity to develop flexible uses at the local scale

The range observed for camelina yields in our network was consistent with previous values reported for the variety Calena except for the low-yielded camelina-barley intercrops. Urbaniak et al. (2008b) found Calena to reach yields between 906 and 2568 kg ha⁻¹ in a multi-environment trial in Canada. Without considering CB_50 and CB_25 crop management routes, camelina yield varied from 270 to 2585 kg ha⁻¹, which is close to the range of yields reviewed in Berti et al. (2016) across seven different countries (400 to 3300 kg ha⁻¹). In this review, most of the data came from experimental stations thus explaining slightly higher yields observed than ours, obtained in farm conditions. Thus, our on-farm network was successful in exploring some variability, which is useful, in a scientific perspective, to perform an agronomic diagnosis, and then help farmers to reduce this variability by understanding major causes (Doré et al., 1997; Loyce and Wery, 2006). Seed quality was also consistent with previous data. Zanetti et al. (2017) obtained a mean oil content of 41.8 % in a multi-year-location-variety study across Europe and Canada, which is quite similar to the average value we observed in our study (41.7%). In several studies comparing various genotypes, negative correlations between oil and protein contents had been previously observed (Gugel and Falk, 2006; Zanetti et al., 2017) and explained by the competition for carbon and energy during the biosynthesis of fatty acids and amino acids (Gehring et al., 2006). Here, considering only one genotype, we also observed this negative correlation, even if the coefficient of correlation was lower than in these previous studies (respectively $r=-0.91$ and $r=-0.84$), suggesting an impact of the environmental conditions on this relation as mentioned by Zubr (2003b). Finally, the negative relationships between PUFA and MUFA, or ALA and LA, observed in our study, have been shown to be the consequence of the relative order of the biosynthesis of the fatty-acids in the developing seeds (Obour et al., 2017; Voelker and Kinney, 2001).

For years, the strategy adopted by the advisors and collectors was to standardize yield and seed quality, in a given supply area, through the use of inputs. But today, the emergence of diversifying flex-crops, with multiple uses, within a context of climate change leading to an increased inter-annual variability, suggests the implementation of a

“sustainable commercialisation”, defined by Jordan et al. (2016) as a “coordinated innovation process that integrates a new crop into the agriculture of a region, while intentionally addressing economic, environmental and social sustainability challenges via multi-stakeholder governance”. In our case study, although contrasting performances were observed between 2017 and 2018, both situations were suitable for a commercial valorisation. Indeed, high level of production combined with oil characterised by a low PUFA/MUFA ratio, i.e. with good properties for industrial uses (Rodríguez-Rodríguez et al., 2013), as in 2017, could be considered to satisfactorily supply an industrial outlet (chemicals or biofuels). On the contrary, low yield but combined with oil rich in omega 3 (ALA), i.e. with high nutritional value (Waraich et al., 2013), as in 2018, would be more adapted to a high-value market (human food or family pet feed). Therefore, in this perspective of “sustainable commercialisation”, this inter-annual variability of camelina performances in northern France would argue for the development of a flexible local value-chain in which the uses of camelina would be adapted each year regarding yield and seed quality (Parada et al., 2018). Such kind of coupled innovations (Meynard et al., 2016), will probably require the design of early indicators useful for industrialists to predict, from field measurements, camelina performances, and thus future uses, as it has been proposed for the management of the harvest of malting barley at the supplying area scale (Le Bail, 1997).

4.2. Contribution of the agronomic diagnosis to include camelina in cropping systems of northern France

Camelina yield has been shown to respond to nitrogen up to 200 kg ha⁻¹ (Jiang and Caldwell, 2016; Solis et al., 2013). In our study, without nitrogen fertilisation, yield varied with nitrogen crop status (NNI), which variations were explained, among others, by the amount of inorganic nitrogen available in the soil, as previously reported by Wysocki et al. (2013). In the study area, soils are known to have different capacity in mineral nitrogen supply related to their physico-chemical composition and depth (Begon et al., 1977). In addition, several studies had shown the impact of legume, as cash or cover crop, on the inorganic nitrogen availability for the following crop (Coombs et al., 2017; Li et al., 2015; Reckling et al., 2016; Stagnari et al., 2017). Therefore, the choice of both soil type and previous crop or intercrop should be considered to introduce

camelina in cropping systems, and design low-input management of camelina with satisfying quantitative and qualitative performances.

Our results confirmed the impact of temperatures on camelina seed quality, thus explaining seed quality variations observed across locations, as already mentioned in previous studies (Berti et al., 2011; Vollmann et al., 2007). Here, we specifically showed a significant effect of the number of days with maximal temperature above 25 °C on ALA content. With the current climate change, the frequency of periods of heat should be widely increased (IPCC, 2018). For instance, in the study area, the number of years, for which more than 20 days had maximal temperature above 25 °C during grain filling period, increased from 2 to 5 respectively between the two decades of 1996-2005 and 2006-2015 (long term weather data extracted from the on-line platform CLIMATIK for the Estrées-Mons meteorological station, 49.875°N - 3.031°E). In their recent study, Righini et al. (2019) suggested that shifting camelina sowing from spring to autumn in Italy could be a lever to enhance oil quality. In a context of climate change, delaying camelina sowing during the autumn or summer could be an efficient way to avoid these periods of heat occurring in the late spring. More widely, diversifying the way of introducing camelina (as spring, summer, or winter crop) in cropping systems could also contribute to increase the resilience of the developing camelina value-chain (Lin, 2011). Indeed, growing camelina as second crop in France has been shown to reach satisfactory yields (between 600 to 2500 kg ha⁻¹) to sustainably supply a local biorefinery (Leclère et al., 2018). However, further research would be needed to assess the impact of delayed sowing on camelina seed quality, and more widely on the major limiting factors identified in this study for such management conditions. Downy mildew should be specifically investigated as it has been shown to be a major limiting factor of camelina yield and oil content and as it was impacted by weather conditions (Gesch, 2014; Schillinger et al., 2012; Vollmann et al., 2001a).

4.3. Contribution of the agronomic diagnosis to design camelina crop management routes suited to northern France

The agronomic diagnosis is a key step to re-design crop management routes because it contributes to identify problems and thus potential levers to overcome them (Loyce and Wery, 2006). In the case of camelina in northern France, the diagnostic of camelina yield and seed quality spotlighted three topics that should be addressed to

design spring camelina crop management routes: (i) nitrogen management, especially for the intercrops with cereals, to limit competition, (ii) weed management to limit nitrogen competition and downy mildew development, and (iii) varietal choice to be better suited to environmental conditions.

In our network, all camelina NNI values were lower than 1, with a majority of values between 0.4 and 0.6, thus suggesting nitrogen deficiency in all situations. However, Wysocki et al. (2013) suggested that nitrogen needs to achieve optimum yield would be lower for camelina than for other spring oilseed species, thus these absolute values of camelina NNI should be improved by calculating them with a dedicated critical curve for camelina and not with the oilseed rape one. Therefore, it is likely that real camelina NNI values were higher than the calculated one, questioning the need of nitrogen in camelina pure stand crop management routes (SD or DD). Studies on how camelina answers to nitrogen are numerous, but results appear contradictory in term of nitrogen rate to achieve maximum seed yield (from 45 to 200 kg N ha⁻¹ depending on growth conditions) (Berti et al., 2016; Righini et al., 2016). Therefore, the design and the assessment of nitrogen fertilisation strategies adapted to local conditions will need further research: it should be especially useful to estimate the nitrogen needs of camelina and to determine the critical dilution curve, which are two indicators useful to quantify crop nitrogen status and reason nitrogen fertilisation (Sadras and Lemaire, 2014). In the case of the intercrops, it could be also useful to identify optimal NNI value for camelina to reach in order to maintain a good balance between the two crops (Bedoussac and Justes, 2010).

Weeds did not appear to have a significant effect on camelina NNI, while it is well known that weeds are major limiting factor of crops because they compete for resources, including nitrogen (Oerke, 2006; Sardana et al., 2017; Yaduraju et al., 2015). We assume that including weed biomass instead of weed nitrogen uptake (in kg N ha⁻¹) in our model might have minimized the effect of weeds on camelina NNI and thus on camelina yield. However, in 2018, weeds appeared to impact both camelina yield and oil content by increasing downy mildew. Weeds were previously mentioned as a factor favouring fusarium head blight (caused by *Fusarium graminearum*) in wheat (Teich and Nelson, 1983). According to the authors, weeds might have increased water or nitrogen stress of wheat or modified the crop environment (e.g. by inducing a microclimate).

Wisler and Norris (2005) also mentioned that weeds could interact with pathogen management in several ways. A previous study on this experimental network showed that camelina-pea and camelina-barley intercrops significantly reduced weed biomass compared to camelina grown in pure stand (Leclère et al., 2019). Therefore, designing camelina intercrops with legumes or cereals could be interesting to limit the effect of downy mildew on camelina performances through the reduction of weeds. In addition, even if it was not statistically shown by our results, blocking effect (diminution of downy mildew dispersion) was observed in the CP and CB crop management routes in two sites over four in 2018, arguing even more in favour of developing such systems.

Varietal choice is a key element mobilized by farmers to adapt their agricultural practices to their local environmental conditions, and even more in a context of climate change (Macholdt and Honermeier, 2017; Parent et al., 2018). In the case of camelina in northern France, the use of a camelina variety with a shorter cycle duration could be an interesting lever to avoid high temperatures during the grain filling period. Lack of availability of improved varieties, as a consequence of strategic choice of breeders focusing on major crops (Parenty, 2018), has been shown to hinder the introduction of diversifying crops into cropping systems (Meynard et al., 2018). Therefore, in the context of a “sustainable commercialisation”, defined previously (see 4.1), this diagnosis also could be a useful tool to enhance and design breeding programs on camelina.

5. Conclusion

Camelina yield and seed quality widely varied across our experimental on-farm network. While unstable, oil, protein and fatty-acid contents reached satisfactory levels, suitable for camelina commercialisation. Except for the intercrop with barley, yields were also satisfying and in accordance with previous values reported in experimental stations. Camelina yield was mainly affected by nitrogen crop status and downy mildew, while camelina seed quality was mainly affected by environmental conditions. Finally, we showed that this diagnosis, i.e. the identification and the ranking of agronomic and environmental factors affecting the performances of camelina under on-farm conditions, should be useful to design crop management routes for camelina, cropping systems including camelina, and value chains at the territory scale.

Acknowledgments

This work was performed, in partnership with the SAS P.I.V.E.R.T., within the frame of the French Institute for the Energy Transition (Institut pour la Transition Énergétique - ITE) P.I.V.E.R.T. (www.institut-pivert.com) selected as an Investment for the Future (“Investissements d’Avenir”). This work was supported, as part of the Investments for the Future, by the French Government under the reference ANR-001-01.

We thank all the farmers (Mr. Béguin, Mr. Bullot, Mr. Carpentier, Mr. Delacour, Mr. De Smedt, and Mr. Vandeputte) who set up the trials on their farms and contributed significantly to this work. We also thank the technical staff of the lab (Mathieu Bazot, Arnaud Butier, Éléonore Courteau, Richard Gosse, Gilles Grandeau et Véronique Tanneau) who participated in the experimental work.



CHAPITRE 4

Conception par des agriculteurs de modalités d'insertion et de conduite de la cameline adaptées à leurs situations à partir de connaissances produites localement



Ce dernier chapitre a un statut particulier par rapport aux trois chapitres précédents. En effet, les résultats présentés ici ont pour vocation d'être intégrés dans un article méthodologique visant à proposer une démarche pour raisonner l'insertion d'une nouvelle espèce dans les systèmes de culture d'un territoire (qui s'appuiera donc sur l'ensemble de la démarche de thèse). Au cours de ce chapitre, j'analyse l'organisation et les résultats d'un atelier de conception, réalisé en juin 2019, qui visait à stimuler la conception de modalités d'insertion et de conduite de la cameline par différents agriculteurs du territoire, dans leur propre exploitation agricole, en s'appuyant sur les connaissances produites localement (présentées en partie dans les chapitres précédents).

Les trois premiers chapitres de la thèse ont permis de présenter les connaissances produites sur la cameline, son fonctionnement et sa conduite, à partir de deux dispositifs expérimentaux : (i) des essais dans lesquels des modalités de cameline en double culture ont été conçues, testées au champ et évaluées par les agriculteurs eux-mêmes, et (ii) un réseau d'essais multi-local et pluriannuel où quatre itinéraires techniques de la cameline de printemps ont été conçus par des chercheurs-agronomes, puis testés et évalués en parcelles agricoles, dans différents milieux représentatifs du territoire de l'Oise. En parallèle de ces dispositifs expérimentaux, des moments d'échanges en salle ou au champ, impliquant différents acteurs (agriculteurs, conseillers, chercheurs, représentants d'instituts techniques et industriels), ont été organisés et ont également contribué à la production de connaissances sur la cameline. Au cours de l'atelier de réflexion multi-acteurs, réalisé en juin 2017, des modalités d'insertion et de conduite de la cameline en double culture (voir CHAPITRE 1) et de printemps ont été conçues par les participants. Cependant, l'objectif de cette activité de conception était avant tout (i) d'identifier des critères d'évaluation de la production de cameline dans l'Oise, et (ii) d'identifier et de hiérarchiser des trous de connaissances bloquants pour l'activité de conception et la mise en œuvre au champ de systèmes de culture incluant de la cameline. Dans ce chapitre, nous nous intéresserons à la conception, par des agriculteurs

(certains ayant participé à la démarche depuis le début, d'autres non), de modalités d'insertion et de conduite de la cameline, adaptées à leurs propres exploitations agricoles en vue d'une mise en œuvre dans un futur proche.

1. Introduction

L'introduction d'une nouvelle espèce, comme la cameline, nécessite pour les agriculteurs de re-concevoir, au moins en partie, le système de culture concerné. En effet, au-delà de raisonner l'itinéraire technique à appliquer à cette culture, il faut également décider sa position dans la rotation, en tenant compte des effets possibles sur les cultures suivantes de la rotation, et par conséquent adapter également leur conduite (Sebillotte, 1990).

Pour accompagner cette activité de re-conception par les agriculteurs, des ateliers de conception (Reau et al., 2012) ont été proposés, pour explorer largement des solutions en s'affranchissant dans un premier temps des contraintes de mise en œuvre, puis en affinant ces propositions en vue de leur implémentation. Ces ateliers peuvent également regrouper d'autres acteurs engagés dans un processus de conception de systèmes de culture (Colnenne-David et Doré, 2015; Lesur-Dumoulin et al., 2018), comme les conseillers agricoles. Une formalisation en trois étapes du déroulé de ces ateliers a été proposée lors du 5^{ème} symposium international de la communauté *Farming Systems Design*, à partir de l'analyse croisée de différents exemples de réalisation en France et en Espagne (Reau et al., 2015) et plus récemment dans un guide pratique (Reau et al., 2018). La première étape consiste en un *partage de connaissances*, dont les thèmes sont choisis en fonction des objectifs de l'atelier. Par exemple, dans le cas de la conception de systèmes de culture incluant des légumineuses, le thème retenu correspondait aux bénéfices et impacts négatifs des légumineuses (Pelzer et al., 2017). L'objectif est de partager des informations qui apparaissent a priori utiles à la phase de conception qui suit. Celles-ci peuvent porter sur les enjeux relatifs à la cible choisie pour la conception (par exemple, les controverses autour de la méthode du bilan pour un atelier visant à concevoir une nouvelle méthode de fertilisation azotée, Ravier et al. (2018)), sur les processus biophysiques impliqués dans les résultats visés (comme par exemple l'absence de perte de rendement de cultures affectées par des carences azotées temporaires, *ibid.*), et sur les éléments du système de culture qui peuvent les impacter. Le partage de connaissance peut également intégrer des témoignages d'agriculteurs. La seconde étape consiste en une *exploration, par les participants, d'options techniques* ou de solutions pouvant contribuer à atteindre l'objectif, en s'appuyant sur les connaissances partagées dans la phase précédente et leurs propres connaissances

(souvent plus locales), mais aussi sur des connaissances non disponibles mais nécessaires à l'affinement de la solution en construction. Enfin, la troisième et dernière étape consiste à *concevoir collectivement un ou des systèmes de culture*, en s'appuyant éventuellement sur les idées formulées à l'étape précédente. L'atelier de conception est aujourd'hui une méthode largement utilisée dans la recherche académique et dans la Recherche et Développement en France (Reau et al., 2012; Petit et Reau, 2013; Plénet et Simon, 2015; Deytieux et al., 2018; Lesur-Dumoulin et al., 2018). Elle permet de déboucher sur des prototypes de systèmes de culture, souvent en rupture, et parfois, quand la conception a été conduite dans cet objectif, sur des prototypes pouvant être mis en œuvre par les agriculteurs présents.

Pour accompagner l'introduction de la cameline dans les systèmes de culture de l'Oise en vue d'approvisionner une bioraffinerie oléagineuse, nous avons choisi de mettre en œuvre un atelier de conception avec des agriculteurs du territoire. Cependant, du point de vue opérationnel, cette organisation soulevait deux enjeux majeurs : (i) le besoin de formaliser les connaissances scientifiques et empiriques produites localement pour les partager dans le but de nourrir le processus de conception, et (ii) la conception d'une diversité de modalités d'insertion et de conduite de la cameline adaptées à la diversité des exploitations agricoles rencontrées dans le bassin d'approvisionnement. Du point de vue méthodologique, l'objectif était donc de proposer et d'analyser des manières de formaliser les connaissances acquises, et de tester la capacité de notre méthode à faire émerger des propositions adaptées aux caractéristiques propres des fermes des agriculteurs présents.

Ce chapitre traitera donc de la question suivante : **comment favoriser la conception par des agriculteurs de modalités d'insertion et de conduite de la cameline, adaptées à leurs propres situations, en se basant sur une formalisation de connaissances scientifiques et empiriques produites localement ?**

2. Matériels et méthodes

2.1. Organisation générale de l'atelier de conception

L'atelier de conception s'est déroulé sur une journée en juin 2019. Neuf agriculteurs de la zone d'étude, engagés dans un projet d'implanter de la cameline en 2019 ou 2020¹⁶, et leur conseillère agricole de la Chambre d'Agriculture de l'Oise, ont participé à cette journée. Les participants ont été choisis de manière à regrouper un public hétérogène en termes de connaissances théoriques et pratiques sur la cameline. En effet, parmi les neuf agriculteurs présents, deux d'entre eux avaient participé aux deux dispositifs expérimentaux présentés dans les chapitres précédents (essais agriculteurs de la cameline en double culture et réseau d'essais de la cameline de printemps), deux autres avaient participé uniquement au réseau d'essais, un avait fait uniquement un « essai agriculteur-expérimentateur » et quatre n'avaient participé à aucun des dispositifs expérimentaux (et n'avaient jamais cultivé de cameline). Enfin, sur les cinq agriculteurs ayant déjà cultivé de la cameline dans leur ferme, seulement trois d'entre eux avaient également participé à l'atelier initial de réflexion multi-acteurs.

L'ensemble de la journée s'est organisé autour de la cible suivante, proposée par les chercheurs, et qui a fait l'objet d'un accord de la part des participants : « *Où et comment cultiveriez-vous de la cameline de printemps ou d'été (en double culture) sans pesticides, économe en intrants et rentable, dans votre exploitation ?* ». Cette cible a été formulée de façon à (i) intégrer des objectifs ambitieux en lien avec la valorisation en bioraffinerie (sans pesticides et économe en intrants), (ii) prendre en compte les attentes des agriculteurs (la rentabilité) et (iii) favoriser l'exploration et la préparation de la mise en action, en situant la conception dans l'exploitation de chaque agriculteur.

L'atelier s'est organisé en trois phases : une phase de *partage de connaissances*, une phase de *conception* et une phase de *synthèse-discussion*. La phase de *partage de connaissances*, dont l'objectif était de restituer et de discuter les résultats des différents dispositifs expérimentaux précédemment mis en œuvre dans la région, s'est déroulée sous la forme d'une présentation avec des temps d'échanges. L'objectif de la phase de *conception* était de permettre aux agriculteurs de concevoir les modalités d'insertion et

¹⁶ dans le cadre d'un projet en partenariat entre la chambre d'agriculture de l'Oise et le groupe Avril, réalisé dans le prolongement du travail de thèse.

de conduite de la cameline qu'ils pourraient mettre en œuvre dans leur propre ferme. Cette seconde phase s'est divisée en deux temps : un temps de réflexion individuelle (environ 15 minutes) suivi d'un débriefing collectif. Au cours de la réflexion individuelle, les agriculteurs avaient pour consigne de concevoir une (ou deux) modalités d'insertion et de conduite qu'ils ont formalisées dans une « fiche culture », proposée par les chercheurs-animateurs, composée d'une partie « description de la rotation incluant de la cameline » et d'une partie « description des grands traits de l'itinéraire technique appliqué à la cameline ». Au cours du débriefing collectif, les agriculteurs ont présenté, à tour de rôle, leurs propositions en expliquant le mode d'insertion choisi et l'itinéraire technique associé, et en justifiant notamment les choix techniques (environ 15 minutes par agriculteur). Lors des échanges, des alternatives ont parfois été proposées par les autres agriculteurs du groupe et ont été discutées et retenues (ou non) par l'agriculteur concerné. Enfin, la phase de *synthèse-discussion* a permis de faire un bilan de l'ensemble des modalités proposées au cours de l'atelier, d'identifier des questions en suspens et de les discuter collectivement.

2.2. Construction du partage de connaissances

Comme mentionné précédemment, l'objectif de cette phase était de présenter les connaissances produites *via* les différents dispositifs mis en œuvre au cours de la thèse, et notamment les dispositifs expérimentaux. Outre les connaissances qui ont été présentées dans les trois premiers chapitres, à savoir (i) l'évaluation par les agriculteurs de leurs essais en double culture (CHAPITRE 1), (ii) les résultats sur la gestion des adventices dans les différents itinéraires techniques de cameline de printemps (CHAPITRE 2) et (iii) les résultats du diagnostic de la variabilité du rendement et de la qualité des grains au sein du réseau d'essais multi-local et pluriannuel (CHAPITRE 3), d'autres ressources ont été mobilisées pour construire ce partage de connaissances.

Tout d'abord, en lien avec les indicateurs d'évaluation formulés à partir des attentes des acteurs lors de l'atelier de réflexion (CHAPITRE 1, §3.1.2), des analyses complémentaires sur les données du réseau d'essais multi-local et pluriannuel ont été effectuées. Premièrement, une analyse de la variabilité des taux d'impuretés dans la récolte (en %) a été conduite pour chaque modalité du réseau d'essais. Puis, en s'appuyant sur les données de rendement et à partir de deux hypothèses de prix de vente, des calculs de marge (€/ha) ont été réalisés. Enfin, des simulations ont été effectuées avec le modèle

LIXIM (Mary et al., 1999) pour évaluer les pertes d'azote nitrique pendant la période hivernale suivant la culture de la cameline dans les essais (Lorent, 2018). Enfin, en complément de cette analyse, les connaissances issues d'une réunion d'échanges autour des premiers résultats des deux dispositifs expérimentaux et d'un tour de plaine du réseau d'essais multi-local (Encadrés 4.1 et 4.2), ont également été mobilisées. Plus particulièrement, les pistes d'interprétation des résultats qui avaient été discutées lors de la réunion d'échanges (par exemple, les conditions climatiques particulières au printemps 2017 pour expliquer les faibles taux de levée observés), ou les observations faites et les éléments de diagnostic formulés lors du tour de plaine (Annexe 3 et Annexe 4) ont été utilisés.

Ces connaissances d'origine et de nature diverses ont été formalisées avec deux ambitions. D'une part, l'objectif était d'explicitier les processus biophysiques sous-jacents aux principaux effets observés des pratiques sur les variables d'intérêt étudiées. D'autre part, nous souhaitons également rendre compte de certaines situations particulières qui semblaient intéressantes et donc relier des observations aux conditions spécifiques dans lesquelles elles avaient été réalisées.

Encadré 4.1 : La réunion d'échanges autour des résultats

Cette réunion, réalisée le 22 janvier 2018 et intitulée « *Bilan des expérimentations cameline mises en place dans le département de l'Oise en 2017* », a compté 18 participants : huit agriculteurs, deux conseillers de la Chambre d'Agriculture de l'Oise, quatre représentants d'instituts techniques (Terres Inovia et Agro Transfert Ressources et Territoires), trois chercheurs en sciences de la transformation et des procédés, et un représentant de la SAS PIVERT. L'objectif de cette journée était (i) de présenter et discuter les résultats des deux dispositifs expérimentaux obtenus en 2017 et (ii) préparer les essais à mettre en œuvre en 2018. La restitution des résultats s'est articulée en deux parties. Tout d'abord, des résultats préliminaires du réseau d'essais multi-local sur la cameline de printemps, portant sur le taux de levée, les rendements, la qualité des grains et la biomasse adventice, ont été présentés. Puis la seconde partie a été consacrée aux essais agriculteurs sur la cameline en double culture et s'est elle-même déroulée en deux temps : (i) une partie *retours d'expérience* où les quatre agriculteurs ont présenté leurs essais et leurs analyses et (ii) une partie *synthèse* au cours de laquelle l'analyse transversale de ces quatre essais, avec notamment l'identification des critères d'évaluation et de pilotage et la formulation des règles de décision (voir CHAPITRE 1), a été soumise et discutée avec les agriculteurs. Le compte rendu de cette journée est disponible en Annexe 2.

Encadré 4.2 : Le tour de plaine

Cette journée de visite des essais a été organisée le 13 juin 2018 sur les quatre parcelles du réseau d'essais multi-local et pluriannuel suite à la demande des agriculteurs lors de la réunion d'échanges présentée en encadré 4.1. Trois agriculteurs, un conseiller de la Chambre d'Agriculture de l'Oise, un ingénieur d'Agrotransfert Ressources et Territoires et un ingénieur de Terres Inovia, en plus de l'équipe de recherche, ont participé à ce tour de plaine. L'objectif de cette journée était de réaliser une évaluation qualitative des essais en s'appuyant sur des critères agronomiques pertinents pour les agriculteurs. La taille du groupe étant relativement limitée, l'ensemble du groupe a pu observer collectivement tous les traitements dans les quatre parcelles. De manière générale, la discussion s'est organisée autour des questions suivantes : *qu'observez vous ? Le traitement observé est-il satisfaisant ? Si oui, pourquoi ? Si non, pourquoi ? Quelles propositions peut-on faire pour résoudre le problème observé ?* Une partie des observations s'est également appuyée sur des traitements « hors essais », c'est-à-dire ne correspondant pas à une des cinq modalités évaluées dans le réseau mais mis en place par les agriculteurs, par exemple : une association cameline/vesce ou une bordure de cameline pure semée très dense. Le compte rendu de cette journée ainsi qu'une retranscription des échanges effectuée à partir d'enregistrements sont disponibles en Annexe 3 et Annexe 4.

**2.3. Analyse des données issues de la phase de conception**

Après l'atelier de conception, l'analyse des propositions des agriculteurs a été conduite de façon à expliciter, partager et comprendre l'origine de la diversité des modalités conçues. À partir des différents supports disponibles (fiches culture, enregistrements de l'atelier et prise de notes), l'analyse a été organisée en deux temps. Tout d'abord, une analyse des systèmes de culture conçus a été réalisée. Cette étape a consisté en une retranscription des fiches culture, en y ajoutant, le cas échéant, (i) les

propositions alternatives explorées suite aux échanges avec le groupe et (ii) les interrogations et les incertitudes soulevées par l'agriculteur (Figure 25). Cette étape a également permis d'explicitier pour chaque proposition le (ou les) objectif(s) formulé(s) par les agriculteurs lors de l'atelier (ex : mobiliser le moins d'intrants possible), les leviers techniques mobilisés dans la conception de l'itinéraire technique (ex : choix d'un désherbage mécanique) et éventuellement les services attendus de cette conduite (ex : améliorer la vie biologique du sol à long terme) (Encadré 4.3). Dans un second temps, l'analyse transversale de ces différents cas individuels a permis (i) de représenter la diversité des modalités explorées et de la comparer avec celle de l'atelier de réflexion multi-acteurs, (ii) de définir des fonctions attendues de la cameline et (iii) d'identifier des nouveaux trous de connaissances à combler pour poursuivre la conception.

Encadré 4.3 : Exemple de l'analyse d'un système de culture conçu mettant en lumière les objectifs formulés de l'agriculteur, les leviers techniques mobilisés et les services attendus de la cameline. Cette analyse accompagne la retranscription de la fiche culture (Figure 25).

• **Proposition 1 (GS) : Cameline pure en double culture après de l'OH**

Dans cette proposition la cameline est intégrée en dérobé après la récolte de l'orge d'hiver. L'objectif est de remplacer la CIPAN, normalement mise en place avant les cultures de printemps de la rotation (maïs ou betterave), par la cameline.

Objectif général : mobiliser le moins d'intrants possible (ferme en MAE PHYTO 50 % hors herbicide)

Leviers techniques mobilisés:

- Pour gérer la maturité : utilisation d'une variété précoce (90 jours) + envisager la fauche de la cameline pour pouvoir accélérer le séchage 8 jours avant la récolte. Sur cette seconde alternative, il reste encore des incertitudes sur la faisabilité technique en lien avec la hauteur de la plante.
- Pour gérer les repousses d'orge : la cameline est semée à une densité élevée (8 à 10 kg/ha), les pailles sont retirées pour limiter la compétition et favoriser l'émergence de la cameline et si les repousses d'orge sont trop importantes l'agriculteur envisage deux options : soit un désherbage chimique (anti-graminées au stade deux feuilles), soit un désherbage mécanique rendu possible par l'absence de paille. Cette seconde option (proposée par un autre agriculteur) a été présentée par l'agriculteur comme une alternative envisageable qui permettrait de se passer d'un herbicide.
- Pour la gestion de la fertilisation N : l'objectif est de ne pas apporter d'azote dans le système de culture en utilisant les reliquats d'azote minéral dans le sol post-récolte qui devraient être disponibles pour la cameline du fait de l'absence de paille. L'argument est qu'un trop plein d'azote peut également entraîner un retard de maturité ce qui est problématique pour la double culture. Si les reliquats sont faibles, une option pourrait être d'apporter des écumes de défécation, initialement prévues après la récolte de cameline pour les betteraves. Cependant, il reste des incertitudes sur les effets de ce type de fertilisation sur la cameline ainsi que des questions sur l'organisation du travail (il faut que le matériel soit disponible).

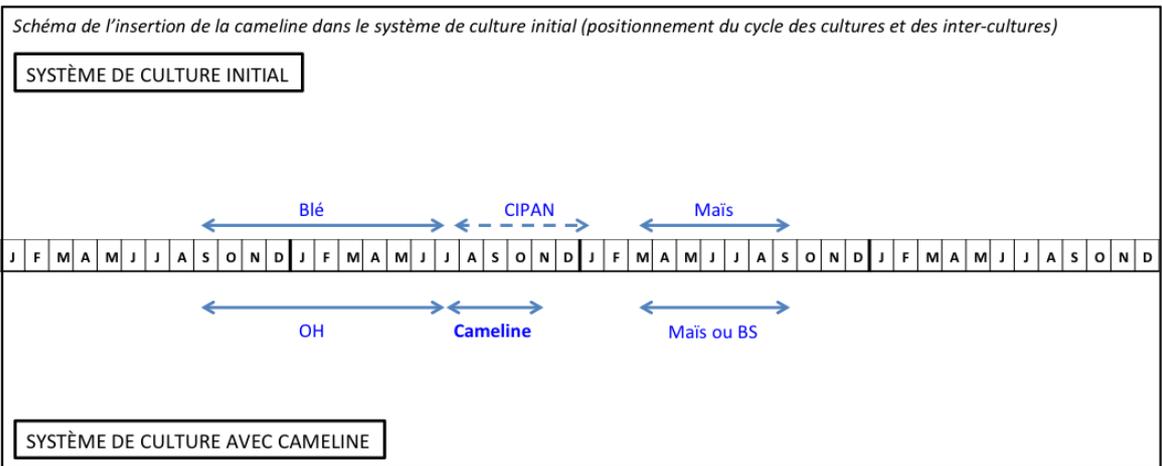
Nom-Prénom : GS

Proposition 1

Type de sol :
Limos argileux (~20 % d'argile)
NB : ce type de sol représente 90% des sols rencontrés dans la ferme

MAE : 50% hors herbicide

Rotation complète :
Initiale : Blé- Colza – Blé – BS ou Maïs
Avec cameline: Blé – Betterave – OH – **Cameline en double culture** – Maïs ou Betterave ou Pois H – Blé -Colza



Proposition 1

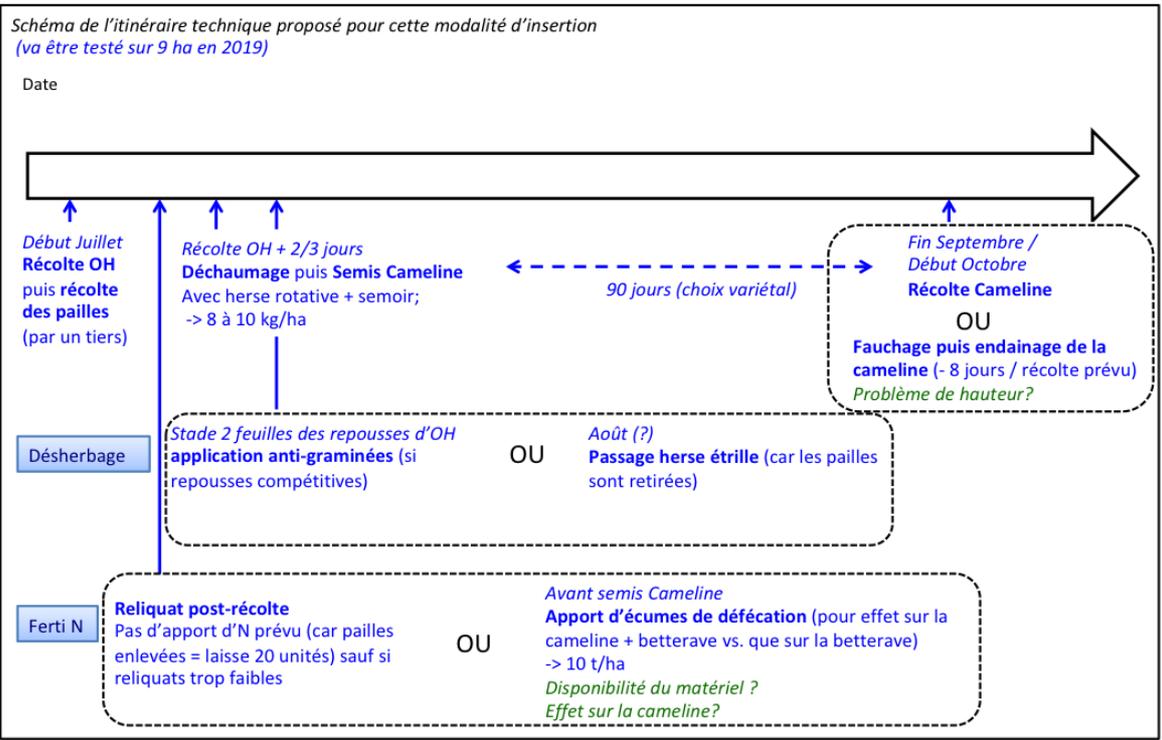


Figure 25 : Exemple de retranscription de la fiche culture d'une proposition d'insertion de la cameline en double culture après de l'orge d'hiver (Proposition 1, voir Tableau 1). La fiche comprend une description de la rotation (système de culture initial puis avec cameline) et une description de l'itinéraire technique. Pour chaque élément de l'itinéraire (désherbage, fertilisation, récolte), quand il y a eu des alternatives discutées collectivement, elles sont mentionnées avec un « OU ». Les questionnements soulevés par l'agriculteur sont notés en vert.

3. Résultats

3.1. Le partage de connaissances

3.1.1. Différents choix de représentation pour expliciter les processus

Le partage de connaissances a été organisé en deux parties : l'une autour du réseau d'essais multi-local et pluriannuel, et l'autre autour des essais agriculteurs. Compte tenu de la différence dans la nature des connaissances produites par les deux dispositifs et des différences dans l'insertion de la cameline (cameline de printemps pour le réseau d'essais multi-local et pluriannuel, cameline en double culture pour les essais agriculteurs), le choix de représentation des processus sous-jacents aux résultats a été différent dans chacun des cas (Figure 26). Dans le cas du réseau d'essais multi-local et pluriannuel, nous avons choisi de représenter les relations fonctionnelles entre les variables telles qu'elles avaient été formalisées dans les publications, c'est-à-dire sous forme de relations linéaires évaluées statistiquement (Figure 26a). Cependant, quand cela a été possible, ces connaissances ont été confortées par des observations de terrain. Ainsi, la relation positive entre le rendement de la cameline et l'INN à floraison (CHAPITRE 3, Figure 22) a pu être illustrée par les observations faites lors du tour de plaine. En effet, sur des contours d'essais ayant reçu des dévers de fertilisation azotée des parcelles voisines, la cameline avait été décrite comme « *plus verte et plus haute* » par les agriculteurs et avec un meilleur potentiel de rendement, estimé d'après le nombre de siliques des plantes observées (Annexe 4). Dans le cas des essais agriculteurs, où aucune mesure intermédiaire pouvant permettre l'élaboration de relations entre variables n'avait été réalisée, ce sont les explications des agriculteurs, formulées à partir de leur propre expertise, et recueillies lors d'entretiens (CHAPITRE 1, §2.4) qui ont été présentées. Ainsi, quand cela a été possible, en s'appuyant sur la représentation, sous forme de tableau, de l'évaluation qualitative réalisée par les agriculteurs (CHAPITRE 1, Figure 11), le caractère satisfaisant ou non des critères d'évaluation a été relié à une explication faite par l'agriculteur, sous forme de verbatim (Figure 26b). Par exemple, le caractère « moyennement satisfaisant » du rendement (6 q.ha^{-1} par rapport au seuil de 15 q.ha^{-1}), dans le cas de l'insertion de la cameline en relais dans du blé (M3, Figure 26b) a été expliqué par l'agriculteur par un manque d'azote qui aurait limité le nombre de ramifications (« *Pour moi il y a eu un manque d'azote [...] il y a avait beaucoup moins de ramifications que chez Vincent qui est à 2 km* »).

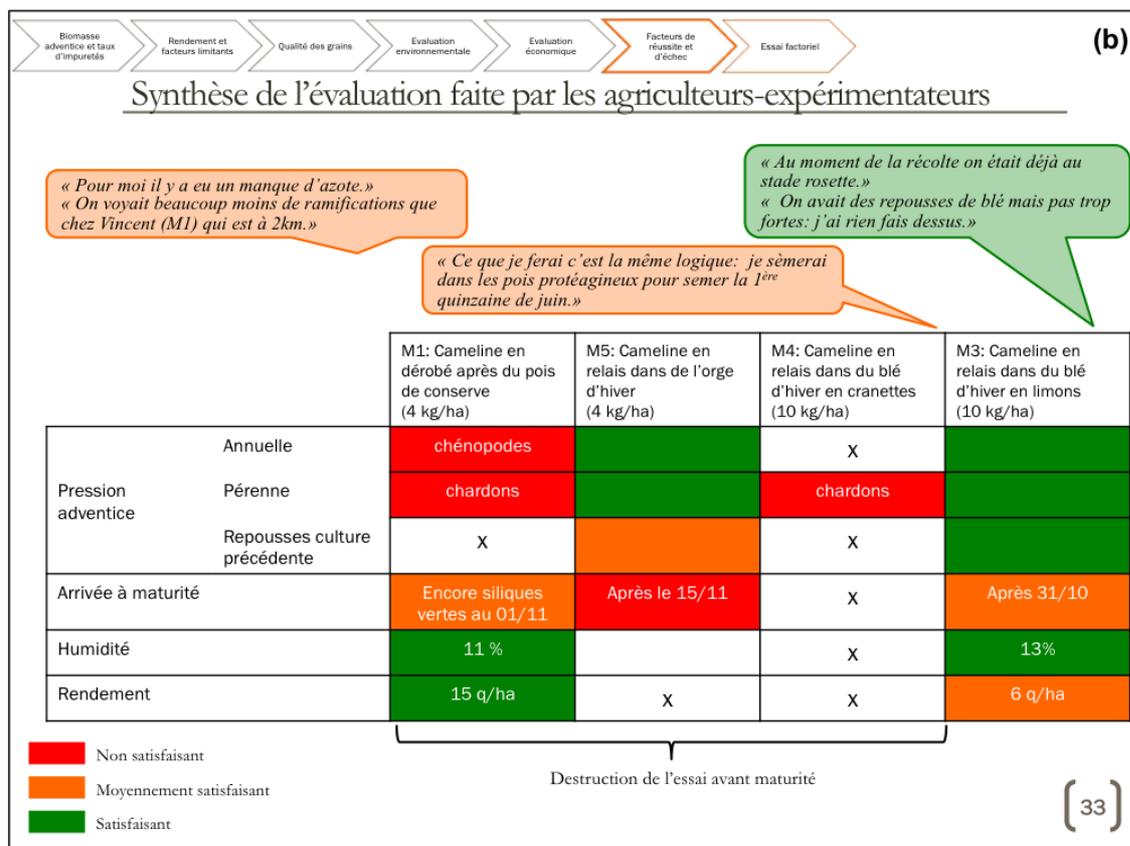
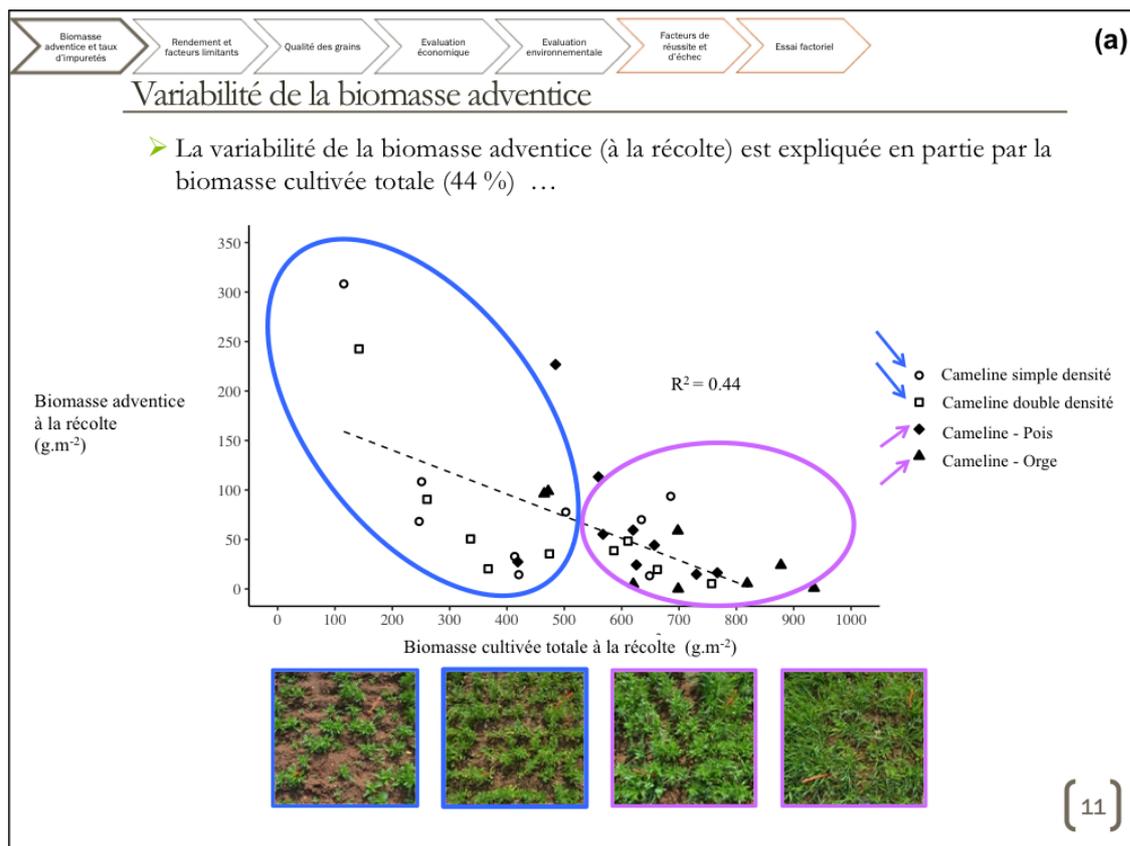


Figure 26 : Exemple des deux choix de formalisation pour représenter les connaissances lors du partage de connaissances. (a) Relation entre la biomasse adventice et la biomasse cultivée à la récolte, illustrée par des photographies et (b) Tableau d'évaluation qualitative des essais agriculteurs, explicité par des citations d'agriculteurs.

3.1.2. Le schéma fonctionnel : une proposition de formalisation commune aux deux dispositifs

En s'appuyant sur les exemples développés dans la partie précédente, on observe que dans les deux cas, le même processus est illustré : la variabilité du rendement s'explique en partie par une variabilité du statut azoté de la cameline. Ainsi, pour mettre en regard les connaissances produites *via* les deux dispositifs, deux schémas fonctionnels ont été construits (Figure 27). Cette formalisation a permis de rendre compte, d'une part, des indicateurs utilisés pour évaluer les performances de la cameline, et d'autre part, des états du milieu et du peuplement, des conditions environnementales et des pratiques impactant ces indicateurs. Par exemple, dans le cas du réseau d'essais multi-local et pluriannuel (Figure 27a), la variabilité du statut azoté de la cameline de printemps a été expliquée par la fourniture en azote du sol et par la compétition pour l'azote entre les cultures dans le cas des associations. Dans le cas des essais agriculteurs (Figure 27b), la variabilité du statut azoté de la cameline conduite en double culture a été expliquée par les agriculteurs soit à partir du précédent cultural (légumineuse ou céréale), soit par la combinaison entre le type de travail du sol, la fertilisation azotée et la densité de semis.

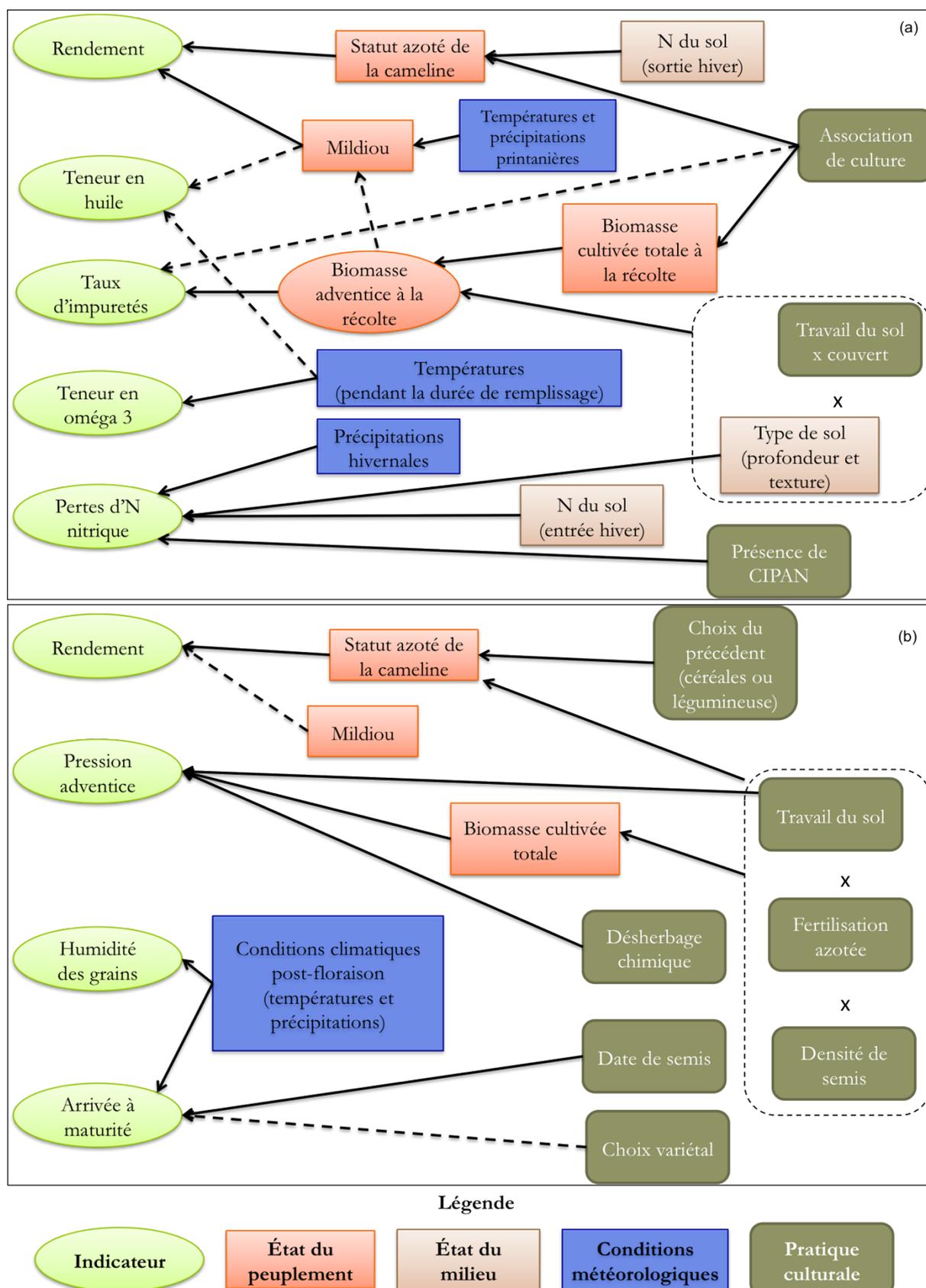


Figure 27 : Schémas fonctionnels construits à partir des résultats (a) du réseau multi-local et pluriannuel et (b) des essais agriculteurs-expérimentateurs. Ces schémas ont été présentés lors du partage de connaissances de l'atelier de conception pour mettre en regard les résultats des deux dispositifs.

3.2. Analyse transversale des modalités d'insertion et de conduite de la cameline conçues par les agriculteurs

3.2.1. Diversité des modalités conçues

Au total, dix modalités ont été conçues et présentées en détail par les agriculteurs (Table 17) et deux propositions alternatives mentionnées comme potentiellement intéressantes ont été discutées mais n'ont pas fait l'objet d'une conception d'itinéraire technique. Sur les dix propositions détaillées, six ont porté sur l'introduction de la cameline en double culture, soit après de l'orge d'hiver (en dérobé ou en relais), soit après du pois de conserve, et quatre ont porté sur l'introduction de la cameline en culture de printemps, dont trois en culture pure et une en association. Les deux propositions alternatives étaient relatives à l'introduction de la cameline en double culture en association avec du trèfle (en vue de maintenir la légumineuse pour la culture suivante) ou avec du colza (semis du colza en relais dans une culture de cameline semée mi-juillet). En comparant ces modalités à celles conçues lors de l'atelier de réflexion multi-acteurs (présenté dans le CHAPITRE 1), on observe un schéma d'exploration partiellement différent (Figure 28). Si certaines propositions sont communes aux deux ateliers (comme par exemple l'insertion de la cameline en double culture après du pois de conserve), certaines propositions faites lors de l'atelier de réflexion multi-acteurs n'ont pas été reproposées par les agriculteurs (ex : l'association cameline/féverole ou l'introduction de la cameline en double culture en relais dans du blé d'hiver). À l'inverse, de nouvelles propositions ont émergé (ex : l'introduction de la cameline au printemps après du seigle). De manière générale, l'analyse de l'arbre d'exploration montre que, pour la cameline en double culture, à l'exception des deux propositions alternatives, les propositions d'insertion sont restées très similaires aux propositions précédentes, alors que les modalités de printemps ont plutôt fait l'objet d'une nouvelle exploration.

Table 17. Description des dix modalités d'insertion de la cameline proposées par les agriculteurs lors de l'atelier.

Description de la proposition ^{a, b}	Type de sol	Objectifs formulés par les agriculteurs ^c	Informations complémentaires ^d (MAE, travail du sol)
1* Cameline pure en dérobé après de l'OH	Limons argileux (~20% d'argile)	Remplacer la CIPAN normalement mise en place avant les cultures de printemps de la rotation (maïs ou betterave)	MAE 50 % hors herbicide
2 Cameline pure en relais dans de l'OH	Limons sableux ou cranettes	Diversifier la rotation « colza-blé-orge d'hiver »	-
3* Cameline de printemps en culture pure après un seigle vert valorisé en méthanisation	Limons	Introduire une culture à cycle plus court que le maïs pour faire une deuxième CIVE (sorgho) après la cameline (au lieu d'une CIPAN)	-
4 Cameline de printemps en association avec une légumineuse ou avec une OP	Limons argileux ou cranettes	Introduire une culture de printemps dans la rotation de type « colza-blé-orge d'hiver ». En association pour permettre une couverture des sols.	Système en non labour
5 Cameline pure en dérobé après de l'OH	Limons argileux (ou sables)	Remplacer le colza dans la rotation par une culture à bas niveau d'intrants.	-
6 Cameline pure en dérobé après du pois de conserve	Limons argileux	Remplacer la CIPAN obligatoire après un pois de conserve	-
7* Cameline pure en dérobé après du pois de conserve	Limons argileux	Remplacer la CIPAN obligatoire après un pois de conserve	MAE 50% hors herbicide – 40% herbicide Semis direct
8 Cameline pure en dérobé après de l'OH	Cranettes et limons sableux	Couper la rotation entre deux céréales à paille (OH et blé)	MAE 50% hors herbicide – 40% herbicide Semis direct
9 Cameline de printemps en culture pure entre deux cultures de sarrasin	Cranettes et limons sableux	Diversifier la rotation et remplacer à terme le colza dans la rotation	MAE 50% hors herbicide ;40% herbicide Semis direct
10* Cameline de printemps en culture pure après du blé	Sables	Rallonger la rotation et introduire une culture de printemps à bas niveau d'intrants et à termes supprimer le colza dans la rotation	MAE 50 % hors herbicide Semis direct

^a Les numéros de proposition suivis d'une étoile correspondent à des propositions faites par des « nouveaux » agriculteurs, *i.e.* n'ayant participé à aucun des dispositifs mise en place localement sur la cameline (ateliers, dispositifs d'expérimentation, etc.)

^{b, c et d} OH = Orge d'hiver ; OP = Orge de printemps ; CIPAN = Culture intermédiaire piège à nitrates ; CIVE = Culture intermédiaire à valorisation énergétique

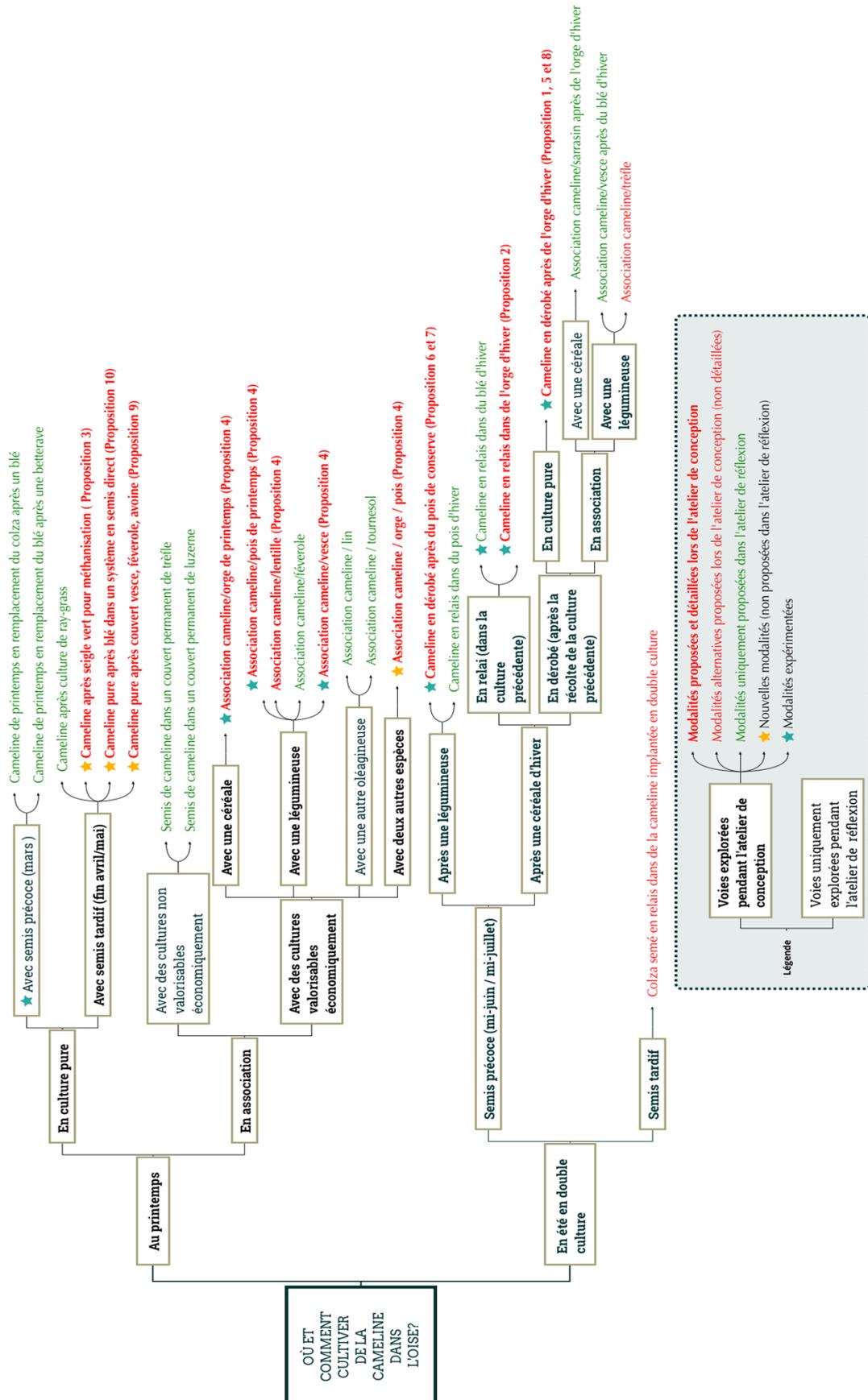


Figure 28 : Arbre d'exploration représentant les modalités conçues lors de l'atelier de conception (en rouge) et de l'atelier de réflexion multi-acteurs.

Au-delà de la diversité dans les modalités d'insertion, une diversité dans les modalités de conduite a également été observée. Par exemple, dans le cas des propositions 6 et 7, qui correspondent à une introduction de la cameline en dérobé après du pois de conserve, les agriculteurs ont respectivement proposé une implantation autour du 20 juin avec une densité à 8 kg.ha⁻¹ et une implantation autour du 20 juillet à 10 kg.ha⁻¹. De même, pour les propositions 1, 5 et 8 (correspondant à l'introduction de la cameline en dérobé après de l'orge d'hiver), des itinéraires techniques où différents leviers ont été combinés pour spécifiquement gérer les repousses d'orge dans la cameline ont été proposés (Table 18).

Table 18. Exemple de la diversité des modalités de conduite conçues pour une même modalité d'insertion de la cameline

Introduire la cameline en dérobé après de l'orge d'hiver	Combinaison de techniques mise en place pour limiter les repousses d'orge d'hiver dans la culture de cameline
Proposition 1	Retrait des pailles d'orge d'hiver après la récolte, semis dense (8 à 10 kg.ha ⁻¹) et désherbage mécanique avec une herse étrille.
Proposition 5	Retrait des pailles d'orge d'hiver après la récolte, semis dense (8 à 10 kg.ha ⁻¹) et désherbage chimique (anti-graminées)
Proposition 8	Semis dense (8 kg.ha ⁻¹), fertilisation (80 kg.ha ⁻¹ de 18-46) pour favoriser la levée et désherbage chimique (anti-graminées)

3.2.2. Origine de la diversité des modalités conçues

Différents facteurs permettent d'expliquer la diversité des modalités d'insertion et de conduite explorées au cours de l'atelier. Tout d'abord, le *type de sol* semble avoir impacté les itinéraires techniques conçus. Par exemple, l'introduction de la cameline dans des « petites terres » comme des cranettes ou des sables, typiques de la région (proposition 2, 8 et 10, voir Table 17), a conduit les agriculteurs à proposer des apports d'azote et éventuellement de phosphore (respectivement 30 unités d'azote par ha au stade rosette, 80 kg.ha⁻¹ de 18-46 au semis, et 65 kg.ha⁻¹ de 18-46 au semis en localisé), ce qui n'a été le cas dans aucune autre proposition, faites sur des sols avec des fournitures en éléments minéraux plus élevées. En d'autres termes, dans ces trois propositions, les agriculteurs ont spécifiquement justifié le choix de fertiliser par

rapport aux caractéristiques de leur sol : « *c'est des terres assez courtes, des cranettes ou des limons sableux, plutôt sableux que limons, donc je prévois de mettre de l'azote* » ou encore « [...] *là dessus j'y mets un apport d'azote [...] et je pense aussi du phosphore, au semis pour lancer la culture, surtout dans ces types de sol-là, les cranettes, où on libère rien du tout* ».

Un second facteur qui explique également la diversité des modalités conçues est le *type de travail du sol* mis en place par l'agriculteur. Par exemple, dans le cadre d'un système de culture sans labour (proposition 4), l'agriculteur a proposé un système de culture relativement complexe avec des associations de culture (incluant la cameline) pour permettre notamment la gestion à court et à long termes des adventices. Cet agriculteur est le seul à avoir proposé des associations, en lien avec son besoin impératif d'avoir une bonne couverture du sol, pour maîtriser les adventices. Un second exemple est la différence de densité de semis, mentionnée plus haut, entre les propositions 6 et 7 (de 8 et 10 kg.ha⁻¹ respectivement) pour une même modalité d'insertion. Cette différence s'explique par la réalisation d'un semis direct dans la proposition 7, conduisant à une anticipation de l'agriculteur d'une éventuelle perte de pieds liée à son mode d'implantation.

Un troisième facteur explicatif est la *possession d'équipements spécifiques*. Par exemple, alors qu'une majorité des modalités d'insertion après l'orge d'hiver a été conçue en dérobé (proposition 1, 5 et 8), une modalité de semis en relais dans de l'orge d'hiver a pu être proposée par un agriculteur dans la mesure où il était en train de développer un système de semis à la volée (proposition 2).

Enfin, un quatrième et dernier facteur est *l'engagement de certains agriculteurs dans des mesures agro-environnementales* (MAE « phyto »), qui a conduit à l'exploration de modalités de conduite de la cameline limitant particulièrement l'usage d'intrants. Par exemple, dans la proposition 1, l'agriculteur, qui initialement souhaitait appliquer un traitement anti-graminées pour limiter la gestion des repousses d'orge, a finalement retenu une proposition alternative, faite par un autre participant, d'effectuer un désherbage mécanique pour « *se passer d'un herbicide* ». Dans la même optique, dans la proposition 10, l'agriculteur propose de combiner un semis tardif (« *quand le sol est réchauffé* ») à forte densité (10 kg.ha⁻¹) avec la réalisation éventuellement d'un faux-semis (si les conditions le permettent) pour s'affranchir d'un traitement herbicide.

3.2.3. Fonctions attendues de la cameline

En tant que culture de printemps à cycle court pouvant être cultivée à bas niveau d'intrants et valorisable économiquement, la cameline est considérée, par une partie des agriculteurs, comme une culture permettant de *valoriser les terres à faible potentiel* (pouvant correspondre à différents types de sol en fonction des exploitations). En effet, du point de vue agronomique, la cameline permet un allongement et une diversification des rotations pratiquées dans ces types de sol, souvent courtes et basées sur des cultures d'hiver. Elle contribue donc, à long terme, à maîtriser les adventices à l'échelle de la rotation. Du point de vue économique, elle permet ainsi une économie d'intrants à l'échelle de la rotation sur le long terme. Lorsqu'elle est introduite en double culture, elle permet également une augmentation de la marge à l'échelle de la rotation, dans des sols où les objectifs de rendement pour les cultures principales peuvent être limités.

En mobilisant les mêmes caractéristiques (cycle court, bas intrants, valorisable économiquement), la cameline est également considérée par certains agriculteurs comme une culture permettant de *répondre à des exigences réglementaires*. Ainsi dans le cas de l'introduction après un pois de conserve (proposition 6 et 7), la cameline est présentée comme « *une solution pour répondre à un aspect réglementaire* ». En effet, dans cette situation, la cameline remplace la CIPAN obligatoire après un pois de conserve pour limiter les pertes d'azote. À l'inverse, dans les systèmes de culture incluant des cultures à vocation énergétique (CIVE) dans le cadre d'un projet de méthanisation, la cameline, introduite en culture de printemps, permet de répondre à l'exigence réglementaire de cultiver une espèce valorisable économiquement entre deux CIVE (proposition 3). Enfin, en tant que culture adaptée à la conduite à bas niveau d'intrants et en permettant potentiellement de diminuer les intrants sur les cultures suivantes (par exemple en supprimant un traitement anti-puceron et un désherbage chimique dans un blé semé tardivement après une cameline en double culture, proposition 8), la cameline apparaît comme une opportunité pour *répondre aux objectifs des mesures agro-environnementales* dans lesquelles sont engagés certains agriculteurs, comme évoqué plus haut.

3.2.4. Identification de trous de connaissances

De manière générale, la combinaison des différents dispositifs (atelier multi-acteurs, réseau d'essais multi-local et pluriannuel, essais agriculteurs-expérimentateurs, tour de plaine et réunion d'échanges, atelier de conception) a permis aux agriculteurs de progresser sur les modalités d'introduction de la cameline dans leur système de culture. Par exemple, les trous de connaissances relatifs à l'implantation de la cameline (date, densité et méthode de semis), soulevés dans le cas de l'introduction de la cameline en double culture après de l'orge d'hiver (CHAPITRE 1, Figure 10), ne semblent plus être bloquants lors du dernier atelier de conception. Cependant, l'exploration de nouvelles modalités d'insertion et l'approfondissement dans la conception des modalités de conduite ont conduit les agriculteurs à formuler de nouvelles interrogations. Dans la continuité de l'atelier de réflexion et des essais agriculteurs-expérimentateurs, des questions relatives à l'effet précédent de la cameline sur différentes cultures (blé, sorgho), et particulièrement sur son éventuel effet allélopathique, ont été soulevées. De nouvelles interrogations en lien avec la gestion de la fertilisation azotée ont également été évoquées. Plus particulièrement, la possibilité et les modalités d'utilisation de matière organique comme source de fertilisation azotée ont été discutées. Les besoins de la cameline en différents éléments minéraux (phosphore, bore et soufre notamment) ont également été abordés. Enfin, la capacité de la cameline à être cultivée dans des terres argileuses, caractérisées par une humidité très importante, a également été questionnée.

4. Discussion

L'objectif de ce chapitre était de fournir des éléments de réflexion autour de l'organisation d'un processus de conception pour accompagner des agriculteurs dans l'introduction d'une nouvelle espèce, dans leurs propres systèmes de culture, en s'appuyant sur des connaissances produites localement. Après avoir mis en lumière les originalités de la démarche adoptée dans cet atelier de conception, nous reviendrons sur les points forts et les points faibles de l'organisation de cet atelier par rapport à notre objectif. Enfin, nous discuterons en quoi les résultats issus de cet atelier constituent un support intéressant pour accompagner la conception de systèmes de culture incluant la cameline par d'autres agriculteurs du territoire de l'Oise et au-delà.

4.1. Quelles conséquences de l'organisation proposée sur l'exploration et le processus de conception par les agriculteurs ?

4.1.1. Originalité de la démarche

L'organisation de l'atelier de conception que nous avons mis en œuvre se caractérise par (i) la mobilisation de connaissances produites localement et (ii) une conception des agriculteurs par et pour eux-mêmes (chaque agriculteur conçoit dans sa propre situation). Cette organisation se distingue de celle usuellement mise en place dans les ateliers de conception. En effet, le partage de connaissances ne repose que très rarement sur des connaissances uniquement locales, comme nous l'avons proposé. En général, l'apport de connaissances plutôt génériques, *via* des experts, sur le fonctionnement du champ cultivé (processus) ou sur les effets de différentes pratiques sur ces processus ou sur les services attendus est favorisé (Reau et al., 2018). De plus, si des témoignages d'agriculteurs peuvent également compléter cet apport de connaissances théoriques, avec pour ambition de présenter des innovations et leurs conditions de réussite, ils ne sont pas systématiquement locaux (i.e. fournis par un agriculteur partageant un contexte pédoclimatique ou socio-technique proche des participants), comme c'est le cas pour les essais d'agriculteurs. D'autre part, lors de la phase d'élaboration des prototypes de système de culture, que ce soit dans le cas de pairs qui imaginent un système de culture pour un agriculteur central ou dans le cas d'ateliers qui ne travaillent pas spécifiquement pour un agriculteur, les participants ne conçoivent jamais eux-mêmes dans leur propre situation et pour un futur proche (dans

un premier temps) afin que « *chacun réalise l'exercice avec un certain détachement et une grande ouverture d'esprit dans la mesure où cela ne le concerne ni directement ni immédiatement* » (Reau et al., 2018).

4.1.2. Concevoir dans sa propre situation : quel risque d'un effet de fixation ?

L'objectif à travers la réalisation d'une conception non située et à long terme, comme proposée par Reau et al. (2018) est de s'affranchir de potentiels effets de fixation (*i.e.* le fait d'être concentré sur un petit nombre de solutions très restreintes), classiquement rencontrés dans les processus de conception collective (Agogué et al., 2014a, 2014b). Dans notre cas, l'analyse de la diversité des propositions d'agriculteurs témoigne d'une exploration relativement importante. En effet, outre l'insertion de la cameline après de l'orge d'hiver, qui a été proposée trois fois (avec cependant des modalités de conduite différentes), les autres propositions ont été différentes selon les agriculteurs. De plus, certaines propositions (ex : colza semé en relais dans le cameline implantée en double culture, l'association cameline/pois/orge, la cameline dans une rotation avec des CIVE) sont des propositions relativement originales, qui ont soulevé pour les agriculteurs des défis techniques et qui reflètent donc une exploration par certains agriculteurs au delà du « techniquement faisable et techniquement possible demain dans mon exploitation ». Cependant, l'analyse des propositions met également en lumière que, dans certaines situations, l'exploration aurait pu être plus large en s'affranchissant de la consigne donnée : « comment cultiveriez vous *dans votre exploitation ?* ». Par exemple, dans la proposition 10, l'agriculteur mentionne « *dans le cas de ma rotation, je pourrais envisager de faire une association cameline/pois [au printemps] mais comme je ne suis pas équipé, je la mets en pure [la cameline]* ». Enfin, nous faisons l'hypothèse qu'en favorisant le partage des propositions de tous les participants, au détriment des échanges entre pairs (qui ont, par souci de temps, été limités à une dizaine de minutes par cas, nous avons pu également limiter l'exploration. En effet, nous avons vu que dans le cas de la proposition 1, l'agriculteur s'était emparé d'une solution alternative proposée par un participant¹⁷ qui lui a permis d'explorer une voie différente des deux autres agriculteurs ayant également proposé d'implanter la cameline après de l'orge d'hiver (Table 18). Ainsi, à d'autres moments de l'atelier, des

¹⁷ Pour rappel : le désherbage mécanique de la cameline pour gérer les repousses d'orge en substitution à l'application d'un traitement anti-graminées.

propositions alternatives proposées par les pairs ont été reconnues comme potentiellement intéressantes, mais n'ont pas été creusées. Par exemple, lorsque la proposition de culture de la cameline en associée avec du trèfle en double culture a été mentionné par l'agriculteur 6, l'agriculteur 2 a formulé son intérêt pour cette alternative (« *Moi ça pourrait être intéressant dans mon système s'il y a de l'orge de printemps après* »), mais cette proposition n'a pas été développée.

4.1.3. Mobiliser des connaissances uniquement locales : quel impact sur la conception ?

Comme nous l'avons mentionné précédemment, une des caractéristiques de l'atelier mis en œuvre était de baser le partage de connaissances uniquement sur des connaissances produites localement, soit par des agronomes, soit par des agriculteurs, soit par des échanges multi-acteurs. Plus particulièrement, ces connaissances ont été formalisées sous forme de schéma (ou modèle) conceptuel, classiquement utilisé en agronomie, notamment pour accompagner les processus de conception à partir d'un diagnostic agronomique (voir par exemple Valantin-Morison et Meynard, 2012). Cependant, en proposant un modèle situé, i.e. non exhaustif sur l'ensemble des processus existants, mais représentant uniquement ceux ayant un impact localement (compte tenu des observations), l'objectif attendu était de rendre ces connaissances plus actionnables, i.e. mobilisables par les agriculteurs dans leur activité de conception dans leur exploitation. Plusieurs exemples permettent d'illustrer que ces connaissances ont effectivement été mobilisées par les agriculteurs. Un premier exemple, est le choix d'un semis à haute densité (8 à 10 kg.ha⁻¹) dans le cas de la cameline en culture pure, dont l'effet significatif sur la biomasse adventice par rapport à la simple densité a été démontré. Ainsi, l'agriculteur 3 argumente : « *comme je suis en culture pure, l'idée ça serait de tenter la double densité pour limiter la pression adventice* ». De même, l'agriculteur 4 ajuste la densité de l'orge (10 à 15 kg.ha⁻¹) dans sa proposition, « *compte tenu de la compétition que vous [en parlant de l'animateur] avez montré* ».

Cependant, ce choix méthodologique de centrer le partage sur les connaissances produites localement restreint les informations aux types de sol et aux scénarios explorés, ce qui peut également « limiter » la conception. Nous développerons ici deux exemples pour illustrer ce propos. L'agriculteur 7, ayant proposé une introduction de la cameline en double culture après du pois de conserve en limons-argileux, a également ouvert la discussion en questionnant la possibilité d'introduire la cameline dans des sols

argileux, caractérisés (selon l'agriculteur) par des alternances d'excès et de manque d'eau. Ce type de sol n'ayant pas été exploré lors des différents essais, la discussion s'est rapidement clôturée en raison d'un manque de connaissances (« *on n'a pas de recul, il faudra tester* »). Or, l'analyse de la littérature scientifique permet d'identifier que la cameline est effectivement sensible à l'hydromorphie (Gesch et Cermak, 2011; George et al., 2015). Ainsi, l'apport de ces connaissances scientifiques non locales lors du partage de connaissances aurait pu être utile pour l'agriculteur dans son processus de conception.

D'autre part, l'introduction de la cameline n'a, de manière générale, pas conduit, comme nous nous y attendions, à une reconception importante de la totalité du système de culture, excepté dans la proposition 8, où l'introduction de la cameline en double culture après de l'orge, a conduit l'agriculteur à proposer la suppression d'un traitement contre les pucerons et d'un désherbage sur le blé suivant. Dans les autres cas, l'introduction de la cameline a parfois conduit à modifier la rotation (ex : introduction de l'orge d'hiver dans la rotation dans la proposition 1 ou suppression de la culture de colza dans la proposition 5), mais n'a généralement conduit à aucun impact sur le reste du système de culture. Or, dans différents cas (ex : agriculteur 3, 4, 5), un éventuel effet allélopathique de la cameline sur la culture suivante envisagée (sorgho, blé ou tournesol) a été discuté. Si aucun essai n'a été réalisé sur cette thématique localement, nous pouvons faire l'hypothèse que le partage de connaissances sur les effets précédents de la cameline disponibles dans la littérature (par exemple l'effet précédent de la cameline sur blé dans le Montana, Obour et al. (2018)) aurait pu stimuler la reconception des systèmes de culture de manière plus globale.

4.2. L'atelier de conception : un dispositif de production de connaissances permettant d'accompagner l'introduction de la cameline à l'échelle du territoire ?

Nous avons vu dans la partie précédente que l'atelier de conception mis en œuvre a été un dispositif intéressant pour accompagner l'activité de conception du groupe d'agriculteurs mobilisés. En effet, chacun d'eux a pu, au cours de cet atelier, réfléchir à une proposition de système de culture qu'il pourrait mettre en place, dans son exploitation, pour produire de la cameline. Plus particulièrement, il est important de préciser à nouveau que, certains d'entre eux n'avaient jusqu'alors jamais cultivé de

cameline ni participé aux différents dispositifs d'expérimentation mis en œuvre au cours de la thèse. Cependant, multiplier, au sein d'un même territoire, la réalisation d'ateliers tels que celui que nous avons décrit dans ce chapitre, soulève de nouvelles questions d'organisation : est-ce toujours le rôle de l'INRA et de chercheurs d'animer ces ateliers ? Quels agriculteurs faut-il convier ? La réalisation d'atelier avec uniquement des agriculteurs « novices » aura-t-il toujours le même intérêt ? Pour accompagner l'introduction de la cameline dans les systèmes de culture à l'échelle du bassin d'approvisionnement de la bioraffinerie se pose alors la question de comment outiller de nouveaux agriculteurs qui voudraient également introduire cette nouvelle espèce dans leurs exploitations.

L'analyse des sorties de l'atelier nous permet d'identifier les connaissances qui pourraient être mobilisées dans cette optique. Le concept de « schéma décisionnel » a été développé dans le cadre du réseau Dephy Ecophyto, dans l'objectif de produire des ressources pour l'action à partir de l'analyse de pratiques innovantes (Petit et al., 2012). Plus précisément, ces schémas permettent de représenter le système technique sous la forme d'une combinaison de techniques en interaction, destinée à répondre à un objectif (ibid.). Ainsi, en permettant de représenter à la fois la logique de l'agriculteur et la cohérence de ses choix pour piloter le système de culture et pour l'adapter à d'autres contextes, ces schémas décisionnels sont des ressources utiles et efficaces pour accompagner le changement des systèmes de culture (Reau et al., 2016). Dans le cadre du réseau Dephy, ces schémas sont utilisés pour « *témoigner de systèmes de culture économes et réussis, et pour contribuer à faire adopter ces stratégies gagnantes par d'autres exploitations agricoles extérieures au réseau dans une logique de « généralisation »* ». Compte tenu de ces définitions, à l'image de ces schémas décisionnels, la retranscription et le partage des fiches cultures (c'est-à-dire incluant l'analyse *a posteriori* permettant de mettre en lumière les objectifs et les leviers mobilisés par les agriculteurs), pourrait être une ressource mobilisable, notamment par des conseillers du territoire (ou d'ailleurs), pour accompagner de nouveaux agriculteurs à introduire la cameline dans leur exploitation.

De plus, à partir de l'analyse des sorties d'une traque aux innovations sur les associations incluant des légumineuses, Verret et al. (2019) ont mis en évidence que (i) le partage de la diversité des combinaisons d'espèces cultivées localement, ainsi que (ii)

la réalisation d'arbres « fonction » reliant des objectifs à un ensemble d'options techniques permettant de les atteindre, en expliquant les processus agronomiques associés, avaient permis d'accompagner et de stimuler la conception de nouvelles associations de culture par des agriculteurs.

Ainsi, l'analyse transversale des propositions, qui nous a permis à la fois de présenter une diversité de modalités d'insertion et de conduite de la cameline et de faire émerger des fonctions attendues de cette culture, pourrait, après formalisation, être mobilisée dans des processus de conception. Enfin, dans le cadre de la transition agroécologique et de l'émergence d'un nouveau régime de conception remettant au centre l'agriculteur comme concepteur de son propre système (Salembier et al., 2018), se posent aujourd'hui des questions sur le partage des connaissances pour accompagner cette activité de conception, notamment *via* le développement d'outils web collaboratif (Guichard et al., 2015; Trouche et al., 2016). En se basant sur un diagnostic des usages de ces outils et plus globalement sur les ressources mobilisées par les agriculteurs et les conseillers engagés dans un processus de conception, Quinio et al. (2019) proposent trois prototypes de ressources qui pourraient être intégrés dans ces outils pour accompagner la conception : (i) des tableaux reliant des connaissances sur les cycles biologiques, les pratiques des agriculteurs et les processus fonctionnel associés, (ii) des arbres « fonction » que nous avons décrits précédemment et (iii) des schémas décisionnels. En s'appuyant sur cette analyse, il apparaît que (i) les schémas fonctionnels présentés lors du partage de connaissances, (ii) la retranscription des fiches culture et (iii) l'analyse transversale des propositions pourraient permettre d'alimenter un outil web collaboratif en vue d'outiller des agriculteurs, non plus uniquement sur le territoire de l'Oise, pour concevoir des systèmes de culture incluant de la cameline.

En conclusion, dans ce chapitre, nous avons vu que l'organisation d'un atelier de conception, caractérisé par une conception située et un partage de connaissances uniquement locales, est une approche prometteuse pour accompagner la conception, par des agriculteurs, de modalités d'insertion et de conduite de la cameline, adaptée à leurs propres situations. Les résultats de cet atelier mettent également en évidence la diversité des possibilités d'insertion et de conduite de la cameline dans l'Oise en lien avec une diversité d'environnements rencontrés sur le territoire et différents contextes

socio-techniques. Enfin, nous avons vu que la caractérisation de cette diversité est un élément clef pour accompagner l'introduction de la cameline à l'échelle du territoire, chez d'autres agriculteurs.

Remerciements

Ce travail n'aurait jamais pu voir le jour sans la participation et la contribution active de l'ensemble des agriculteurs présents lors de l'atelier. Nous tenons donc à remercier MM. Philippe Carpentier, Pierre-Louis Carrier, Vincent Cavrois, Bruno Delacour, Hervé de Smedt, Guillaume Le Pogam, Denis Poiret, Guy Sara et Alex Vandeputte. Nous remercions également Laurence Legrand, de la chambre d'agriculture de l'Oise qui a contribué à l'organisation de cet atelier de conception. Enfin, nous remercions d'une part les membres du personnel technique de l'UMR Agronomie INRA/AgroParisTech (Arnaud Butier, Éléonore Courteau, Gilles Grandeau et Véronique Tanneau) qui ont participé à la réalisation et l'analyse des expérimentations, et d'autre part l'ensemble des personnes qui ont contribué à la production des connaissances partagées dans cet atelier, notamment Hugo Gibert et Anne-Raphaëlle Lorent dans le cadre de leur stage de fin d'études et Fabien Ferchaud pour sa précieuse aide pour les simulations avec le modèle LIXIM.

Discussion générale

En s'appuyant sur le cas de la cameline, l'objectif de cette thèse est de proposer une démarche pour raisonner et accompagner l'introduction de nouvelles espèces dans les systèmes de culture d'un territoire, en s'intéressant particulièrement à la question de la production de connaissances sur ces espèces de diversification, souvent orphelines de recherche. Nous reviendrons tout d'abord sur cet objectif, puis nous nous intéresserons aux perspectives qu'ouvre ce travail de thèse.

1. Produire des connaissances sur une espèce de diversification dans une perspective agroécologique

Une des questions de recherche que nous avons abordé est : comment produire des connaissances actionnables sur les espèces de diversification, *i.e.* des connaissances permettant de raisonner et d'accompagner leur introduction, à court terme, dans les systèmes de culture d'un territoire ?

Dans un premier temps, nous reviendrons sur la nature et la diversité des connaissances produites au cours de ce travail (§ 1.1). Puis, nous analyserons en quoi cette production de connaissances actionnables se distingue des itinéraires de production de connaissances classiques mis en œuvre sur les espèces majoritaires (§ 1.2).

1.1. Une production de connaissances très diversifiée

Par l'articulation entre des phases de conception (par des agronomes, des agriculteurs ou un collectif d'acteurs), de mise en culture de la cameline en parcelles agricoles et d'échanges entre acteurs, la démarche que nous avons élaborée a conduit à une production de connaissances originale, par la diversité des types de connaissances produites. Nous proposons ici d'en faire le bilan.

Tout d'abord, notre travail a contribué à identifier une large **gamme de modalités d'insertion et de conduite de la cameline, adaptées à une diversité de situations locales et singulières** caractérisées par la combinaison d'un milieu (type de sol) et d'un cadre d'objectifs et de contraintes de l'agriculteur (CHAPITRE 4, Figure 28). L'explicitation des logiques d'action des agriculteurs sous-jacentes à ces modalités (réelles dans les

essais agriculteurs-expérimentateurs ou virtuelles dans les ateliers de conception) a également permis **d'identifier les fonctions attendues de la cameline** (ex : allongement des rotations, gestion des adventices à l'échelle de la rotation, réduction de l'usage des intrants à l'échelle de la rotation, augmentation de la marge par la double culture) et **les critères d'évaluation et de pilotage utilisés par les agriculteurs**. Par exemple, pour caractériser la présence d'adventices, les agriculteurs mobilisent d'autres indicateurs que la biomasse totale (l'indicateur retenu par les agronomes) et raisonnent plutôt par espèce d'adventice, en fonction des difficultés potentielles associées à leur présence. Ainsi, une grande quantité de chénopodes ne représente pas un réel problème pour certains agriculteurs, tandis que la présence de quelques chardons (en raison de son caractère vivace et de son impact sur les cultures suivantes) ou de liseron en faible quantité (pour la gestion de la récolte de cameline) peut être réellement problématique. Enfin, la mise en œuvre des essais par les agriculteurs leur a permis **d'acquérir un savoir-faire sur la conduite de la cameline** (ex : comment semer la cameline, comment la récolter, comment sécher la récolte, etc.).

En parallèle, l'évaluation expérimentale de quatre itinéraires techniques de la cameline de printemps, dont trois mobilisant des régulations biologiques pour s'affranchir de l'utilisation d'herbicide, nous a permis **d'explicitier et de quantifier des processus biologiques** permettant la régulation des adventices. Plus particulièrement, la relation négative entre la biomasse adventice et la biomasse cultivée totale, à la récolte, nous a permis de mettre en évidence un phénomène de compétition post floraison, s'expliquant majoritairement par des taux de croissance des espèces plus importants dans les associations après la floraison (CHAPITRE 2). De plus, la régulation plus importante des adventices dans le traitement en double densité (DD) a également permis d'émettre des hypothèses sur la compétition pour les ressources telles que l'azote, déjà observé pour d'autres cultures (Mohler, 2001; Li et al., 2018), mais qui restent encore à vérifier pour la cameline par des travaux complémentaires. Aujourd'hui les travaux sur la gestion des adventices sans herbicide restent rares et seuls quelques études se sont intéressées à l'explicitation de ces dynamiques de compétitions (Saucke et Ackermann, 2006) ou à l'impact de ces compétitions sur le développement et le fonctionnement de la culture (Gao et al., 2018).

Des connaissances ont également été produites sur **les facteurs explicatifs de la variabilité du rendement et de la qualité des grains** dans la région d'étude, dont l'INN et le mildiou pour le rendement et des facteurs climatiques (durée de la période de remplissage des grains, hautes températures pendant le remplissage des grains) pour la composition de l'huile (CHAPITRE 3). Certains de ces facteurs identifiés ont permis de conforter des résultats précédemment reportés dans la littérature, comme l'effet de l'azote sur le rendement (Bronson et al., 2019; Jiang et Caldwell, 2016), d'autres ont plutôt été spécifiques à notre région d'étude (comme le mildiou, très peu présent sur la cameline aux Etats Unis et au Canada) et n'ont été que peu étudiés dans la littérature.

Comme nous l'avons montré dans les discussions des différents chapitres, ces connaissances peuvent contribuer à la conception de systèmes de culture agroécologiques incluant de la cameline par des agronomes (voir CHAPITRE 2 et CHAPITRE 3) ou par des agriculteurs dans leurs propres fermes dans une logique de conception pas-à-pas. Par exemple, un des agriculteurs du réseau « agriculteurs-expérimentateurs » ayant testé d'introduire la cameline après du pois de conserve et ayant rencontré des problèmes de désherbage qu'il a expliqué par une mauvaise gestion des adventices dans sa culture de pois, a proposé lors de l'atelier de conception, un itinéraire technique prenant en compte ce facteur, et en proposant une alternative avec du travail du sol avant le semis de cameline en cas d'échec de désherbage dans sa culture de pois. En s'appuyant sur la classification proposée par Meynard (2016), dans le numéro spécial de la revue *Agronomie Environnement et Société* sur « *les savoirs agronomiques pour l'action* », notre production de connaissances se caractérise donc par une combinaison entre des savoirs pour comprendre (ex : les processus), des savoirs pour agir (ex : les règles de décision issues des apprentissages ou les indicateurs de pilotage) et des savoirs pour changer (ex : les résultats des diagnostic agronomiques), qui constituent dans leur ensemble un bagage de connaissances actionnables.

1.2. Une production de connaissances réalisée de manière économe

Comme nous l'avons vu en dans l'état de l'art, la transition vers des systèmes de culture agroécologiques questionne les méthodes de production de connaissances en agronomie. Comme le mentionnent Girard et Navarrete (2005) : « *L'évolution rapide des enjeux socioéconomiques auxquels est confrontée l'agriculture, leur complexité*

grandissante, leur élargissement au monde rural et non plus seulement agricole, poussent à diversifier les modes de production de connaissances, requérant de la recherche agronomique des réponses rapides, évolutives, sans qu'il soit toujours possible d'attendre que les mécanismes biologiques sous-jacents soient parfaitement connus. ». Comme nous l'avons vu dans la partie précédente, une diversité de connaissances a été produite au cours de la thèse, dans un temps relativement réduit (entre 2016 et 2019, Figure 8). En permettant de produire rapidement des connaissances actionnables sur une nouvelle espèce avec des moyens de recherche mis en œuvre relativement limités (*i.e.* une production de connaissances de manière économe), notre démarche constitue une alternative au régime classique de production de connaissances historiquement mis en œuvre sur les espèces majoritaires, basé sur une compréhension fine et exhaustive des processus (Bonneuil et Thomas, 2009; Jas, 2016; Meynard, 2016). Nous revenons ici sur les principaux éléments qui, de notre point de vue, caractérisent cette production économe de connaissances.

1.2.1. L'identification et la hiérarchisation des trous de connaissances bloquant pour la conception

Une première caractéristique de notre approche concerne la manière dont a été définie la priorisation des connaissances à produire. En d'autres termes, l'objectif n'était pas de combler des trous de connaissances existants sur la cameline, définis à partir d'un état de l'art sur ce qui était déjà connu ou pas, mais de sélectionner les manques de connaissances bloquant pour la conception de systèmes de culture incluant de la cameline dans l'Oise.

Dans notre démarche, cette identification et cette hiérarchisation des trous de connaissances ont tout d'abord été permises par une **analyse contextualisée de la littérature grise et scientifique** en vue d'une mise en œuvre (Figure 8). Par exemple, l'émergence de la question « comment cultiver de la cameline sans herbicide dans différents environnements ? » (CHAPITRE 2) a découlé du constat de l'enjeu agronomique que représente la gestion des adventices dans la cameline, issu d'une revue de littérature (Berti et al., 2016), que nous avons confronté (i) au contexte de bioraffinerie, dont un des objectifs est de limiter l'usage des intrants, au cours de la production de matière première, pour limiter les impacts environnementaux à l'échelle de la filière, et (ii) au contexte réglementaire européen changeant quant à l'utilisation des herbicides. Nous avons donc décliné un manque de connaissances générique sur la gestion des

adventices identifié dans la littérature (*i.e.* le besoin de trouver des solutions pour gérer les adventices en cours de culture), en une question de recherche pertinente pour notre cas d'étude (*i.e.* comment cultiver la cameline sans herbicide).

Dans le cadre du développement des espèces de diversification en France, des travaux (notamment portés par le groupe de travail DECOR¹⁸) se sont intéressés à la mise en place de méthodes spécifiques d'analyse de la littérature pour faire émerger des trous de connaissances potentiellement bloquants pour accompagner la diversification (Andrivon et al., 2017). Plus particulièrement, les auteurs proposent de s'appuyer sur une matrice permettant de décliner des fonctions attendues d'une culture de diversification sur différents critères (agronomique, environnemental, économique, social et alimentaire) et à différentes échelles (parcelle, exploitation, territoire et filière). L'identification de ces différentes fonctions (par ex : réduction du risque de pertes d'azote nitrique pour la combinaison agronomie*parcelle ou renforcement des auxiliaires pour la combinaison environnement*territoire/paysage), par des chercheurs et/ou des acteurs, permet par la suite de définir des équations de recherche bibliographique par une combinaison de mots clés pour chaque case de la matrice. L'analyse bibliométrique issue de ces recherches fait ainsi émerger des thématiques orphelines de recherche (comme par exemple l'impact du chanvre sur les sol)(Le Doaré, 2016). Si cette méthode reste *a priori* relativement lourde à mettre en place, elle pourrait être utile pour définir des questions de recherche à traiter en priorité pour favoriser la diversification, pour des cultures pour lesquelles aucune revue de la littérature n'est disponible.

L'identification et la hiérarchisation des trous de connaissances ont également été permises par la **réalisation d'activités de conception** (Figure 8). Par exemple, la conception, par les agronomes, des itinéraires techniques de la cameline de printemps sans herbicide a fait émerger des questions spécifiques sur les besoins en azote de la cameline pour raisonner la fertilisation azotée dans les différents traitements à partir de la méthode du bilan. De même, la conception d'itinéraires techniques de la cameline en double culture après de l'orge, au cours de l'atelier de réflexion multi-acteurs a conduit à l'identification de trous de connaissances sur la densité de semis, la fertilisation azotée

¹⁸ Diversification des Espèces Cultivées dont les Espèces Orphelines de Recherche

et l'impact des résidus de l'orge sur le développement de la cameline (CHAPITRE 1), pour lesquels les connaissances existantes étaient peu utilisables (courbes de réponse). La capacité d'une activité de conception à faire émerger des trous de connaissances a notamment été formalisée dans le cadre de la théorie C-K (Hatchuel et Weil, 2003, 2009) dans laquelle la conception résulte d'une expansion conjointe d'un espace des concepts et d'un espace des connaissances. Ainsi, la conception d'une nouvelle méthode pour raisonner la fertilisation azotée a également conduit à l'identification de trous de connaissances, plus particulièrement sur l'effet de carences azotées temporaires sur le rendement et la teneur en protéines du blé et sur le développement d'une méthode pour évaluer facilement le statut azoté d'une plante au cours du temps (Ravier et al., 2018).

1.2.2. La construction d'analogies avec des cultures « plus connues »

Compte tenu des connaissances réduites sur la cameline et l'impossibilité dans le cadre de la thèse (*i.e.* en temps limité) de produire par expérimentation toutes les connaissances que nous avons identifiées comme bloquantes pour la conception (§ 1.2.1), le recours aux analogies avec d'autres cultures plus connues a contribué à combler des trous de connaissances à moindre coût dans notre approche. Par exemple, lors de l'atelier de conception, plusieurs agriculteurs ont conçu leur stratégie de fertilisation en mobilisant des connaissances sur le fonctionnement d'autres cultures oléagineuses, notamment le colza, comme en témoigne la retranscription d'échanges entre deux agriculteurs ci-dessous :

Agriculteur 1 : *« je prévois quand même de mettre de l'azote plus du soufre. C'est quand même une oléagineuse, on n'en parle pas souvent du soufre mais je pense qu'il faut qu'on en apporte [...] Le soufre je pense que c'est important ».*

Agriculteur 2 : *« Oui ! On l'a encore vu cette année, c'est catastrophique le colza sans soufre [...] bon après c'est peut-être pas les mêmes besoins, c'est une culture à cycle court ».*

Des analogies avec d'autres cultures (par exemple le sarrasin) ont également été conduites, par les agriculteurs, dans le cadre de l'évaluation des essais agriculteurs-expérimentateurs pour expliquer des observations faites sur la cameline :

Agriculteur 3 : « *Moi je pense qu'on a eu des conditions d'été pas top au moment de la floraison, il y a peut-être eu un cumul d'eau trop important à un moment donné. Dans les sarrasins, on a eu ce problème-là, un peu de froid, début septembre, il faisait pas très chaud, il y avait beaucoup d'eau [...] et donc ça explique peut-être un retard de floraison [pour la cameline] ».*

Enfin, lors de la conception et de l'évaluation des itinéraires techniques sans herbicide, nous avons également mobilisé une analogie avec la culture de colza pour (i) estimer les besoins en azote en cameline, afin de réaliser les bilans prévisionnels pour piloter la fertilisation azotée des différents traitements (Annexe 1) et (ii) calculer l'INN de la cameline dans le cadre du diagnostic de la variabilité des performances de la cameline (CHAPITRE 3, § 2.3.1).

Le recours à l'analogie au cours des processus de conception est relativement courant (Bonnardel, 2000; Detienne, 2007), et notamment par les agriculteurs lorsqu'ils abordent une nouvelle culture (ou plus largement une nouvelle technique). Par exemple, Girard et Navarrete (2005) montrent que les producteurs de safran expliquent leurs pratiques de fertilisation en s'appuyant sur différentes cultures comme la jacinthe (en raison de similitudes botaniques) ou le tabac (considéré comme analogue en termes d'exigence en minéraux). Cependant, comme le montrent les auteurs, ces analogies, si elles conduisent à transposer des connaissances entre deux espèces classées ensemble à tort, peuvent conduire à des conclusions erronées. Les analogies doivent donc reposer sur des appariements entre espèces, scientifiquement fondés (par des similitudes morphologiques ou de fonctionnement, par exemple), comme l'illustre cet exemple issu de Fleury (1994) : « *Quand on évoque la régulation par l'indice foliaire et la structure morphogénétique du nombre de tiges [chez le blé], on utilise leur position verticale et les feuilles qu'elles portent, ainsi que le rang des bourgeons avant élongation : ce fonctionnement pourrait s'étendre donc à la totalité des cas où cette structure est présente (tiges de luzerne, tiges de pois ou de colza d'hiver, ...)* ».

En raison de leur proximité dans la classification phylogénétique, de leur ressemblance morphologique et de fortes similitudes dans les phases de leur cycle de développement, l'analogie entre la cameline et le colza, que nous avons choisi de mobiliser à plusieurs reprises dans notre travail, nous a semblé cohérente. Le bilan

azoté *ex-post* pour l'année 2017, réalisé à partir des mesures de rendements et d'azote absorbé par la cameline, a permis de calculer *a posteriori* les besoins en azote de la cameline (Lorent, 2018). La valeur ainsi calculée de 5 kilogrammes par quintal (en moyenne) est proche de la valeur des besoins en azote du colza de printemps utilisée dans le bilan (5,2 kg.q⁻¹, GREN PICARDIE, 2015), confortant, de fait, le choix de cette analogie. Si le recours aux analogies nous semble être une piste prometteuse pour combler des manques de connaissances sur les espèces mineures dans une perspective de production de connaissances « économe », de nombreuses questions restent encore ouvertes sur comment les réaliser et les valider.

1.2.3. La combinaison de différentes formes d'expérimentations au champ

Si nous avons vu que les moments d'échanges en salle et au champ ont contribué à la production de connaissances actionnables (CHAPITRE 4), celle-ci s'est toutefois majoritairement appuyée sur la mise en œuvre et l'évaluation de différentes modalités d'insertion et de conduite de la cameline au sein des deux dispositifs expérimentaux.

Au-delà de favoriser les apprentissages des agriculteurs en leur permettant de mettre en œuvre et d'expérimenter par eux-mêmes des modalités d'insertion et de conduite de la cameline en double culture, et ainsi de poursuivre la conception par l'action (Salembier, 2019), les essais agriculteurs-expérimentateurs ont également été capitalisés pour faire expliciter, au cours de visite de terrain ou par des enquêtes, les objectifs attendus et les logiques d'action mobilisées par les agriculteurs (CHAPITRE 1). Ainsi, à l'image des dispositifs de traque aux innovations (Salembier et al., 2016; Blanchard et al., 2017; Verret et al., 2019), ce dispositif a permis d'identifier des indicateurs d'évaluation et de pilotage et des règles de décision mobilisées par des agriculteurs, tout en s'affranchissant de l'étape d'identification d'agriculteurs innovants, parfois chronophage, et difficile à mettre en œuvre dans notre cas, le nombre d'agriculteurs cultivant de la cameline en conventionnel étant très réduit. La réalisation de l'atelier de réflexion multi-acteurs, s'est donc substitué à cette étape d'identification d'agriculteurs innovants, et a permis de stimuler l'innovation au sein d'un groupe d'agriculteurs pré-identifiés, qui ont expérimenté des innovations et ont ensuite été enquêtés.

En parallèle, le réseau d'essais multi-local et pluriannuel a permis de mieux comprendre les processus biophysiques en jeu dans la gestion des adventices et la variabilité des performances de la cameline (CHAPITRE 2 et CHAPITRE 3) par la mise en œuvre d'un suivi expérimental spécifique et plus fin (prélèvements de sol, mesures de biomasse régulières, analyse teneur en azote, rendement, etc.) et par la création d'une gamme d'états du milieu et du peuplement, induite par le caractère multi-local et pluriannuel du dispositif et par les différentes conduites explorées. Toutefois, ce dispositif est resté exclusivement centré sur des modalités d'insertion de la cameline de printemps, notamment pour des questions de faisabilité technique et de temps de travail à engager dans le cadre d'un dispositif plus complexe.

La combinaison de ces deux dispositifs, pour contribuer à la production de connaissances diversifiées, *de manière économe*, apparaît donc intéressante à deux titres. Tout d'abord, la réalisation des essais agriculteurs-expérimentateurs a permis d'élargir la gamme des modalités explorées (avec les modalités en double culture) mais avec un investissement moindre de la part de la recherche : très peu de mesures ont été réalisées sur ces essais (rendement et taux d'humidité). À l'inverse, le suivi fin des expérimentations de printemps a permis une montée en généralité et une validation des connaissances produites par le dispositif agriculteurs-expérimentateurs. Par exemple, l'identification de l'INN comme facteur limitant majoritaire du rendement (CHAPITRE 3) a permis de valider le constat de l'effet du statut azoté de la culture sur le rendement, hypothèse avancée dans le cadre des essais agriculteurs-expérimentateurs à partir d'observations (CHAPITRE 1). Cette combinaison a donc permis de s'affranchir d'un risque possible dans des réseaux d'expérimentations conduites par les agriculteurs de manière informelle et indépendante, où les conclusions peuvent parfois rester implicites, comme le mentionnent Navarrete et al. (2018) à partir de leur analyse croisée de sept réseaux d'agriculteurs : « *chaque agriculteur pouvait tirer des conclusions sur sa propre expérience, mais ne l'a pas nécessairement rendue explicite au niveau collectif* ».

L'intérêt de valoriser les complémentarités entre différents dispositifs expérimentaux a déjà été mis en évidence dans la littérature, notamment entre des essais « systèmes » et des essais factoriels. Deytieux et al. (2012) précisent cette idée de la façon suivante : « [...] la mise en place d'essais factoriels en parallèle de

l'expérimentation 'système de culture' peut permettre de mieux comprendre un processus en isolant l'effet d'un facteur ou de mettre au point et valider une règle de décision ou une technique avant sa mise en œuvre dans le système de culture testé ». Plus largement, cette production de connaissances, de manière économe en moyens humains, expérimentaux et en temps, peut également passer par la combinaison avec d'autres dispositifs de production de connaissances (comme nous l'avons proposé avec la réalisation du tour de plaine et la réunion d'échanges autour des résultats). Par exemple, dans le cadre de la conception de systèmes de culture en protection intégrée en maraîchage, une traque aux innovations d'associations d'espèces maraîchères a été réalisée en complément d'essais réalisés en station expérimentale et d'un atelier de conception de conduites d'associations et a permis notamment d'enrichir le partage de connaissances de l'atelier (Navarrete et al., 2017). Dans notre cas d'étude, la réalisation d'une traque aux innovations à l'échelle de la France auprès de producteurs en Agriculture Biologique aurait pu contribuer à l'exploration de voies alternatives, notamment pour la gestion des adventices, qui est un problème fréquent en Agriculture Biologique. En particulier, des informations sur des modalités de désherbage mécanique, qui semble être une pratique mise en œuvre dans ces systèmes de production (Coulombel et Fontaine, 2009; Pousset, 2009), auraient pu être mobilisées pour la conception d'un traitement dans le cadre du réseau d'essais multi-local et pluriannuel. Ou encore, des agriculteurs innovants auraient pu venir témoigner de leur expérience dans le partage de connaissances de l'atelier de conception pour inspirer de nouvelles idées aux agriculteurs (Reau et al., 2018).

2. Raisonner et accompagner l'introduction d'une nouvelle espèce dans les systèmes de culture d'un territoire : retour sur la démarche mise en œuvre

Au-delà de la question de la production économe de connaissances sur une espèce orpheline de recherche, l'objectif de la thèse est également de proposer une démarche pour raisonner et accompagner l'introduction d'une nouvelle espèce dans les systèmes de culture d'un territoire. Après avoir discuté notre démarche (§ 2.1), nous reviendrons sur les spécificités de notre cas d'étude pour proposer des éléments de réflexion en vue d'une transposition à d'autres territoires et/ou d'autres cultures (§ 2.2).

2.1. Un dispositif d'innovation ouverte

L'activité de conception a occupé une place centrale au sein de notre dispositif en étant à la fois un moyen de produire des connaissances et un objectif en soi (re-conception par les agriculteurs de leurs systèmes de culture pour y introduire la cameline). Une caractéristique de l'activité de conception que nous avons menée est qu'elle s'est appuyée sur un collectif d'acteurs (agriculteurs, conseillers, agronomes d'instituts techniques agricole, chercheurs de différentes disciplines, représentants de la bioraffinerie). Au cours de ce processus, les différents acteurs, y compris les chercheurs, n'ont pas été impliqués de la même manière dans les différents dispositifs. Tout d'abord, dans le cadre des deux dispositifs expérimentaux (réseaux d'essais multi-local et pluriannuel et essais agriculteurs-expérimentateurs), les agronomes, d'une part, et les agriculteurs, d'autre part, se sont simultanément (mais non conjointement) engagés dans des activités de conception distinctes avec des objectifs propres (modalités de conduite de la cameline de printemps sans herbicide, d'une part, et faisabilité d'une cameline en double culture, d'autre part) mais dans une perspective commune de répondre à la question « *comment cultiver la cameline dans l'Oise pour approvisionner une bioraffinerie oléagineuse locale ?* ». **La conception a donc été distribuée** entre ces deux catégories d'acteurs, chacun réalisant des tâches distinctes tout en visant un objectif commun (Falzon et Darses, 1996). De plus, lors de l'atelier de réflexion, les différents acteurs ont conçu ensemble des modalités d'insertion et de conduite de la cameline, caractérisant ainsi **un dispositif de co-conception**, au sens de Falzon et Darses (1996) : « *Dans l'activité de co-conception, les partenaires de la conception développent la solution conjointement : ils partagent un but identique et contribuent à son atteinte grâce à leurs compétences spécifiques* ». La Figure 29 illustre la co-conception de cinq modalités d'insertion de la cameline lors de l'atelier de réflexion. Cette figure montre notamment le rôle de chaque catégorie d'acteurs dans l'émergence des propositions.

En faisant le parallèle avec le concept d'innovation ouverte défini dans le monde de l'industrie (Chesbrough, 2003), Berthet et al. (2018) caractérisent les dispositifs d'innovation ouverte en agriculture comme des approches de conception collective et participative qui « *suppriment les frontières entre les scientifiques et les décideurs du monde agricole, entre les agronomes et les agriculteurs, et entre les acteurs du secteur*

agricole et les concepteurs des autres secteurs ». Notre démarche peut donc se définir comme un **dispositif d'innovation ouverte**.

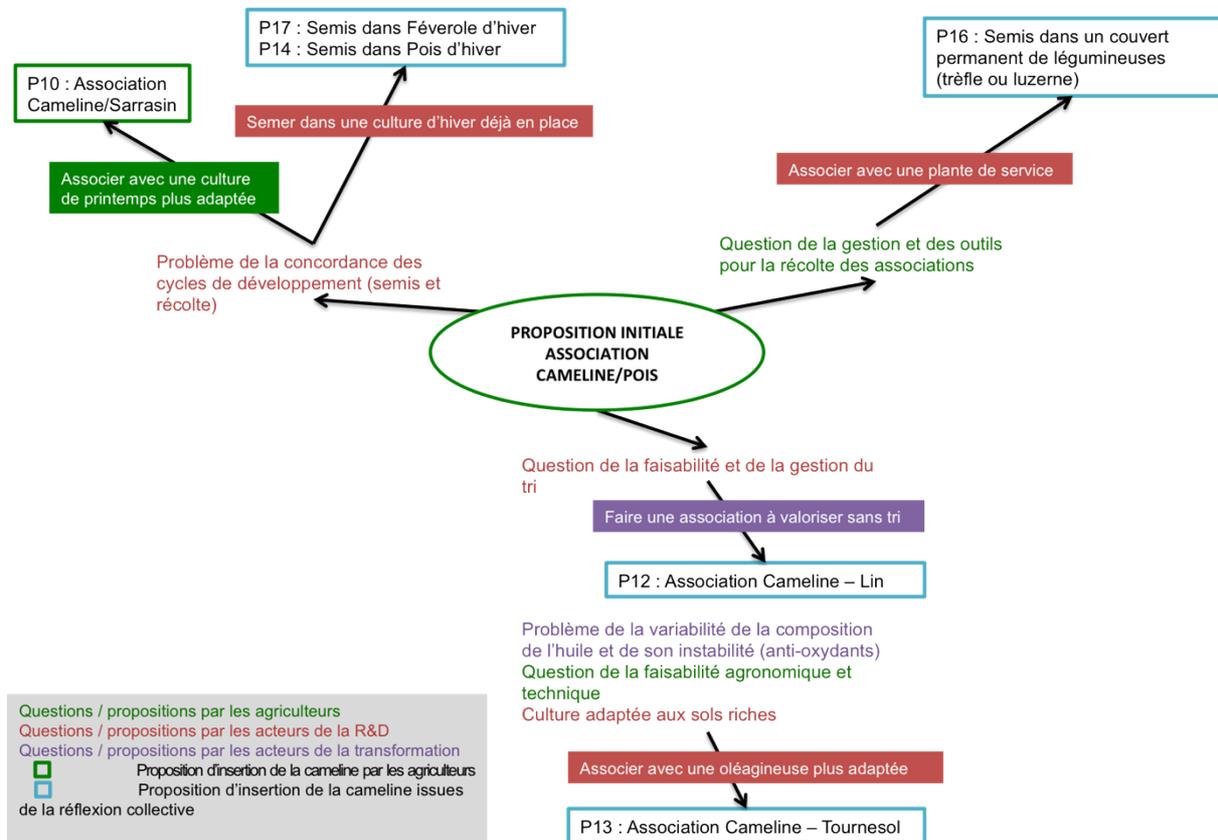


Figure 29 : Co-conception de cinq modalités d'insertion de la cameline à partir d'une proposition initiale faites par des agriculteurs.

La mise en œuvre de tels dispositifs d'innovation ouverte incluant une diversité d'acteurs suppose la mise en place d'un système de **gouvernance** efficace permettant (i) de mettre en connexion les différents acteurs, (ii) de faciliter le partage des connaissances détenues par chacun et nécessaires à la conception, et (iii) d'organiser une exploration commune (Berthet et Hickey, 2018). Dans notre cas, l'ensemble du dispositif a été initié et animé par les chercheurs en agronomie. Toutefois, d'autres acteurs comme les coopératives, ayant une légitimité pour coordonner un travail à l'échelle du territoire, ou bien les organismes de Développement Agricole (chambres d'agriculture, par exemple), peuvent également être à l'origine de telles initiatives, comme le montrent Barbier et al. (2012) dans le cas de la filière chanvre. A l'heure, où la transition agroécologique requestionne le rôle des différents acteurs du secteur agricole (Coquil et al., 2018), la question de la gouvernance, et notamment la place du conseiller agricole dans de tels dispositifs, reste ouverte.

2.2. Spécificités du cas d'étude

Alors qu'au démarrage du projet (en 2016), la cameline n'était pas cultivée en agriculture conventionnelle dans la zone d'étude, cent hectares de cameline, répartis sur une dizaine d'exploitations agricoles, soit en culture de printemps soit en double culture, ont été implantés en 2019 dans le cadre d'un partenariat avec le groupe AVRIL (L. Legrand, comm. pers.). Cette évolution témoigne de l'efficacité de la démarche proposée pour initier une dynamique territoriale autour d'une nouvelle espèce. L'objectif de cette partie est d'analyser les spécificités liées au cas d'étude qui ont contribué à favoriser cette démarche et d'en tirer des enseignements pour une application à d'autres territoires et/ou d'autres cultures.

2.2.1. Le projet de bioraffinerie oléagineuse territoriale

La réalisation de ce travail a été facilitée par le projet de développement d'une bioraffinerie oléagineuse locale, porté par la SAS PIVERT. En effet, ce projet, qui s'appuie sur une étroite collaboration à la fois avec des partenaires académiques (le Consortium Académique PIVERT) et des entreprises privées (le Club des Industriels PIVERT), a constitué un contexte favorable aux échanges multi-acteurs. Plus particulièrement, la préexistence de ce réseau d'acteurs organisés autour d'une ambition commune (*i.e.* le développement d'une bioraffinerie oléagineuse) a largement facilité leur mobilisation et leur implication dans les différents dispositifs. Par exemple, les acteurs qui ont participé à l'atelier de réflexion, hormis les agriculteurs, étaient soit impliqués dans un des projets de recherche du programme GENESYS, soit partenaires industriels (dont le groupe AVRIL, à l'origine du nouveau partenariat en cours). La mise en place de ces **espaces de conception privilégiés regroupant différents types d'acteurs**, comme les plateformes d'innovation (Schut et al., 2016), est un réel enjeu pour accompagner la transition agroécologique (Prost et al., 2016), et particulièrement dans le cas de l'introduction d'une nouvelle espèce, compte tenu des verrous interconnectés présents à l'échelle de la filière (Meynard et al., 2018). En facilitant les interactions entre acteurs et les actions collectives, ces plateformes constituent des environnements favorables pour raisonner de façon systémique et intégrée des innovations, et ont largement montré leur intérêt pour le développement agricole, notamment en Afrique (Angbo Kouakou et al., 2017; Dabire et al., 2017; Davies et al., 2018). À l'inverse, aux États-Unis, où des travaux de recherche sur la cameline sont en cours depuis plus de dix ans, l'absence de travaux

conjoints avec des industriels, permettant l'identification de débouchés, explique aujourd'hui, selon les chercheurs rencontrés, le faible développement de la cameline en tant que culture de rente – par ailleurs utilisée par les agriculteurs en tant que couvert d'interculture (Gesch et Berti, comm. pers.).

La confrontation de ces deux situations (notre cas d'étude et le cas des États-Unis) permet donc de conclure que l'identification d'un partenaire industriel potentiel et motivé, et la mise en place d'une collaboration active entre divers acteurs ayant un rôle clé dans la construction de la filière, semblent être deux éléments déterminant pour la mise en œuvre efficace d'une démarche d'accompagnement à la diversification dans un territoire.

2.2.2. Des agriculteurs regroupés au sein d'un même groupe de développement

Au-delà d'être localisés dans le territoire d'étude, les agriculteurs qui ont participé aux différents dispositifs (ateliers, expérimentations, etc.) appartiennent également au même groupe de développement, l'Association de Développement Agricole du Nord-Est de l'Oise (ADANE) qui regroupe trois CETA de la région. Tout comme pour le projet de bioraffinerie, la **préexistence de cette dynamique collective entre les agriculteurs** a largement facilité les échanges et le partage de connaissances au sein du groupe, lors des ateliers ou du tour de plaine, dans la mesure où les agriculteurs se connaissaient et avaient l'habitude de travailler ensemble.

Toutefois, l'impact sur la circulation et le partage des connaissances a été au-delà du dispositif. Par exemple, les résultats des différents essais ont été présentés lors de l'assemblée générale de l'ADANE en janvier 2019 et, en mai 2019, un voyage d'étude autour de la cameline, ouvert à l'ensemble des 80 adhérents de l'ADANE, a été organisé en Espagne, où un semencier sélectionnant des variétés de cameline est implanté. Cette dynamique, induite par l'existence du groupement, a contribué à la mobilisation de nouveaux agriculteurs lors de l'atelier de conception en juin 2019 et a permis également d'enrichir le bagage de connaissances des agriculteurs – anciens ou nouveaux -, qu'ils ont largement remobilisé au cours de l'atelier (citations extraites de l'atelier de conception : « *En Espagne, ils disaient qu'il fallait semer très superficiellement* » ou encore « *En Espagne, ils parlaient de l'andainier [la cameline] 8 jours avant* »). Le rôle de ces groupes d'agriculteurs dans les processus d'innovation est aujourd'hui largement reconnu (Goulet et al., 2008), en permettant de favoriser à la fois les apprentissages

individuels et collectifs (Kroma, 2006) et le partage autour des innovations (Dolinska et d'Aquino, 2016).

2.2.3. Une culture rustique à cycle court

Le choix de la cameline (par ailleurs justifié dans le cadre de cette étude, voir (Encadré 2), constitue également une spécificité qui nous semble intéressante de discuter. En effet, le caractère rustique de cette culture, ainsi que son cycle court, ont tout d'abord été favorables à l'exploration d'une large gamme de modalités d'insertion (en culture de printemps et en double culture) dans une diversité de milieux (notamment des sols à « faibles potentiels »).

Pour les mêmes raisons, la cameline a également été une culture de choix pour favoriser les expérimentations « libres » par les agriculteurs (essais « agriculteurs-expérimentateurs »). En effet, lorsqu'on s'intéresse à l'activité d'expérimentation par les agriculteurs (Leitgeb et al., 2014; Catalogna, 2018), le risque associé à l'expérimentation, et notamment le risque économique, est déterminant dans les choix mis en œuvre (surface dédiée à l'expérimentation, acquisition de matériel spécifique, etc.). Dans le cas de la cameline, la possibilité d'expérimenter en double culture (où la cameline pouvait, au pire des cas, avoir le rôle d'un couvert d'interculture) avec un investissement réduit (en lien avec une conduite à niveau bas intrant du fait de la rusticité de l'espèce) a contribué à créer un contexte favorable (*i.e.* avec un risque limité) pour mettre en œuvre ces expérimentations, malgré l'absence d'un débouché local concret pour cette culture. D'ailleurs, en dehors du cadre de la thèse, deux agriculteurs ont reconduit des essais sur la cameline en double culture l'année suivante (2018) pour affiner les propositions faites et mises en œuvre durant l'été 2017.

Cependant, toutes les espèces de diversification ne présentent pas des caractéristiques similaires. Or, comme nous l'avons montré à plusieurs reprises dans ce manuscrit, la réalisation d'expérimentations *par* les agriculteurs eux-mêmes, en interaction avec des expérimentations plus classiques, est essentielle pour accompagner la production de nouvelles connaissances sur les espèces de diversification. Dès lors, la question du développement de nouvelles formes d'expérimentations agronomiques pour accompagner des dispositifs d'innovation ouverte, tel que nous le proposons, se pose. Lors du tour de plaine réalisé en juin 2018 sur le réseau d'essais multi-local et pluriannuel, nous avons observé que certains agriculteurs avaient mis en place, en

parallèle des différents traitements « imposés » dans le cadre du dispositif, des modalités supplémentaires qui correspondraient mieux à leurs cadres d'objectifs et de contraintes (ex : une association cameline-vesce à Autrêches, Annexe 3). Ainsi, le développement de dispositifs combinant des modalités fixes, reconduites sur au moins deux années et bénéficiant d'un suivi fin, et des modalités « libres » conçues, gérées et évaluées par les agriculteurs eux-mêmes nous semble être une piste prometteuse. En comparaison avec notre approche où les expérimentations ont été dissociées dans le temps, ce type de dispositif aurait pour avantage de faciliter (i) la confrontation et la validation des données issues des expérimentations « libres » et (ii) l'hybridation entre connaissances scientifiques et empiriques, en étant réalisé dans des conditions similaires.

3. Perspectives

3.1. Quelles perspectives de recherche sur la cameline ?

Ce travail de thèse a permis d'initier une dynamique territoriale multi-acteurs sur la cameline. Comme nous l'avons mentionné dans la partie précédente, l'INRA, et particulièrement l'UMR Agronomie de Grignon, a joué un rôle clef dans la gouvernance de cette dynamique, avec des ambitions de recherche propres, à la fois autour de la production de connaissances sur une nouvelle espèce et de la construction d'une démarche pour accompagner la diversification des systèmes agricoles. Il est alors légitime de poser la question des suites à donner à ce travail et, plus particulièrement, d'identifier en quoi cette dynamique amorcée dans le cadre de la thèse peut être programmatique pour la recherche académique et pour la Recherche & Développement sur cette espèce.

Localement, nous avons déjà montré, en quoi certaines connaissances issues de l'ensemble de la démarche pouvaient devenir, après formalisation, des ressources intéressantes pour outiller un conseiller agricole dans son activité d'accompagnement autour de cette culture (CHAPITRE 4). Ainsi, la formalisation et la mise à disposition de fiches techniques synthétisant la diversité des modalités techniques explorées et mises en œuvre, et mentionnant les conditions de réussite ou d'échec qui ont été observées sur

le terrain, serait une suite à donner à ce travail. Par exemple, les différentes modalités alternatives sans herbicide étudiées pourraient être présentées dans ces fiches en mentionnant le risque plus élevé d'une forte pression adventice dans les sols sableux combiné à un travail du sol réduit (chapitre 2). Aujourd'hui, avec le développement du numérique, et la multiplication des plateformes collaboratives d'échanges de savoirs sur les pratiques agroécologiques (ex : GECO¹⁹, Osaé²⁰, etc.) ou sur des sujets plus spécifiques comme les adventices (ex : Plateforme Afroweeds²¹, Adventilles Network²², etc.), de nombreuses questions persistent sur la nature des connaissances à partager et leur formalisation pour fournir des connaissances actionnables pour la re-conception des systèmes de culture.

Du point de vue de la recherche agronomique, la question de la capitalisation des connaissances produites sur la cameline, pour accompagner la transition agroécologique à plus large échelle, reste encore ouverte. Les modèles constituent à la fois de bons outils pour explorer une diversité de scénarios (Rossing et al., 1997) ou pour évaluer des systèmes de cultures préalablement conçus (Colbach et al., 2014). Dans notre cas, nous avons essentiellement réalisé des évaluations multicritères à l'échelle de l'itinéraire technique (CHAPITRE 4), il serait donc intéressant, pour aller plus loin, d'évaluer les systèmes de culture incluant de la cameline conçus, par exemple, lors des ateliers. Or, les travaux de modélisation sur la cameline n'en sont qu'à leur début, avec le développement récent d'un modèle de culture mécaniste, simulant le rendement et la qualité de la cameline mais sans y inclure – pour l'instant – l'impact des pratiques, ni du système de culture (Cappelli et al., 2019). Le développement d'un modèle facilement paramétrable pour la cameline et permettant de simuler et d'évaluer des systèmes de culture incluant la cameline dans une diversité d'environnements semble donc être une perspective intéressante pour accompagner la re-conception des systèmes de culture dans une perspective agroécologique.

¹⁹ voir notamment Soullignac et al. (2019)

²⁰ Plateforme « Osez l'agroécologie » (<https://osez-agroecologie.org/l-agroecologie>). Titre de la plaquette de présentation : « *Faciliter la diffusion des savoirs agroécologiques pour accompagner les agriculteurs dans la transition et partager des solutions* ».

²¹ voir Le Bourgeois et al. (2010)

²² voir Grossard et al. (2012)

Comme il s'agit de raisonner l'introduction de la cameline dans une succession de cultures (et pas seulement sa conduite), le modèle de système de culture *PerSyst* pourrait être intéressant à mobiliser. En effet, ce modèle permet de simuler les rendements des cultures d'une succession de cultures en prenant en compte l'effet de la plupart des éléments de l'itinéraire technique et du système de culture (effet précédent notamment)(Guichard et al., 2013; Ballot et al., 2018). Il se base sur un paramétrage à dire d'experts et, par conséquent, peut être paramétré dans une large gamme d'environnements, à moindre coût et rapidement, et peut incorporer une grande gamme d'innovations techniques. Dans le cadre d'un précédent projet du programme GENESYS, *PerSyst* a déjà été paramétré pour les principales cultures de l'ex-région Picardie (Tavares, 2015). À ce titre, le paramétrage de la cameline dans *PerSyst*, en mobilisant les connaissances produites au cours de cette thèse, nous semble être une piste de travail intéressante, notamment pour permettre à terme d'évaluer une beaucoup plus grande gamme de systèmes de culture. Si aujourd'hui, les connaissances produites et surtout l'expertise développée par différents acteurs (agriculteurs, conseillers, chercheurs) peuvent contribuer à un premier paramétrage sur les rendements potentiels dans différents milieux et sur l'effet de différentes pratiques, cette expertise devra être enrichie pour pouvoir évaluer les variations de rendement en lien avec la rotation. Enfin, il n'est pas encore possible de simuler deux cultures sur une année dans le modèle (Guichard, comm. pers.), ce qui ne permet pas l'évaluation de la cameline introduite en double culture. Par conséquent, le développement du modèle en ce sens est également une piste de travail envisageable.

Comme nous l'avons mentionné à plusieurs reprises, en s'inscrivant dans un processus de conception, la démarche que nous avons élaborée a permis d'identifier des trous de connaissances sur la cameline. Ce travail permet donc de faire émerger des perspectives de recherche pour l'agronomie mais également pour d'autres disciplines. C'est le cas par exemple pour les effets allélopathiques de la cameline. En effet, l'allélopathie se définit comme un « *effet direct ou indirect, positif ou négatif, d'une plante ou d'un microorganisme sur un autre organisme, par le biais de composés biochimiques libérés dans l'environnement* » (Rice, 1984). La compréhension des effets allélopathiques de la cameline sur différentes cultures, et les conditions de leur expression (question

soulevée par les agriculteurs, CHAPITRE 4) supposent donc un travail pluridisciplinaire entre agronomes, microbiologistes et pathologistes. De même, le mildiou ayant été identifié comme un facteur expliquant la variabilité du rendement et de la teneur en huile (CHAPITRE 3), des questions se posent aujourd'hui sur le cycle de développement de *Peronospora parasitica* occasionnant le mildiou (pathologie végétale), sur les facteurs favorisant son développement au champ (agronomie) et sur l'effet du mildiou sur le cycle de la culture et la qualité des grains de cameline (écophysiologie). Enfin, en agronomie, compte tenu des nombreuses questions soulevées par les agriculteurs sur la gestion de la fertilisation azotée (CHAPITRE 1, CHAPITRE 4) et de la relation entre le statut azoté de la culture et le rendement que nous avons mise en évidence (CHAPITRE 3), la construction de la courbe de dilution de la cameline semblerait être importante à déterminer. Sur la même thématique, l'estimation des besoins en azote pour gérer la fertilisation azotée ou l'étude de la réaction aux carences azotées (ou en d'autres éléments) pour gérer la fertilisation de manière sous-optimale, à l'instar du blé (Ravier et al., 2017), pourraient également être des pistes de recherche à creuser.

Au-delà de leur intérêt dans l'Oise, ces connaissances scientifiques pourront également avoir un impact à plus large échelle en permettant de fournir des éléments sur différents processus. Par exemple, aujourd'hui, le mildiou ne représente pas un problème majeur pour la culture de cameline aux Etats-Unis, et particulièrement dans les Grandes Plaines, compte tenu des conditions climatiques plutôt chaudes et sèches pendant le développement de la cameline de printemps. Toutefois, avec le changement climatique, il est probable que des infections par *Peronospora parasitica*, telles que nous les avons observées dans notre cas d'étude, puissent se produire (Berti, comm. pers.). De même, une meilleure compréhension des effets précédents, et plus particulièrement des effets allélopathiques de la cameline sur des cultures telles que le blé ou la betterave, deux cultures également présentes dans les rotations du Nord-Est des États-Unis (Gesch, comm.pers.), pourrait donc avoir un intérêt à plus large échelle que celle de l'Oise.

3.2. Une démarche pour lever les verrous de la diversification ?

La transition vers des systèmes de culture diversifiés soulève de nombreuses questions à l'échelle de la filière et milite donc pour une reconnexion de l'agriculture, de l'alimentation et de l'environnement à l'échelle des territoires en tenant compte des

différents acteurs impliqués, *i.e.* les agriculteurs, les sélectionneurs, les collecteurs, les transformateurs, les consommateurs, les scientifiques et les pouvoirs publics (Lamine, 2015; Jordan et al., 2016; Wezel et al., 2016; Miles et al., 2017).

Tout d'abord, la conception de systèmes agroécologiques incluant des cultures de diversification suppose une adaptation plus globale des systèmes alimentaires (Gomiero et al., 2019). En effet, la diversification des débouchés et la variabilité des performances au sein d'un bassin de production, en lien avec l'adaptation des pratiques agricoles à la singularité des situations, supposent également la conception d'innovations de la part des transformateurs. Nous faisons l'hypothèse qu'au-delà de la production de connaissances agronomiques actionnables sur des espèces de diversification, la démarche proposée pourrait favoriser la **conception d'innovations couplées** entre la production agricole et la transformation (Meynard et al., 2017). En effet, comme nous l'avons discuté dans le CHAPITRE 3, la caractérisation de la variabilité interannuelle de la qualité de l'huile de cameline, en lien avec des facteurs climatiques, aurait pu constituer une base intéressante pour stimuler par exemple des innovations dans l'organisation d'une filière flexible, ciblant des débouchés spécifiques de la qualité de l'huile obtenue. Cependant, ce type d'initiative suppose l'implication de transformateurs (industriel, start-up ou artisan) ayant la possibilité d'expérimenter des innovations (ce qui n'a pas été le cas avec le projet de bioraffinerie, qui est resté virtuel tout au long de la thèse).

Similairement, cette démarche pourrait également contribuer à lever d'autres verrous identifiés à l'échelle de la filière dans le cadre de la diversification, où des innovations en termes de sélection variétales, de règles de commercialisation, etc. sont nécessaires (Meynard et al., 2018). Par exemple, dans le cas de la cameline, notre démarche a permis de faire émerger, chemin faisant, un certain nombre de **critères de sélection variétale** potentiellement intéressants à développer, comme la sélection de variétés précoces pour augmenter les chances d'arriver à maturité dans les modalités en double culture ou encore la sélection de variétés à gros grains pour faciliter l'implantation du semis à la volée, toujours en double culture. Or, aujourd'hui, l'un des freins identifiés à l'échelle de la filière est l'absence de travaux d'amélioration de la part des organismes de sélections publics ou privés sur les espèces mineures, principalement pour des raisons économiques mais également parfois par manque de critères définis en accord avec les autres maillons de la filière (Meynard et al., 2018; Parenty, 2018). En

permettant d'identifier des traits de sélection prioritaires issus de besoins réels d'agriculteurs, notre approche pourrait donc être une façon de stimuler une activité de la part des sélectionneurs, en limitant les critères à sélectionner d'une part et en leur garantissant un marché de vente d'autre part. Pour faciliter l'atteinte d'un tel objectif, il pourrait être pertinent d'inclure les sélectionneurs potentiellement intéressés dès le démarrage du projet, comme cela a été fait avec les industriels dans le cas de la cameline.

Conclusion générale

Pour assurer la transition agroécologique, la diversification des cultures est une voie incontournable. En nous appuyant sur le cas de la cameline, nous avons développé une démarche pour raisonner et accompagner l'introduction de nouvelles espèces dans les systèmes de culture d'un territoire. Plus particulièrement nous avons montré en quoi la mise en place d'un dispositif d'innovation ouverte, à travers la combinaison de différents dispositifs participatifs regroupant une diversité d'acteurs, permettait de stimuler l'exploration de solutions innovantes, grâce à la circulation et au partage de connaissances de différentes natures entre ces acteurs. Nous avons également montré l'importance de combiner cette exploration avec des phases de mise en œuvre au champ, notamment par les agriculteurs, pour stimuler leur apprentissage et accompagner leur activité de re-conception dans leur propre ferme. La dynamique à l'œuvre aujourd'hui dans l'Oise autour de la cameline, suite à ce travail, témoigne de l'efficacité de l'approche proposée pour produire des connaissances actionnables sur une culture et ainsi accompagner son introduction dans les systèmes de culture. Au cours de ce travail, nous avons ainsi posé les bases d'une démarche pour lever certains verrous à la diversification présents à l'échelle de la filière. La déclinaison de cette approche à d'autres territoires et à d'autres cultures en incluant notamment une plus grande diversité d'acteurs (sélectionneurs, coopératives, consommateurs, pouvoir publics, etc.) serait une prochaine étape pour enrichir cette réflexion.

Références bibliographiques

- Agogué, M., Kazakçi, A., 2014. 10 Years of C–K Theory: A Survey on the Academic and Industrial Impacts of a Design Theory, in: Chakrabarti, A., Blessing, L.T.M. (Eds.), *An Anthology of Theories and Models of Design*. Springer London, London, pp. 219–235. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-6338-1_11
- Agogué, M., Kazakçi, A., Hatchuel, A., Le Masson, P., Weil, B., Poirel, N., Cassotti, M., 2014a. 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., Poirel, N., Pineau, A., Houdé, O., Cassotti, M., 2014b. The impact of age and training on creativity: A design-theory approach to study fixation effects. *Think. Ski. Creat.* 11, 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.tsc.2013.10.002>
- Agreste Hauts-de-France, 2016. Mémento de la statistique agricole. Hauts-de-France. 32p.
- Agreste Hauts-de-France, 2019. Chiffres & Données. L'agriculture de l'Oise : de grosses exploitations, très orientées grandes cultures. 5p.
- Akaike, H., 1974. A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19, 716–723.
- Akaike, H., 1987. Factor analysis and AIC. In *Selected Papers of Hirotugu Akaike*, Springer, New York, pp. 371–386.
- Albaut, A., De Muynck, D., Jullier, N., Rolle, C., Wieruszeski, S., 2015. Recueil des essais des chambres d'agriculture de Picardie : 2014-2015. Programme régional, Réduction des intrants. 2ème partie.
- Albaut, A., De Muynck, D., Jullier, N., Rolle, C., Wieruszeski, S., Météry, V., Lepage, A., Warin, A., Lecuyer, J., 2017. Recueil des essais des chambres d'agriculture Hauts-de-France : 2016-2017. 3ème partie : Autres cultures.
- Albert, I., Ancelet, S., David, O., Denis, J.-B., Makowski, D., Parent, É., Rau, A., Soubeyrand, S., 2015. *Initiation à la statistique bayésienne - Bases théoriques et applications en alimentation, environnement, épidémiologie et génétique*, Références sciences. Edition Ellipses.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M., 1998. *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56*. Fao, Rome, 300(9), D05109.
- Altieri, M.A., 1983. *Agroecology: the scientific basis of alternative agriculture*. Agroecol. Sci. Basis Altern. Agric.
- Altieri, M.A., 1989. Agroecology: A new research and development paradigm for world agriculture. *Agric. Ecosyst. Environ.*, International Symposium on Agricultural Ecology and Environment 27, 37–46. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(89\)90070-4](https://doi.org/10.1016/0167-8809(89)90070-4)
- Altieri, M.A., 1999. The ecological role of biodiversity in agroecosystems, in: Paoletti, M.G. (Ed.), *Invertebrate Biodiversity as Bioindicators of Sustainable Landscapes*. Elsevier, Amsterdam, pp. 19–31. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-50019-9.50005-4>

- Amossé, C., Jeuffroy, M.-H., Celette, F., David, C., 2013. Relay-intercropped forage legumes help to control weeds in organic grain production. *Eur. J. Agron.* 49, 158–167. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2013.04.002>
- Andriamampianina, L., Temple, L., Bon, H. de, Malézieux, E., Makowski, D., 2018. Évaluation pluri-critères de l'agriculture biologique en Afrique subsaharienne par élicitation probabiliste des connaissances d'experts. *Cah. Agric.* 27, 45002. <https://doi.org/10.1051/cagri/2018030>
- Andrivon, D., Cailliatte, R., Fares, M., Le Bail, M., Lemarié, S., Meynard, J.-M., Michel, C., Munier-Jolain, N., Renard, M., Willocquet, L., 2017. Dviersification des espèces cultivées et des systèmes de culture afférents. Rapport de la mission DECOR.
- Angbo Kouakou, E., Temple, L., Mathé, S., Assemien, A., 2017. Plateformes d'innovation comme dispositif d'orientation des trajectoires technologiques des filières agricoles. Cas de la filière banane plantain en Côte d'Ivoire. *Technol. Innov.*
- Angelini, L.G., Moscheni, E., Colonna, G., Belloni, P., Bonari, E., 1997. Variation in agronomic characteristics and seed oil composition of new oilseed crops in central Italy. *Ind. Crops Prod.* 6, 313–323. [https://doi.org/10.1016/S0926-6690\(97\)00022-8](https://doi.org/10.1016/S0926-6690(97)00022-8)
- Aresta, M., Dibenedetto, A., Dumeignil, F., 2012. Biorefinery: From Biomass to Chemicals and Fuels. Walter de Gruyter.
- Argyris, C., 1996. Actionable Knowledge: Design Causality in the Service of Consequential Theory. *J. Appl. Behav. Sci.* 32, 390–406. <https://doi.org/10.1177/0021886396324004>
- Avenier, M.-J., Schmitt, C., 2007. Élaborer des savoirs actionnables et les communiquer à des managers. *Rev. Française Gest.* n° 174, 25–42.
- Aubertot, J.-N., Barbier, J.M., Carpentier, A., Gril, J.-N., Guichard, L., Lucas, P., Savary, S., Voltz, M., 2007. Pesticides, agriculture et environnement. Réduire l'utilisation des pesticides et en limiter les impacts environnementaux. Expertise scientifique collective Inra-Cemagref (décembre 2005), Expertises Collectives.
- Bajwa, A.A., Walsh, M., Chauhan, B.S., 2017. Weed management using crop competition in Australia. *Crop Prot., Role of crop competition in weed management* 95, 8–13. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2016.08.021>
- Ballot, R., Loyce, C., Jeuffroy, M.-H., Ronceux, A., Gombert, J., Lesur-Dumoulin, C., Guichard, L., 2018. First cropping system model based on expert-knowledge parameterization. *Agron. Sustain. Dev.* 38, 33. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0512-8>
- Bansal, S., Durrett, T.P., 2016. Camelina sativa: An ideal platform for the metabolic engineering and field production of industrial lipids. *Biochimie, SI: Lipids: from (bio)synthesis to function* 120, 9–16. <https://doi.org/10.1016/j.biochi.2015.06.009>
- Barbier, M., Caron, P., Masson, P.L., Aggeri, F., 2012. The sustainable fibres of generative expectation management: The “building with hemp” case study (No. hal-01117313), Post-Print. HAL.

- Barcellini, F., Prost, L., Cerf, M., 2015. Designers' and users' roles in participatory design: What is actually co-designed by participants? *Appl. Ergon.* 50, 31–40. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2015.02.005>
- Barrios, E., Delve, R.J., Bekunda, M., Mowo, J., Agunda, J., Ramisch, J., Trejo, M.T., Thomas, R.J., 2006. Indicators of soil quality: A South–South development of a methodological guide for linking local and technical knowledge. *Geoderma* 135, 248–259. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.12.007>
- Barzman, M., Dachbrodt-Saaydeh, S., 2011. Comparative analysis of pesticide action plans in five European countries. *Pest Manag. Sci.* 67, 1481–1485. <https://doi.org/10.1002/ps.2283>
- Bashangwa Mpozi, B., 2019. Innovations agricoles endogènes : le cas du fruit de la passion au Burundi et comparaison avec le Rwanda et le Kenya. Gembloux Agro-Bio Tech Université de Liège, Gembloux, Belgique.
- Baumann, D.T., Kropff, M.J., Bastiaans, L., 2000. Intercropping leeks to suppress weeds. *Weed Res. Oxf.* 40, 359–374. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3180.2000.00197.x>
- Bedoussac, L., Justes, E., 2010. Dynamic analysis of competition and complementarity for light and N use to understand the yield and the protein content of a durum wheat–winter pea intercrop. *Plant and Soil* 330, 37–54. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0303-8>
- Bedoussac, L., Journet, E.-P., Hauggaard-Nielsen, H., Naudin, C., Corre-Hellou, G., Jensen, E.S., Prieur, L., Justes, E., 2015. Ecological principles underlying the increase of productivity achieved by cereal-grain legume intercrops in organic farming. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 35, 911–935. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0277-7>
- Begon, J.C., Hardy, R., Mory, A., 1977. Les sols du département de l'Oise. CNRA, Service d'études des sols et de la carte pédologique de France.
- Béguin, P., 2003. Design as a mutual learning process between users and designers. *Interact. Comput.* 15, 709–730. [https://doi.org/10.1016/S0953-5438\(03\)00060-2](https://doi.org/10.1016/S0953-5438(03)00060-2)
- Béguin, P., Cerf, M., Prost, L., 2012. Co-design as an emerging distributed dialogical process between users and designers. *System Innovations, Knowledge Regimes, and Design Practices Towards Transitions for Sustainable Agriculture*, 154–170.
- Belayneh, H.D., Wehling, R.L., Cahoon, E., Ciftci, O.N., 2015. Extraction of omega-3-rich oil from *Camelina sativa* seed using supercritical carbon dioxide. *J. Supercrit. Fluids* 104, 153–159. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2015.06.002>
- Belsito, D.V., Hill, R.A., Klaassen, C.D., Liebler, D.C., Marks Jr, J.G., Shank, R.C., Slaga, T.J., Snyder, P.W., 2011. Plant-derived fatty acid oils as used in cosmetics. Final Report. *Cosmetic Ingredient Review* 1–100.
- Bergez, J.E., Colbach, N., Crespo, O., Garcia, F., Jeuffroy, M.H., Justes, E., Loyce, C., Munier-Jolain, N., Sadok, W., 2010. Designing crop management systems by simulation. *Eur. J. Agron., Cropping Systems Design: new methods for new challenges* 32, 3–9. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2009.06.001>

- Berhow, M.A., Vaughn, S.F., Moser, B.R., Belenli, D., Polat, U., 2014. Evaluating the Phytochemical Potential of Camelina: An Emerging New Crop of Old World Origin, in: Jetter, R. (Ed.), *Phytochemicals – Biosynthesis, Function and Application: Volume 44, Recent Advances in Phytochemistry*. Springer International Publishing, Cham, pp. 129–148. https://doi.org/10.1007/978-3-319-04045-5_7
- Berthet, E.T., Bretagnolle, V., Segrestin, B., 2014. Surmonter un blocage de l'innovation par la conception collective. Cas de la réintroduction de luzerne dans une plaine céréalière. *Fourrages* 217, 13–21.
- Berthet, E.T., Barnaud, C., Girard, N., Labatut, J., Martin, G., 2016. How to foster agroecological innovations? A comparison of participatory design methods. *J. Environ. Plan. Manag.* 59, 280–301. <https://doi.org/10.1080/09640568.2015.1009627>
- Berthet, E.T., Hickey, G.M., 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, E.T., Hickey, G.M., Klerkx, L., 2018. Opening design and innovation processes in agriculture: Insights from design and management sciences and future directions. *Agric. Syst.* 165, 111–115. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.06.004>
- Bertholdsson, N.-O., 2005. Early vigour and allelopathy – two useful traits for enhanced barley and wheat competitiveness against weeds. *Weed Res.* 45, 94–102. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2004.00442.x>
- Berti, M., Wilckens, R., Fischer, S., Solis, A., Johnson, B., 2011. Seeding date influence on camelina seed yield, yield components, and oil content in Chile. *Ind. Crops Prod.* 34, 1358–1365. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.12.008>
- Berti, M., Gesch, R., Johnson, B., Ji, Y., Seames, W., Aponte, A., 2015. Double-and relay-cropping of energy crops in the northern Great Plains, USA. *Ind. Crops Prod.* 75, 26–34. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.05.012>
- Berti, M., Gesch, R., Eynck, C., Anderson, J., Cermak, S., 2016. Camelina uses, genetics, genomics, production, and management. *Ind. Crops Prod.* 94, 690–710. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.09.034>
- Berti, M., Johnson, B., Ripplinger, D., Gesch, R., Aponte, A., 2017a. Environmental impact assessment of double- and relay-cropping with winter camelina in the northern Great Plains, USA. *Agric. Syst.* 156, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.05.012>
- Berti, M., Samarappuli, D., Johnson, B.L., Gesch, R.W., 2017b. Integrating winter camelina into maize and soybean cropping systems. *Ind. Crops Prod.* 107, 595–601. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.06.014>
- Billen, G., Lassaletta, L., Garnier, J., 2014. A biogeochemical view of the global agro-food system: Nitrogen flows associated with protein production, consumption and trade. *Glob. Food Secur., SI: GFS Conference 2013* 3, 209–219. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2014.08.003>

- Blanchard, M., Vall, É., Loumbana, B.T., Meynard, J.-M., 2017. Identification, caractérisation et évaluation des pratiques atypiques de gestion des fumures organiques au Burkina Faso : sources d'innovation ? *Autrepart* N° 81, 115–134.
- Blades, M., Zubr, J., 2010. Carbohydrates, vitamins and minerals of *Camelina sativa* seed. *Nutrition & Food Science*. <https://doi.org/10.1108/00346651011077036>
- Blazy, J.-M., Ozier-Lafontaine, H., Doré, T., Thomas, A., Wery, J., 2009. A methodological framework that accounts for farm diversity in the prototyping of crop management systems. Application to banana-based systems in Guadeloupe. *Agric. Syst.* 101, 30–41. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2009.02.004>
- Bockstaller, C., Girardin, P.H., Van der Werf, H.M.G., 1997. Use of agro-ecological indicators for the evaluation of farming systems. *Eur. J. Agron.* 7, 261–270. [https://doi.org/10.1016/S0378-519X\(97\)80032-3](https://doi.org/10.1016/S0378-519X(97)80032-3)
- Bockstaller, C., Guichard, L., Makowski, D., Aveline, A., Girardin, P., Plantureux, S., 2009. Agri-Environmental Indicators to Assess Cropping and Farming Systems: A Review, in: Lichtfouse, E., Navarrete, M., Debaeke, P., Véronique, S., Alberola, C. (Eds.), *Sustainable Agriculture*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 725–738. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2666-8_44
- Boddey, R.M., Urquiaga, S., Alves, B.J.R., Reis, V., 2003. Endophytic nitrogen fixation in sugarcane: present knowledge and future applications. *Plant Soil* 252, 139–149. <https://doi.org/10.1023/A:1024152126541>
- Bonjean, A., Le Goffic, F., 1999. La cameline: *Camelina sativa* (L.) Crantz: une opportunité pour l'agriculture et l'industrie européennes. *ACL OL. Corps Gras Lipides* 6, 28–34.
- Bonnardel, N., 2000. Towards understanding and supporting creativity in design: analogies in a constrained cognitive environment. *Knowl.-Based Syst.* 13, 505–513. [https://doi.org/10.1016/S0950-7051\(00\)00067-8](https://doi.org/10.1016/S0950-7051(00)00067-8)
- Bonneuil, C., Thomas, F., 2009. Gènes, pouvoirs et profits: Recherche publique et régimes de production des savoirs de Mendel aux OGM. Editions Quae.
- Borah, N., Mapelli, S., Pecchia, P., Chaliha, B., Saikia, S.P., 2019. Adaptation of *Camelina sativa* (L.) Crantz in Assam, India: agronomic, physiological and biochemical aspects of a potential biofuel feedstock. *Biofuels* 0, 1–8. <https://doi.org/10.1080/17597269.2018.1537205>
- Borras Jr, S.M., Franco, J.C., Isakson, S.R., Levidow, L., Vervest, P., 2016. The rise of flex crops and commodities: implications for research. *J. Peasant Stud.* 43, 93–115. <https://doi.org/10.1080/03066150.2015.1036417>
- Bos, A.P., Koerkamp, P.W.G.G., Gosselink, J.M.J., Bokma, S., 2009. Reflexive Interactive Design and its Application in a Project on Sustainable Dairy Husbandry Systems. *Outlook Agric.* 38, 137–145. <https://doi.org/10.5367/000000009788632386>
- Bouchard, C., Bernicot, M.-H., Félix, I., Guérin, O., Loyce, C., Omon, B., Rolland, B., 2008. Associer des itinéraires techniques de niveau d'intrants variés à des variétés rustiques de blé tendre : évaluation économique, environnementale et énergétique. *Courr. Environ. INRA* 55, 53–77.
- Boudreau, M.A., 2013. Diseases in Intercropping Systems. *Annu. Rev. Phytopathol.* 51, 499–519. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-082712-102246>

- Brainard, D.C., Bellinder, R.R., 2004. Weed suppression in a broccoli–winter rye intercropping system. *Weed Sci.* 52, 281–290. <https://doi.org/10.1614/WS-03-031R>
- Brancourt-Hulmel, M., Lecomte, C., Meynard, J.-M., 1999. A Diagnosis of Yield-Limiting Factors on Probe Genotypes for Characterizing Environments in Winter Wheat Trials 39, 1798–1808. <https://doi.org/10.2135/cropsci1999.3961798x>
- Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., others, 2003. An overview of the crop model STICS. *Eur. J. Agron.* 18, 309–332.
- Brock, J.R., Dönmez, A.A., Beilstein, M.A., Olsen, K.M., 2018. Phylogenetics of *Camelina* Crantz. (Brassicaceae) and insights on the origin of gold-of-pleasure (*Camelina sativa*). *Mol. Phylogenet. Evol.* 127, 834–842. <https://doi.org/10.1016/j.ympev.2018.06.031>
- Bronson, K.F., Hunsaker, D.J., Thorp, K.R., 2019. Nitrogen Fertilizer and Irrigation Effects on Seed Yield and Oil in *Camelina*. *Agron. J.* 111, 1712–1719. <https://doi.org/10.2134/agronj2018.10.0644>
- Campbell, M.C., Rossi, A.F., Erskine, W., 2013. *Camelina* (*Camelina sativa* (L.) Crantz): agronomic potential in Mediterranean environments and diversity for biofuel and food uses. *Crop Pasture Sci.* 64, 388–398.
- Cao, Y., Gu, Z., Muthukumarappan, K., Gibbons, W., 2015. Separation of Glucosinolates From *Camelina* Seed Meal Via Membrane and Acidic Aluminum Oxide Column. *Journal of Liquid Chromatography & Related Technologies* 38, 1273–1278. <https://doi.org/10.1080/10826076.2015.1037454>
- Cappelli, G., Zanetti, F., Ginaldi, F., Righini, D., Monti, A., Bregaglio, S., 2019. Development of a process-based simulation model of *camelina* seed and oil production: A case study in Northern Italy. *Ind. Crops Prod.* 134, 234–243. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.03.046>
- Cardina, J., Herms, C.P., Doohan, D.J., 2002. Crop rotation and tillage system effects on weed seedbanks. *Weed Sci.* 50, 448–460. [https://doi.org/10.1614/0043-1745\(2002\)050\[0448:CRATSE\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1614/0043-1745(2002)050[0448:CRATSE]2.0.CO;2)
- Cardona, A., Lefèvre, A., Simon, S., 2018. Les stations expérimentales comme lieux de production des savoirs agronomiques semi-confinés. *Rev. Anthropol. Connaiss.* Vol. 12, N°2, 139–170.
- Cardone, M., Mazzoncini, M., Menini, S., Rocco, V., Senatore, A., Seggiani, M., Vitolo, S., 2003. *Brassica carinata* as an alternative oil crop for the production of biodiesel in Italy: agronomic evaluation, fuel production by transesterification and characterization. *Biomass Bioenergy* 25, 623–636. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(03\)00058-8](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(03)00058-8)
- Cardoso, I., Guijt, I., Franco, F., Carvalho, A., Ferreira Neto, P., 2001. Continual learning for agroforestry system design: university, NGO and farmer partnership in Minas Gerais, Brazil. *Agric. Syst.* 69, 235–257. [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(01\)00028-2](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(01)00028-2)

- Carlson, H.L., Hill, J.E., 1985. Wild Oat (*Avena fatua*) Competition with Spring Wheat: Plant Density Effects. *Weed Sci.* 33, 176–181. <https://doi.org/10.1017/S0043174500082059>
- Carlsson, A.S., 2009. Plant oils as feedstock alternatives to petroleum—A short survey of potential oil crop platforms. *Biochimie* 91, 665–670. <https://doi.org/10.1016/j.biochi.2009.03.021>
- Caron, P., Biénabe, E., Hainzelin, E., 2014. Making transition towards ecological intensification of agriculture a reality: the gaps in and the role of scientific knowledge. *Curr. Opin. Environ. Sustain., SI: Sustainability governance and transformation* 8, 44–52. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2014.08.004>
- Carrouée, B., Schneider, A., Flénet, F., Jeuffroy, M.-H., Nemecek, T., 2012. Introduction du pois protéagineux dans des rotations à base de céréales à paille et colza : impacts sur les performances économiques et environnementales. *Innovation Agronomique* 25, 125–142.
- Carton, N., Naudin, C., Piva, G., Baccar, R., Corre-Hellou, G., 2018. Differences for traits associated with early N acquisition in a grain legume and early complementarity in grain legume–triticale mixtures. *AoB PLANTS* 10. <https://doi.org/10.1093/aobpla/ply001>
- Casagrande, M., David, C., Valantin-Morison, M., Makowski, D., Jeuffroy, M.-H., 2009. Factors limiting the grain protein content of organic winter wheat in south-eastern France: a mixed-model approach. *Agron. Sustain. Dev.* 29, 565–574. <https://doi.org/10.1051/agro/2009015>
- 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 (thesis). Avignon.
- Catalogna, M., Dubois, M., Navarrete, M., 2018. Diversity of experimentation by farmers engaged in agroecology. *Agron. Sustain. Dev.* 38, 50. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0526-2>
- Cerf, M., Jeuffroy, M.-H., Prost, L., Meynard, J.-M., 2012. Participatory design of agricultural decision support tools: taking account of the use situations. *Agron. Sustain. Dev.* 32, 899–910. <https://doi.org/10.1007/s13593-012-0091-z>
- Cermak, S.C., Biresaw, G., Isbell, T.A., Evangelista, R.L., Vaughn, S.F., Murray, R., 2013. New crop oils—Properties as potential lubricants. *Ind. Crops Prod.* 44, 232–239.
- 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>

- Chaturvedi, S., Bhattacharya, A., Khare, S.K., Kaushik, G., 2018. *Camelina sativa*: An Emerging Biofuel Crop, in: Hussain, C.M. (Ed.), *Handbook of Environmental Materials Management*. Springer International Publishing, Cham, pp. 1–38. https://doi.org/10.1007/978-3-319-58538-3_110-1
- Chauvel, B., Guillemin, J.P., Colbach, N., Gasquez, J., 2001. Evaluation of cropping systems for management of herbicide-resistant populations of blackgrass (*Alopecurus myosuroides* Huds.). *Crop Prot.* 20, 127–137. [https://doi.org/10.1016/S0261-2194\(00\)00065-X](https://doi.org/10.1016/S0261-2194(00)00065-X)
- Chen, C., Bekkerman, A., Afshar, R.K., Neill, K., 2015. Intensification of dryland cropping systems for bio-feedstock production: Evaluation of agronomic and economic benefits of *Camelina sativa*. *Ind. Crops Prod.* 71, 114–121. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.02.065>
- Chen, M., Brun, F., Raynal, M., Debord, C., Makowski, D., 2018. Estimer la date d'apparition du mildiou de la vigne grâce à l'élitisation probabiliste d'experts.
- Cherubini, F., 2010. The biorefinery concept: using biomass instead of oil for producing energy and chemicals. *Energy Convers. Manag.* 51, 1412–1421. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.01.015>
- Chesbrough, H.W., 2003. *Open Innovation: The New Imperative for Creating and Profiting from Technology*. Harvard Business Press.
- Christou, M., Efthymia, A., Pages, X., Alfos, C., Monti, A., Nissen, L., 2012. Oil crops that can be produced in EU27.
- Ciubota-Rosie, C., Ruiz, J.R., Ramos, M.J., Pérez, Á., 2013. Biodiesel from *Camelina sativa*: A comprehensive characterisation. *Fuel* 105, 572–577. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.09.062>
- Colbach, N., Schneider, A., Ballot, R., Vivier, C., 2010. Diversifying cereal-based rotations to improve weed control. Evaluation with the AlomySys model quantifying the effect of cropping systems on a grass weed. *Ol. Corps Gras Lipides* 17, 292–300. <https://doi.org/10.1051/ocl.2010.0331>
- Colbach, N., Biju-Duval, L., Gardarin, A., Granger, S., Guyot, S.H.M., Mézière, D., Munier-Jolain, N.M., Petit, S., 2014. The role of models for multicriteria evaluation and multiobjective design of cropping systems for managing weeds. *Weed Res.* 54, 541–555. <https://doi.org/10.1111/wre.12112>
- Colnenne, C., 1998. Determination of a Critical Nitrogen Dilution Curve for Winter Oilseed Rape. *Ann. Bot.* 81, 311–317. <https://doi.org/10.1006/anbo.1997.0557>
- Colnenne-David, C., Doré, T., 2015. Designing innovative productive cropping systems with quantified and ambitious environmental goals. *Renew. Agric. Food Syst.* 30, 487–502. <https://doi.org/10.1017/S1742170514000313>
- Compagnone, C., Lamine, C., Dupré, L., 2018. La production et la circulation des connaissances en agriculture interrogées par l'agro-écologie. *Rev. Anthropol. Connaiss.* Vol. 12, N°2, 111–138.
- Conley, T., Christopher, U., 2001. Social Learning Through Networks: The Adoption of New Agricultural Technologies in Ghana. *Am. J. Agric. Econ.* 83, 668–673. <https://doi.org/10.1111/0002-9092.00188>

- Coombs, C., Lauzon, J.D., Deen, B., Van Eerd, L.L., 2017. Legume cover crop management on nitrogen dynamics and yield in grain corn systems. *Field Crops Res.* 201, 75–85. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.11.001>
- Coquil, X., Blouet, A., Fiorelli, J.L., Bazard, C., Trommenschlager, J.M., 2009. Conception de systemes laitiers en agriculture biologique: une entree agronomique. *Prod. Anim.* 22, 221.
- Coquil, X., Cerf, M., Auricoste, C., Joannon, A., Barcellini, F., Cayre, P., Chizallet, M., Dedieu, B., Hostiou, N., Hellec, F., Lusson, J.-M., Olry, P., Omon, B., Prost, L., 2018. Questioning the work of farmers, advisors, teachers and researchers in agro-ecological transition. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 38. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0524-4>
- Cornelissen, A.M.G., van den Berg, J., Koops, W.J., Kaymak, U., 2003. Elicitation of expert knowledge for fuzzy evaluation of agricultural production systems. *Agric. Ecosyst. Environ.* 95, 1–18. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(02\)00174-3](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(02)00174-3)
- Corre-Hellou, G., Dibet, A., Hauggaard-Nielsen, H., Crozat, Y., Gooding, M., Ambus, P., Dahlmann, C., von Fragstein, P., Pristeri, A., Monti, M., others, 2011. The competitive ability of pea–barley intercrops against weeds and the interactions with crop productivity and soil N availability. *Field Crops Res.* 122, 264–272. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.04.004>
- Coulombel, A., Fontaine, L., 2009. La cameline, une petite graine qui monte ? *Alter Agri* 96.
- Craheix, D., Angevin, F., Bergez, J.-E., Bockstaller, C., Colomb, B., Guichard, L., Reau, R., Doré, T., 2012. MASC 2.0, un outil d'évaluation multicritère pour estimer la contribution des systèmes de culture au développement durable. *Innov. Agron.* 20, 35–48.
- Dabire, D., Andrieu, N., Djamen, P., Coulibaly, K., Posthumus, H., Diallo, A.M., Karambiri, M., Douzet, J.-M., Triomphe, B., 2017. Operationalizing an innovation platform approach for community-based participatory research on conservation agriculture in Burkina Faso. *Exp. Agric.* 53, 460–479. <https://doi.org/10.1017/S0014479716000636>
- Dale, M.R.T., Thomas, A.G., John, E.A., 1992. Environmental factors including management practices as correlates of weed community composition in spring seeded crops. *Can. J. Bot.* 70, 1931–1939. <https://doi.org/10.1139/b92-240>
- Dass, A., Shekhawat, K., Choudhary, A.K., Sepat, S., Rathore, S.S., Mahajan, G., Chauhan, B.S., 2017. Weed management in rice using crop competition-a review. *Crop Prot., Role of crop competition in weed management* 95, 45–52. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2016.08.005>
- Davies, J., Maru, Y., Hall, A., Abdourhamane, I.K., Adegbidi, A., Carberry, P., Dorai, K., Ennin, S.A., Etwire, P.M., McMillan, L., Njoya, A., Ouedraogo, S., Traoré, A., Traoré-Gué, N.J., Watson, I., 2018. Understanding innovation platform effectiveness through experiences from west and central Africa. *Agric. Syst.* 165, 321–334. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.12.014>

- 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, in: Sustainable Agriculture. Springer, pp. 707–724.
- Deffontaines, J.P., 1991. L'agronomie, science du champ. Le champ, lieu d'interdisciplinarité: de l'écophysiologie aux sciences humaines. *Agronomie* 11, 581–591.
- Dejoux, J.-F., Meynard, J.-M., Reau, R., Roche, R., Saulas, P., 2003. Evaluation of environmentally-friendly crop management systems based on very early sowing dates for winter oilseed rape in France. *Agronomie* 23, 725–736. <https://doi.org/10.1051/agro:2003050>
- Desai, A.G., Chattopadhyay, C., Agrawal, R., Kumar, A., Meena, R.L., Meena, P.D., Sharma, K.C., Rao, M.S., Prasad, Y.G., Ramakrishna, Y.S., 2004. Brassica juncea powdery mildew epidemiology and weatherbased forecasting models for India — a case study / Die Krankheitsentwicklung des Echten Mehltaus (*Erysiphe cruciferarum*) auf Brassica juncea und wetterbasierende Modelle zur Vorausschätzung seiner epidemiologischen Entwicklung in Indien — Eine Fallstudie. *Z. Für Pflanzenkrankh. Pflanzenschutz J. Plant Dis. Prot.* 111, 429–438.
- Descheemaeker, K., Ronner, E., Ollenburger, M., Franke, A.C., Klapwijk, C.J., Falconnier, G.N., Wichern, J., Giller, K.E., 2016. Which options fit best? Operationalizing the socio-ecological niche concept. *Experimental Agriculture* 1–22.
- Detienne, F., 2007. Reasoning from a schema and from an analog in software code reuse. [arXiv:cs/0701200](https://arxiv.org/abs/cs/0701200).
- Deytieux, V., Vivier, C., Minette, S., Nolot, J.M., Piaud, S., Schaub, A., Lande, N., Petit, M.S., Reau, R., Fourrié, L., Fontaine, L., 2012. Expérimentation de systèmes de culture innovants : avancées méthodologiques et mise en réseau opérationnelle. *Innov. Agron.* 20 49-78 2012.
- Deytieux, V., Cordeau, S., Fontanieu, G., Moreau, D., Voisin, A.-S., Munier-Jolain, N., 2018. Atelier de co-conception des systèmes de culture de la plateforme CA-SYS, in: Atelier de Conception de La Plateforme CA-SYS. DIJON, France, p. np.
- Dobre, P., Jurcoane, Ș., Matei, F., Stelica, C., Farcaș, N., Moraru, A.C., 2014. Camelina sativa as a double crop using the minimal tillage system. *Romanian Biotechnol. Lett.* 19, 9191.
- Dolinska, A., d'Aquino, P., 2016. Farmers as agents in innovation systems. Empowering farmers for innovation through communities of practice. *Agric. Syst.* 142, 122–130. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2015.11.009>
- Doré, T., Sebillotte, M., Meynard, J.M., 1997. A diagnostic method for assessing regional variations in crop yield. *Agric. Syst.* 54, 169–188. [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(96\)00084-4](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(96)00084-4)
- Doré, T., Clermont-Dauphin, C., Crozat, Y., David, C., Jeuffroy, M.-H., Loyce, C., Makowski, D., Malézieux, E., Meynard, J.-M., Valantin-Morison, M., 2008. Methodological progress in on-farm regional agronomic diagnosis. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 28, 151–161. <https://doi.org/10.1051/agro:2007031>

- Doré, T., Makowski, D., Malézieux, E., Munier-Jolain, N., Tchamitchian, M., Tittone, P., 2011. Facing up to the paradigm of ecological intensification in agronomy: Revisiting methods, concepts and knowledge. *Eur. J. Agron.* 34, 197–210. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2011.02.006>
- Doucet, C., Weaver, S.E., Hamill, A.S., Zhang, J., 1999. Separating the Effects of Crop Rotation from Weed Management on Weed Density and Diversity. *Weed Sci.* 47, 729–735.
- Drinkwater, L.E., 2002. Cropping Systems Research: Reconsidering Agricultural Experimental Approaches. *HortTechnology* 12, 355–361. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.12.3.355>
- Effenberger, H., 2018. The plant economy of the Northern European Bronze Age—more diversity through increased trade with southern regions. *Veg. Hist. Archaeobotany* 27, 65–74. <https://doi.org/10.1007/s00334-017-0621-3>
- Efron, B., Tibshirani, R.J., 1994. *An Introduction to the Bootstrap*. CRC Press.
- Elzen, G.W., Hardee, D.D., 2003. United States Department of Agriculture-Agricultural Research Service research on managing insect resistance to insecticides. *Pest Manag. Sci.* 59, 770–776. <https://doi.org/10.1002/ps.659>
- Elzen, B., Barbier, M., Cerf, M., Grin, J., 2012. Stimulating transitions towards sustainable farming systems, in: Darnhofer, I., Gibbon, D., Dedieu, B. (Eds.), *Farming Systems Research into the 21st Century: The New Dynamic*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 431–455. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4503-2_19
- European Commission, 2014. Final Report Summary - EUROBIOREF (EUROpean multilevel integrated BIOREFinery design for sustainable biomass processing).
- European Commission, 2015. Final Report Summary - 4F CROPS (Future Crops for Food, Feed, Fiber and Fuel).
- Evans, K.J., Ball, P., Bridle, K., Field, B., Leith, P.B., 2012. Some of the most important decisions made by farming businesses occur around the kitchen table.
- Eynck, C., Falk, K.C., 2013. 17 Camelina (*Camelina sativa*). *Biofuel Crops Prod. Physiol. Genet.* 369.
- Falconnier, G.N., Descheemaeker, K., Van Mourik, T.A., Adam, M., Sogoba, B., Giller, K.E., 2017. Co-learning cycles to support the design of innovative farm systems in southern Mali. *Eur. J. Agron.* 89, 61–74. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.06.008>
- Falzon, F.D.-P., Darses, F., 1996. La conception collective: une approche de l'ergonomie cognitive. *Coop. Concept. Octarès* 123–135.
- Fan, X.-M., Kang, M.S., Chen, H., Zhang, Y., Tan, J., Xu, C., 2007. Yield Stability of Maize Hybrids Evaluated in Multi-Environment Trials in Yunnan, China. *Agron. J.* 99, 220. <https://doi.org/10.2134/agronj2006.0144>
- Faugère, Elsa, Navarrete, M., Charles, M., Étienne, M., Fauriel, J., Lasseur, J., Lécrivain, É., Napoléone, M., Paratte, R., Faugère, E., others, 2010. Des connaissances scientifiques en quête de connaissances d'acteurs. *Nat. Sci. Sociétés* 18, 395–403.
- Faure, J.-D., Tepfer, M., 2016. Camelina, a Swiss knife for plant lipid biotechnology. *OCL* 23, D503. <https://doi.org/10.1051/ocl/2016023>

- Fitt, B.D.L., McCartney, H.A., West, J.S., 2006. Dispersal of foliar plant pathogens: mechanisms, gradients and spatial patterns, in: COOKE, B.M., JONES, D.G., KAYE, B. (Eds.), *The Epidemiology of Plant Diseases*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 159–192. https://doi.org/10.1007/1-4020-4581-6_6
- Fleury, A., 1994. La notion de plante modèle. Un Point Sur Lélaboration Rend. Princ. Cult. Annu. Paris INRA Éditions 7–27.
- Fried, G., Norton, L.R., Reboud, X., 2008. Environmental and management factors determining weed species composition and diversity in France. *Agric. Ecosyst. Environ.* 128, 68–76. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2008.05.003>
- Fröhlich, A., Rice, B., 2005. Evaluation of *Camelina sativa* oil as a feedstock for biodiesel production. *Ind. Crops Prod.* 21, 25–31. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2003.12.004>
- Gallandt, E.R., Weiner, J., 2007. Crop–Weed Competition, in: ELS. American Cancer Society. <https://doi.org/10.1002/9780470015902.a0020477>
- Gao, L., Caldwell, C.D., Jiang, Y., 2018. Photosynthesis and Growth of *Camelina* and Canola in Response to Water Deficit and Applied Nitrogen. *Crop Sci.* 58, 393. <https://doi.org/10.2135/cropsci2017.07.0406>
- Garbach, K., Morgan, G.P., 2017. Grower networks support adoption of innovations in pollination management: The roles of social learning, technical learning, and personal experience. *J. Environ. Manage.* 204, 39–49. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.07.077>
- Garthwaite, P.H., Kadane, J.B., O’Hagan, A., 2012. Statistical Methods for Eliciting Probability Distributions. *J. Am. Stat. Assoc.* <https://doi.org/10.1198/016214505000000105>
- Geertsema, W., Rossing, W.A., Landis, D.A., Bianchi, F.J., van Rijn, P.C., Schaminée, J.H., Tschardtke, T., van der Werf, W., 2016. Actionable knowledge for ecological intensification of agriculture. *Front. Ecol. Environ.* 14, 209–216. <https://doi.org/10.1002/fee.1258>
- Gehring, A., Friedt, W., Lühs, W., Snowdon, R.J., 2006. Genetic mapping of agronomic traits in false flax (*Camelina sativa* subsp. *sativa*). *Genome* 49, 1555–1563. <https://doi.org/10.1139/g06-117>
- George, N., Hollingsworth, J., Kaffka, S., 2015. A guide for canola and camelina research in California. University of California, Davis Department of Plant Sciences.
- George, N., Hollingsworth, J., Yang, W.-R., Kaffka, S., 2017. Canola and Camelina as New Crop Options for Cool-Season Production in California. *Crop Sci.* 57, 693. <https://doi.org/10.2135/cropsci2016.04.0208>
- George, N., Thompson, S.E., Hollingsworth, J., Orloff, S., Kaffka, S., 2018. Measurement and simulation of water-use by canola and camelina under cool-season conditions in California. *Agric. Water Manag.* 196, 15–23. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.09.015>

- Gesch, R., Forcella, F., Olness, A., Archer, D., Hebard, A., 2006. Agricultural management of cuphea and potential for commercial production in the Northern Corn Belt. *Ind. Crops Prod.* 24, 300–306. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2006.06.007>
- Gesch, R.W., Cermak, S.C., 2011. Sowing date and tillage effects on fall-seeded camelina in the northern corn belt. *Agron. J.* 103, 980–987.
- Gesch, R.W., Archer, D.W., 2013. Double-cropping with winter camelina in the northern Corn Belt to produce fuel and food. *Ind. Crops Prod.* 44, 718–725.
- Gesch, R.W., 2014. Influence of genotype and sowing date on camelina growth and yield in the north central US. *Ind. Crops Prod.* 54, 209–215. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.01.034>
- Gesch, R.W., Archer, D.W., Berti, M.T., 2014. Dual cropping winter camelina with soybean in the Northern Corn Belt. *Agron. J.* 106, 1735–1745.
- Gesch, R.W., Johnson, J.M.-F., 2015. Water Use in Camelina–Soybean Dual Cropping Systems. *Agron. J.* 107, 1098–1104.
- Gesch, R.W., Dose, H.L., Forcella, F., 2017. Camelina growth and yield response to sowing depth and rate in the northern Corn Belt USA. *Ind. Crops Prod.* 95, 416–421. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.10.051>
- Gesch, R.W., Matthees, H.L., Alvarez, A.L., Gardner, R.D., 2018. Winter Camelina: Crop Growth, Seed Yield, and Quality Response to Cultivar and Seeding Rate. *Crop Sci.* 58, 2089. <https://doi.org/10.2135/cropsci2018.01.0018>
- Ghatak, H.R., 2011. Biorefineries from the perspective of sustainability: Feedstocks, products, and processes. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15, 4042–4052. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.034>
- Giller, K.E., Tittonell, P., Rufino, M.C., Van Wijk, M.T., Zingore, S., Mapfumo, P., Adjei-Nsiah, S., Herrero, M., Chikowo, R., Corbeels, M., others, 2011. Communicating complexity: Integrated assessment of trade-offs concerning soil fertility management within African farming systems to support innovation and development. *Agric. Syst.* 104, 191–203.
- Girard, N., Navarrete, M., 2005. Quelles synergies entre connaissances scientifiques et empiriques? L'exemple des cultures du safran et de la truffe. *Nat. Sci. Sociétés* 13, 33–44.
- Girard, N., 2014. Quels sont les nouveaux enjeux de gestion des connaissances. *Rev. Int. Psychosociologie* 19, 51–78.
- Girard, N., Magda, D., 2018. Les jeux entre singularité et généricité des savoirs agro-écologiques dans un réseau d'éleveurs. *Rev. Anthropol. Connaiss.* Vol. 12, N°2, 199–228.
- Gomiero, T., Iocola, I., Canali, S., Drexler, D., Vanwindekens, F., Colombo, L., 2019. Factors constraining and facilitating crop diversification: results and lessons from a sample of Italian experiences. Presented at the European Conference on Crop Diversification, September 19-21 2019, Budapest, Hungary.
- Gould, F., Brown, Z.S., Kuzma, J., 2018. Wicked evolution: Can we address the sociobiological dilemma of pesticide resistance? *Science* 360, 728–732. <https://doi.org/10.1126/science.aar3780>

- Goulet, F., Pervanchon, F., Conteau, C., Cerf, M., 2008. Les agriculteurs innovent par eux-mêmes pour leurs systèmes de culture. R Reau T Doré Systèmes Cult. Innovant Durables Dijon Educ. Éditions 53–69.
- Gourdet, C., Godard, C., 2017. Typologie des systèmes de culture picards. (Livrable 1, projet CONSYST).
- Greenwood, D.J., Lemaire, G., Gosse, G., Cruz, P., Draycott, A., Neeteson, J.J., 1990. Decline in Percentage N of C3 and C4 Crops with Increasing Plant Mass. *Ann. Bot.* 66, 425–436. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a088044>
- GREN PICARDIE, 2015. Guide de calcul de la dose d'azote à apporter sur les cultures et les prairies. Version n°2.
- Grossard, F., Le Bourgeois, T., Mauranyapin, J.P., Jean-Baptiste, I., Boc, Y., 2012. Adventilles Network : Une plateforme d'échanges collaboratifs sur les adventices des cultures tropicales de Guadeloupe et de Martinique. Presented at the Congrès sucrier ARTAS-AFCA à 5 au 19 septembre 2012, Maurice, La Réunion.
- Gugel, R.K., Falk, K.C., 2006. Agronomic and seed quality evaluation of *Camelina sativa* in western Canada. *Can. J. Plant Sci.* 86, 1047–1058.
- Guichard, L., Ballot, R., Glachant, C., Aubert, C., 2013. PERSYST, a model for ex ante assessment of cropping systems performances. Adaptation to organic farming in the Ile-de-France region. *Innov. Agron.* 32, 123–138.
- Guichard, L., Ballot, R., Halska, J., Lambert, E., Meynard, J.M., Minette, S., Petit, M.S., Reau, R., Soulignac, V., 2015. AgroPEPS, a collaborative web tool of knowledge management to Share, Practice, Inform on sustainable cropping systems. *Innov. Agron.* 43, 83–94.
- Haefele, S.M., Wopereis, M.C.S., Donovan, C., Maubuisson, J., 2001. Improving the productivity and profitability of irrigated rice production in Mauritania. *Eur. J. Agron.* 14, 181–196. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(00\)00094-0](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(00)00094-0)
- Hatchuel, A., Weil, B., 2003. A new approach of innovative Design: an introduction to CK theory., in: DS 31: Proceedings of ICED 03, the 14th International Conference on Engineering Design, Stockholm.
- Hatchuel, A., Weil, B., 2009. CK design theory: an advanced formulation. *Res. Eng. Des.* 19, 181–192. <https://doi.org/10.1007/s00163-008-0043-4>
- Hauggaard-Nielsen, H., Ambus, P., Jensen, E.S., 2001. Interspecific competition, N use and interference with weeds in pea–barley intercropping. *Field Crops Res.* 70, 101–109. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(01\)00126-5](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(01)00126-5)
- Heiska, S., 2009. Developing weed control methods for camelina: a newly introduced, high-value oil seed crop. In: *Weeds: Management, economic impacts and biology*, Nova Science Publishers, New York, pp. 41–59.
- Hergert, G.W., Margheim, J.F., Pavlista, A.D., Martin, D.L., Isbell, T.A., Supalla, R.J., 2016. Irrigation response and water productivity of deficit to fully irrigated spring camelina. *Agric. Water Manag.* 177, 46–53.
- Hooge, S., Agogué, M., Gillier, T., 2012. A new methodology for advanced engineering design: Lessons from experimenting C-K Theory driven tools. Presented at the International Design Conference - Design 2012, p. 12p.

- Hoshmand, R., 2018. Design of Experiments for Agriculture and the Natural Sciences. Chapman and Hall/CRC. <https://doi.org/10.1201/9781315276021>
- Houlès, V., Mary, B., Guérif, M., Makowski, D., Justes, E., 2004. Evaluation of the ability of the crop model STICS to recommend nitrogen fertilisation rates according to agro-environmental criteria. *Agronomie* 24, 339–349. <https://doi.org/10.1051/agro:2004036>
- Houndété, T.A., Kétoh, G.K., Hema, O.S., Brévault, T., Glitho, I.A., Martin, T., 2010. Insecticide resistance in field populations of *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae) in West Africa. *Pest Manag. Sci.* 66, 1181–1185. <https://doi.org/10.1002/ps.2008>
- Hunsaker, D.J., French, A.N., Clarke, T.R., El-Shikha, D.M., 2011. Water use, crop coefficients, and irrigation management criteria for camelina production in arid regions. *Irrig. Sci.* 29, 27–43. <https://doi.org/10.1007/s00271-010-0213-9>
- Hunsaker, D.J., French, A.N., Thorp, K.R., 2013. Camelina water use and seed yield response to irrigation scheduling in an arid environment. *Irrig. Sci.* 31, 911–929. <https://doi.org/10.1007/s00271-012-0368-7>
- Husson, O., Quoc, H.T., Boulakia, S., Chabanne, A., Tivet, F., Bouzinac, S., Lienhard, P., Michellon, R., Chabierski, S., Boyer, J., others, 2016. Co-designing innovative cropping systems that match biophysical and socio-economic diversity: The DATE approach to Conservation Agriculture in Madagascar, Lao PDR and Cambodia. *Renew. Agric. Food Syst.* 31, 452–470. <https://doi.org/10.1017/S174217051500037X>
- Ibrahim, F.M., El Habbasha, S.F., 2015. Chemical composition, medicinal impacts and cultivation of camelina (*Camelina sativa*). *Int. J. PharmTech Res* 8, 114–122.
- Itier, B., 1996. Measurement and Estimation of Evapotranspiration, in: Pereira, L.S., Feddes, R.A., Gilley, J.R., Lesaffre, B. (Eds.), *Sustainability of Irrigated Agriculture*, NATO ASI Series. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 171–191. https://doi.org/10.1007/978-94-015-8700-6_11
- Jas, N., 2016. Savoirs agronomiques et développement agricoles : réflexions à partir de l’histoire et de la sociologie des sciences agronomiques. *Agric. Environ. Société* 6, 15–17.
- Jensen, E.S., Hauggaard-Nielsen, H., 2003. How can increased use of biological N₂ fixation in agriculture benefit the environment? *Plant Soil* 252, 177–186. <https://doi.org/10.1023/A:1024189029226>
- Jeuffroy, M.-H., Bergez, J.-E., David, C., Flénet, F., Gate, P., Loyce, C., Maupas, F., Meynard, J.-M., Reau, R., Surleau-Chambenoit, C., 2008. Utilisation des modèles pour l’aide à la conception et à l’évaluation d’innovations techniques en production végétale: bilan et perspectives. *Agronomie* 18, 311–346.
- Jeuffroy, M.-H., Meynard, J.-M., 2019. La conception de systèmes agro-écologiques, in: *Une Agronomie Pour Le XXI^e Siècle*. G.Richard, P.Stengel, G.Lemaire, P.Cellier, E.Valceschini, coord. QUAE Ed., pp. 264–277.

- Jewett, F.G., 2015. *Camelina sativa*: For Biofuels and Bioproducts, in: Cruz, V.M.V., Dierig, D.A. (Eds.), *Industrial Crops: Breeding for BioEnergy and Bioproducts*, Handbook of Plant Breeding. Springer New York, New York, NY, pp. 157–170. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-1447-0_8
- Jha, P., Stougaard, R.N., 2013. *Camelina (Camelina sativa)* Tolerance to Selected Preemergence Herbicides. *Weed Technol.* 27, 712–717. <https://doi.org/10.1614/WT-D-13-00061.1>
- Jiang, Y., Caldwell, C.D., Falk, K.C., Lada, R.R., MacDonald, D., 2013. *Camelina* yield and quality response to combined nitrogen and sulfur. *Agron. J.* 105, 1847–1852. <https://doi.org/doi:10.2134/agronj2013.0240>
- Jiang, Y., Caldwell, C.D., Falk, K.C., 2014. *Camelina* seed quality in response to applied nitrogen, genotype and environment. *Can. J. Plant Sci.* 94, 971–980. <https://doi.org/10.4141/cjps2013-396>
- Jiang, Y., Caldwell, C.D., 2016. Effect of nitrogen fertilization on *camelina* seed yield, yield components, and downy mildew infection. *Can. J. Plant Sci.* 96, 17–26. <https://doi.org/10.1139/cjps-2014-0348>
- Jiang, Y., Li, J., Caldwell, C.D., 2016. Glucosinolate Content of *Camelina* Genotypes as Affected by Applied Nitrogen and Sulphur. *Crop Sci.* 56, 3250. <https://doi.org/10.2135/cropsci2016.01.0018>
- Jong, E. de, Langeveld, H., Ree, R. van, 2009. IEA Bioenergy Task 42 Biorefinery. Available [Www Iea-Bioenergy Task42](http://www.iea-bioenergy.org/task42/).
- Jordan, N.R., Dorn, K., Runck, B., Ewing, P., Williams, A., Anderson, K.A., Felice, L., Haralson, K., Goplen, J., Altendorf, K., Fernandez, A., Phippen, W., Sedbrook, J., Marks, M., Wolf, K., Wyse, D., Johnson, G., 2016. Sustainable commercialization of new crops for the agricultural bioeconomy. *Elem. Sci. Anthr.* 4, 000081. <https://doi.org/10.12952/journal.elementa.000081>
- Juodka, R., Juska, R., Juskiene, V., Leikus, R., Stankeviciene, D., Nainiene, R., 2018. The effect of feeding with hemp and *Camelina* cakes on the fatty acid profile of duck muscles. *Arch. Anim. Breed.* 61, 293–303. <https://doi.org/10.5194/aab-61-293-2018>
- Kalita, D.J., Tarnavchyk, I., Sibi, M., Moser, B.R., Webster, D.C., Chisholm, B.J., 2018. Biobased poly(vinyl ether)s derived from soybean oil, linseed oil, and *camelina* oil: Synthesis, characterization, and properties of crosslinked networks and surface coatings. *Progress in Organic Coatings* 125, 453–462. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2018.09.033>
- Karg, S., 2012. Oil-rich seeds from prehistoric contexts. *Acta Palaeobot.* 52, 17–24.
- Katerji, N., Mastrorilli, M., Cherni, H.E., 2010. Effects of corn deficit irrigation and soil properties on water use efficiency. A 25-year analysis of a Mediterranean environment using the STICS model. *Eur. J. Agron.* 32, 177–185. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2009.11.001>

- Keating, B.A., Carberry, P.S., Hammer, G.L., Probert, M.E., Robertson, M.J., Holzworth, D., Huth, N.I., Hargreaves, J.N.G., Meinke, H., Hochman, Z., McLean, G., Verburg, K., Snow, V., Dimes, J.P., Silburn, M., Wang, E., Brown, S., Bristow, K.L., Asseng, S., Chapman, S., McCown, R.L., Freebairn, D.M., Smith, C.J., 2003. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *Eur. J. Agron., Modelling Cropping Systems: Science, Software and Applications* 18, 267–288. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00108-9](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00108-9)
- Kim, J.T., Netravali, A.N., 2012. Non-food application of camelina meal: Development of sustainable and green biodegradable paper-camelina composite sheets and fibers. *Polymer Composites* 33, 1969–1976. <https://doi.org/10.1002/pc.22337>
- Kokare, A. and Legzdina, L., 2010. Traits influencing spring barley competitiveness against weeds under organic and conventional conditions. 16th annual international scientific conference proceedings, Research for rural development.
- Kolb, D.A., 2014. *Experiential Learning: Experience as the Source of Learning and Development*. FT Press.
- Kristensen, L., Olsen, J., Weiner, J., 2008. Crop Density, Sowing Pattern, and Nitrogen Fertilization Effects on Weed Suppression and Yield In Spring Wheat. *Weed Sci.* 56, 97–102. <https://doi.org/10.1614/WS-07-065.1>
- Kroma, M.M., 2006. Organic Farmer Networks: Facilitating Learning and Innovation for Sustainable Agriculture. *J. Sustain. Agric.* 28, 5–28. https://doi.org/10.1300/J064v28n04_03
- Krupinsky, J.M., Bailey, K.L., McMullen, M.P., Gossen, B.D., Turkington, T.K., 2002. Managing Plant Disease Risk in Diversified Cropping Systems. *Agron. J.* 94, 198–209. <https://doi.org/10.2134/agronj2002.1980>
- Kyveryga, P.M., Mueller, T.A., Mueller, D.S., 2018. On-Farm Replicated Strip Trials. *Precis. Agric. Basics* <https://doi.org/10.2134/precisionagbasics.2016.0096>
- Lacombe, C., Couix, N., Hazard, L., 2018. Designing agroecological farming systems with farmers: A review. *Agric. Syst.* 165, 208–220. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.06.014>
- Lamine, C., 2015. Sustainability and Resilience in Agrifood Systems: Reconnecting Agriculture, Food and the Environment. *Sociol. Rural.* 55, 41–61. <https://doi.org/10.1111/soru.12061>
- Lançon, J., Wery, J., Rapidel, B., Angokaye, M., Gérardeaux, E., Gaborel, C., Ballo, D., Fadegnon, B., 2007. An improved methodology for integrated crop management systems. *Agron. Sustain. Dev.* 27, 101–110. <https://doi.org/10.1051/agro:2006037>
- Lançon, J., Reau, R., Cariolle, M., Munier-Jolain, N., Omon, B., Petit, M.-S., Viaux, P., Wery, J., 2008. Elaboration à dire d'experts de systèmes de culture innovants, in: *Systèmes de Culture Innovants et Durables: Quelles Méthodes Pour Les Mettre Au Point et Les Évaluer*. pp. 91–107.
- Larsson, M., 2013. Cultivation and processing of *Linum usitatissimum* and *Camelina sativa* in southern Scandinavia during the Roman Iron Age. *Veg. Hist. Archaeobotany* 22, 509–520. <https://doi.org/10.1007/s00334-013-0413-3>

- Lassaletta, L., Billen, G., Grizzetti, B., Garnier, J., Leach, A.M., Galloway, J.N., 2014. Food and feed trade as a driver in the global nitrogen cycle: 50-year trends. *Biogeochemistry* 118, 225–241. <https://doi.org/10.1007/s10533-013-9923-4>
- Lawrence, J., 2017. On-Farm Research.
- Lazzeri, L., D'Avino, L., Mazzoncini, M., Antichi, D., Mosca, G., Zanetti, F., Del Gatto, A., Pieri, S., De Mastro, G., Grassano, N., Cosentino, S., Copani, V., Ledda, L., Farci, R., Bezzi, G., Lazzari, A., Dainelli, R., Spugnoli, P., 2009. On Farm Agronomic and First Environmental Evaluation of Oil Crops for Sustainable Bioenergy Chains. *Ital. J. Agron.* 4, 171. <https://doi.org/10.4081/ija.2009.4.171>
- Le Bail, M., 1997. Maitrise de la qualite des cereales a l'échelle du bassin d'approvisionnement d'une entreprise de collecte-stockage: approche agronomique (thesis). Paris, Institut national d'agronomie de Paris Grignon.
- Le Bellec, F., Rajaud, A., Ozier-Lafontaine, H., Bockstaller, C., Malezieux, E., 2012. Evidence for farmers' active involvement in co-designing citrus cropping systems using an improved participatory method. *Agron. Sustain. Dev.* 32, 703–714.
- Le Bourgeois, T., Grard, P., Marnotte, P., Rodenburg, J., 2010. La plateforme AfroWeeds. Le partage d'information et l'aide à l'identification des adventices des rizières en Afrique dans une démarche collaborative régionale. Presented at the 21ème conférence du COLUMA. Journées internationales sur la lutte contre les mauvaises herbes. 8 et 9 décembre 2010., Dijon, France.
- Le Doaré, N., 2016. Diversification des espèces cultivées et des systèmes afférents : quelle démarche bibliographique pour repérer les manques en matière de recherche ? (Rapport de stage).
- 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 Masson, P., Weil, B., Hatchuel, A., 2006. Les processus d'innovation: Conception innovante et croissance des entreprises. Hermes Lavoisier, Paris.
- Le Masson, P., Hatchuel, A., Weil, B., 2009. Design theory and collective creativity: a theoretical framework to evaluate KCP process, in: DS 58-6: Proceedings of ICED 09, the 17th International Conference on Engineering Design, Vol. 6, Design Methods and Tools (Pt. 2), Palo Alto, CA, USA, 24.-27.08. 2009.
- Le Masson, P., Aggeri, F., Barbier, M., Caron, P., 2012. The sustainable fibres of generative expectation management: The “building with hemp” case study. *Syst. Innov. Knowl. Regimes Des. Pract. Transit. Sustain. Agric.* 226–251.
- Le Masson, P., McMahon, C., 2016. Armand Hatchuel et Benoit Weil - La théorie C-K, un fondement formel aux théories de l'innovation. Éditions EMS.
- Le Roux, X., Barbault, R., Baudry, J., Burel, F., Doussan, I., Garnier, E., Herzog, F., Lavorel, S., Lifran, R., Roger-Estrade, J., Sarthou, J.-P., Trommetter, M., 2008. Agriculture et biodiversité. Valoriser les synergies. Expertise scientifique collective, synthèse du rapport, INRA (France).

- Lechenet, M., Deytieux, V., Antichi, D., Aubertot, J.-N., Bàrberi, P., Bertrand, M., Cellier, V., Charles, R., Colnenne-David, C., Dachbrodt-Saaydeh, S., Debaeke, P., Doré, T., Farcy, P., Fernandez-Quintanilla, C., Grandeau, G., Hawes, C., Jouy, L., Justes, E., Kierzek, R., Kudsk, P., Lamichhane, J.R., Lescourret, F., Mazzoncini, M., Melander, B., Messéan, A., Moonen, A.-C., Newton, A.C., Nolot, J.-M., Panozzo, S., Retaureau, P., Sattin, M., Schwarz, J., Toqué, C., Vasileiadis, V.P., Munier-Jolain, N., 2017. Diversity of methodologies to experiment Integrated Pest Management in arable cropping systems: Analysis and reflections based on a European network. *Eur. J. Agron.* 83, 86–99. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.09.012>
- Leclère, M., Loyce, C., Jeuffroy, M.-H., 2018. Growing camelina as a second crop in France: A participatory design approach to produce actionable knowledge. *Eur. J. Agron.* 101, 78–89. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.08.006>
- Leclère, M., Jeuffroy, M.-H., Butier, A., Chatain, C., Loyce, C., 2019. Controlling weeds in camelina with innovative herbicide-free crop management routes across various environments. *Industrial Crops and Products* 140, 111605. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111605>
- Lecomte, C., 2005. L'évaluation expérimentale des innovations variétales. Proposition d'outils d'analyse de l'interaction génotype - milieu adaptés à la diversité des besoins et des contraintes des acteurs de la filière semences. (phdthesis). INAPG (AgroParisTech).
- Lefèvre, V., Capitaine, M., Peigné, J., Roger-Estrade, J., 2014. Farmers and agronomists design new biological agricultural practices for organic cropping systems in France. *Agron. Sustain. Dev.* 34, 623–632. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0177-2>
- Légère, A., Vanasse, A., Stevenson, F.C., 2013. Low-Input Management and Mature Conservation Tillage: Agronomic Potential in a Cool, Humid Climate. *Agron. J.* 105, 745–754. <https://doi.org/10.2134/agronj2012.0483>
- Leitgeb, F., Kummer, S., Funes-Monzote, F.R., Vogl, C.R., 2014. Farmers' experiments in Cuba. *Renew. Agric. Food Syst.* 29, 48–64. <https://doi.org/10.1017/S1742170512000336>
- Lemaire, G., Meynard, J.M., 1997. Use of the Nitrogen Nutrition Index for the Analysis of Agronomical Data, in: Lemaire, Gilles (Ed.), *Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 45–55. https://doi.org/10.1007/978-3-642-60684-7_2
- Lenssen, A.W., Iversen, W.M., Sainju, U.M., Caesar-TonThat, T., Blodgett, S.L., Allen, B.L., Evans, R.G., 2012. Yield, pests, and water use of durum and selected crucifer oilseeds in two-year rotations. *Agron. J.* 104, 1295–1304. <https://doi.org/doi:10.2134/agronj2012.0057>
- Lesur-Dumoulin, C., Lorin, M., Bazot, M., Jeuffroy, M.-H., Loyce, C., 2016. Analysis of young *Miscanthus × giganteus* yield variability: a survey of farmers' fields in east central France. *GCB Bioenergy* 8, 122–135. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12247>
- Lesur-Dumoulin, C., Laurent, A., Reau, R., Guichard, L., Ballot, R., Jeuffroy, M.H., Loyce, C., 2018. Co-design and ex ante assessment of cropping system prototypes including energy crops in Eastern France. *Biomass Bioenergy* 116, 205–215. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.06.013>

- Lévêque, O., 2013. "La bio, un atout pour me diversifier". Témoignage, François Mellon, Picardie. Tech&Bio.
- Levidow, L., Birch, K., Papaioannou, T., 2012. EU agri-innovation policy: two contending visions of the bio-economy. *Crit. Policy Stud.* 6, 40–65. <https://doi.org/10.1080/19460171.2012.659881>
- Li, P., Mo, F., Li, D., Ma, B.-L., Yan, W., Xiong, Y., 2018. Exploring agronomic strategies to improve oat productivity and control weeds: leaf type, row spacing, and planting density. *Can. J. Plant Sci.* 98, 1084–1093. <https://doi.org/10.1139/cjps-2017-0354>
- Li, X., Petersen, S.O., Sørensen, P., Olesen, J.E., 2015. Effects of contrasting catch crops on nitrogen availability and nitrous oxide emissions in an organic cropping system. *Agric. Ecosyst. Environ.* 199, 382–393. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.10.016>
- Lin, B.B., 2011. Resilience in Agriculture through Crop Diversification: Adaptive Management for Environmental Change. *BioScience* 61, 183–193. <https://doi.org/10.1525/bio.2011.61.3.4>
- Lorent, A.-R., 2018. Évaluation de la qualité des grains et de l'impact environnemental de quatre itinéraires techniques et diagnostic de la variabilité des performanes du rendement en grains au sein d'un réseau d'essais multi-local et pluriannuel (Mémoire de stage).
- Loyce, C., Wery, J., 2006. Les outils des agronomes pour l'évaluation et la conception de systèmes de culture, in: *L'agronomie Aujourd'hui*. QUAE Editions, pp. 77–95.
- Loyce, C., Meynard, J.M., Bouchard, C., Rolland, B., Lonnet, P., Bataillon, P., Bernicot, M.H., Bonnefoy, M., Charrier, X., Debote, B., Demarquet, T., Duperrier, B., Félix, I., Heddadj, D., Leblanc, O., Leleu, M., Mangin, P., Méausoone, M., Doussinault, G., 2012. Growing winter wheat cultivars under different management intensities in France: A multicriteria assessment based on economic, energetic and environmental indicators. *Field Crops Res.* 125, 167–178. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.08.007>
- Lu, C., Chen, C., Durrett, T.P., Hulbert, S., 2018. Advancing camelina for bioenergy production through genetic, agronomic and biotechnology approaches. 2018 ASA, CSSA & SSSA Annual Meeting, Baltimore.
- Ma, Y., Gentry, T., Hu, P., Pierson, E., Gu, M., Yin, S., 2015. Impact of brassicaceous seed meals on the composition of the soil fungal community and the incidence of Fusarium wilt on chili pepper. *Applied Soil Ecology* 90, 41–48. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.01.016>
- Macholdt, J., Honermeier, B., 2017. Importance of variety choice: Adapting to climate change in organic and conventional farming systems in Germany. *Outlook Agric.* 46, 178–184. <https://doi.org/10.1177/0030727017722420>
- 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. *Ecol. Econ.* 126, 152–162. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.03.024>

- Malézieux, E., 2012. Designing cropping systems from nature. *Agron. Sustain. Dev.* 32, 15–29. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0027-z>
- Malik, M.R., Tang, J., Sharma, N., Burkitt, C., Ji, Y., Mykytyshyn, M., Bohmert-Tatarev, K., Peoples, O., Snell, K.D., 2018. Camelina sativa, an oilseed at the nexus between model system and commercial crop. *Plant Cell Rep.* <https://doi.org/10.1007/s00299-018-2308-3>
- Martin, G., Felten, B., Duru, M., 2011. Forage rummy: A game to support the participatory design of adapted livestock systems. *Environ. Model. Softw.* 26, 1442–1453. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.08.013>
- Martin, G., Roger Martin-Clouaire, Michel Duru, 2013. Farming system design to feed the changing world. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 33, 131–149.
- Martinelli, T., Galasso, I., 2011. Phenological growth stages of Camelina sativa according to the extended BBCH scale. *Ann. Appl. Biol.* 158, 87–94. <https://doi.org/DOI:10.1111/j.1744-7348.2010.00444.x>
- Mary, B., Beaudoin, N., Justes, E., Mchet, J.M., 1999. Calculation of nitrogen mineralization and leaching in fallow soil using a simple dynamic model. *Eur. J. Soil Sci.* 50, 549–566. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.1999.00264.x>
- McVay, K.A., Lamb, P.F., 2008. Camelina production in Montana. *Ext. Mont Guide* 200701AG.
- Médiène, S., Valantin-Morison, M., Sarthou, J.-P., de Tourdonnet, S., Gosme, M., Bertrand, M., Roger-Estrade, J., Aubertot, J.-N., Rusch, A., Motisi, N., Pelosi, C., Doré, T., 2011. Agroecosystem management and biotic interactions: a review. *Agron. Sustain. Dev.* 31, 491–514. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0009-1>
- Meynard, J.M., 1985. Construction d'itinéraires techniques pour la culture du blé d'hiver. *These Inst. Natl. Agron. Paris-Grignon Paris.*
- Meynard J.-M., 2014. Traque aux systèmes agricoles innovants : quelques réflexions méthodologiques.
- Meynard, J.-M., 2016. Les savoirs agronomiques pour le développement : diversité et dynamique de production. *Agric. Environ. Société* 6, 19–28.
- Meynard, J.-M., Boiffin, J., Caneill, J., Sebillotte, M., 1981. Elaboration du rendement et fertilisation azotée du blé d'hiver en Champagne crayeuse II.-Types de réponse à la fumure azotée et application de la méthode du bilan prévisionnel. *Agronomie* 1 (9), 795–806.
- Meynard, J.-C., Sébillotte, M., 1989. La conduite des cultures : vers une ingénierie agronomique. *Économie Rurale* 192, 35–41. <https://doi.org/10.3406/ecoru.1989.3988>
- Meynard, J.-M., Dore, T., Habib, R., 2001. L'évaluation et la conception de systèmes de culture pour une agriculture durable. *Comptes rendus de l'Académie d'agriculture de France* 87, 223–236.
- Meynard, J.-M., Cerf, M., Guichard, L., Jeuffroy, M.-H., Makowski, D., 2002. Which decision support tools for the environmental management of nitrogen? *Agronomie* 22, 817–829. <https://doi.org/10.1051/agro:2002064>

- Meynard, J.-M., Dedieu, B., Bos, A.B., 2012. Re-design and co-design of farming systems. An overview of methods and practices, in: *Farming Systems Research into the 21st Century: The New Dynamic*. Springer, pp. 405–429.
- Meynard, J.-M., Charlier, A., Charrier, F., Fares, M., Bail, M.L., Magrini, M.-B., Messéan, A., 2013a. La spécialisation à l'œuvre. *OCL* 20, D402. <https://doi.org/10.1051/ocl/2013006>
- Meynard, J.-M., Messéan, A., Charlier, A., Charrier, F., Fares, M., Le Bail, M., Magrini, M.-B., Savini, I., 2013b. 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., Dourmad, J.-Y., 2014. L'innovation en élevage : de nouvelles démarches pour de nouveaux enjeux, in: *Numéro Spécial, Quelles Innovations Pour Quels Systèmes d'élevage ?*, INRA Prod. Anim. Ingrand S., Baumont R., pp. 77–88.
- Meynard, J.-M., Charlier, A., Charrier, F., Fares, M., Le Bail, M., Magrini, M.-B., Messéan, A., 2015. La diversification des cultures : comment la promouvoir ? [WWW Document]. URL <https://agriculture.gouv.fr/la-diversification-des-cultures-comment-la-promouvoir> (accessed 9.23.19).
- 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., Fares, M., 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, J.M., Cerf, M., Fiorelli, J.L., Jeuffroy, M.-H., Le Bail, M., Lefèvre, A., Navarrete, M., Pernel, J., Perrin, B., Prost, L., Reau, R., Salembier, C., Toffolini, Q., 2019. The step-by-step approach for farming systems design and transition. Presented at the 6th International Symposium for Farming Systems Design, Montevideo, Uruguay.
- Miles, A., DeLonge, M.S., Carlisle, L., 2017. Triggering a positive research and policy feedback cycle to support a transition to agroecology and sustainable food systems. *Agroecol. Sustain. Food Syst.* 41, 855–879. <https://doi.org/10.1080/21683565.2017.1331179>
- Mirsky, S.B., Ryan, M.R., Curran, W.S., Teasdale, J.R., Maul, J., Spargo, J.T., Moyer, J., Grantham, A.M., Weber, D., Way, T.R., Camargo, G.G., 2012. Conservation tillage issues: Cover crop-based organic rotational no-till grain production in the mid-Atlantic region, USA. *Renew. Agric. Food Syst.* 27, 31–40. <https://doi.org/10.1017/S1742170511000457>
- Mischler, P., Hocdé, H., Triomphe, B., Omon, B., 2008. Conception de systèmes de culture et de production avec des agriculteurs: partager les connaissances et les compétences pour innover. *Systèmes Cult. Innovants Durables Quelles Méthodes Pour Mettre Au Point Évaluer* 71–89.
- Mischler, P., Lheureux, S., Dumoulin, F., Menu, P., Sene, O., Hopquin, J.-P., Cariolle, M., Reau, R., Munier-Jolain, N., Faloya, V., Boizard, H., Meynard, J.-M., 2009. Huit fermes de grande culture engagées en production intégrée réduisent les pesticides sans baisse de marge. *Courr. Environ. INRA* 57, 73–91.

- Mohammad, B.T., Al-Shannag, M., Alnaief, M., Singh, L., Singasaas, E., Alkasrawi, M., 2018. Production of Multiple Biofuels from Whole Camelina Material: A Renewable Energy Crop. *BioResources* 13, 4870–4883. <https://doi.org/10.15376/biores.13.3.4870-4883>
- Mohammadi, R., Haghparast, R., Amri, A., Ceccarelli, S., 2010. Yield stability of rainfed durum wheat and GGE biplot analysis of multi-environment trials. *Crop Pasture Sci.* 61, 92. <https://doi.org/10.1071/CP09151>
- Mohammed, Y.A., Chen, C., Afshar, R.K., 2017a. Nutrient Requirements of Camelina for Biodiesel Feedstock in Central Montana. *Agron. J.* 109, 309. <https://doi.org/10.2134/agronj2016.03.0163>
- Mohammed, Y.A., Chen, C., Lamb, P., Afshar, R.K., 2017b. Agronomic Evaluation of Camelina (*Camelina sativa* L. Crantz) Cultivars for Biodiesel Feedstock. *BioEnergy Res.* 10, 792–799. <https://doi.org/10.1007/s12155-017-9840-9>
- Mohler, C.L., 2001. Enhancing the competitive ability of crops, in: *Ecological Management of Agricultural Weeds*. Cambridge University Press.
- Moraine, M., Melac, P., Ryschawy, J., Duru, M., Therond, O., 2017a. A participatory method for the design and integrated assessment of crop-livestock systems in farmers' groups. *Ecol. Indic.* 72, 340–351. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.08.012>
- Moraine, M., Duru, M., Therond, O., 2017b. A social-ecological framework for analyzing and designing integrated crop–livestock systems from farm to territory levels. *Renew. Agric. Food Syst.* 32, 43–56. <https://doi.org/10.1017/S1742170515000526>
- Morris, D.E., Oakley, J.E., Crowe, J.A., 2014. A web-based tool for eliciting probability distributions from experts. *Environ. Model. Softw.* 52, 1–4. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.10.010>
- Moser, B.R., 2010. Camelina (*Camelina sativa* L.) oil as a biofuels feedstock: Golden opportunity or false hope? *Lipid Technol.* 22, 270–273. <https://doi.org/10.1002/lite.201000068>
- Moser, B.R., 2012. Biodiesel from alternative oilseed feedstocks: camelina and field pennycress. *Biofuels* 3, 193–209. <https://doi.org/10.4155/bfs.12.6>
- Murphy, E.J., 2016. Camelina (*Camelina sativa*), in: *Industrial Oil Crops*. Elsevier, pp. 207–230. <https://doi.org/10.1016/B978-1-893997-98-1.00008-7>
- Muuse, B.G., Petrus Cuperus, F., Derksen, J.T.P., 1992. Composition and physical properties of oils from new oilseed crops. *Ind. Crops Prod.* 1, 57–65. [https://doi.org/10.1016/0926-6690\(92\)90046-X](https://doi.org/10.1016/0926-6690(92)90046-X)
- Naudin, C., Corre-Hellou, G., Pineau, S., Crozat, Y., Jeuffroy, M.-H., 2010. The effect of various dynamics of N availability on winter pea–wheat intercrops: Crop growth, N partitioning and symbiotic N₂ fixation. *Field Crops Res.* 119, 2–11. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.06.002>

- Naustdalslid, J., 2011. Climate change – the challenge of translating scientific knowledge into action. *Int. J. Sustain. Dev. World Ecol.* 18, 243–252. <https://doi.org/10.1080/13504509.2011.572303>
- Navarrete, M., Jeannequin, B., Sebillotte, M., 1997. Vigour of greenhouse tomato plants (*Lycopersicon esculentum* Mill.): Analysis of the criteria used by growers and search for objective criteria. *J. Hortic. Sci.* 72, 821–829. <https://doi.org/10.1080/14620316.1997.11515576>
- Navarrete, M., Tchamitchian, M., Aissa Madani, C., Collange, B., Taussig, C., 2010. Elaborating innovative solutions with experts using a multicriteria evaluation tool. The case of soil borne disease control in marketgardening cropping systems., in: COUDEL, E., DEVAUTOUR, H., SOULARD, C.-T., HUBERT, B. (Eds.), ISDA 2010. Cirad-Inra-SupAgro, Montpellier, France, p. 10 p.
- Navarrete, M., Lefèvre, A., Dufils, A., Pares, 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. *Innov. Agron.* 61, 33–49.
- Navarrete, M., Brives, H., Catalogna, M., Gouttenoire, L., Heinisch, C., Lamine, C., Ollion, E., Simon, S., 2018. Farmers' involvement in collective experimental designs in a French region, Rhône-Alpes. How do they contribute to farmers' learning and facilitate the agroecological transition?, in: 13th European IFSA Symposium (IFSA 2018). La Canée (Crete), Greece.
- Nelson, H.G., Stolterman, E., 2003. *The Design Way: Intentional Change in an Unpredictable World: Foundations and Fundamentals of Design Competence.* Educational Technology.
- Neupane, D., Solomon, J.K.Q., Davison, J., Lawry, T., 2018. Nitrogen source and rate effects on grain and potential biodiesel production of camelina in the semiarid environment of northern Nevada. *GCB Bioenergy.* <https://doi.org/10.1111/gcbb.12540>
- Nichols, V., Verhulst, N., Cox, R., Govaerts, B., 2015. Weed dynamics and conservation agriculture principles: A review. *Field Crops Res.* 183, 56–68. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.07.012>
- Obour K, A., 2015. Oilseed Camelina (*Camelina sativa* L Crantz): Production Systems, Prospects and Challenges in the USA Great Plains. *Adv. Plants Agric. Res.* 2. <https://doi.org/10.15406/apar.2015.02.00043>
- Obour, A.K., Obeng, E., Mohammed, Y.A., Ciampitti, I.A., Durrett, T.P., Aznar-Moreno, J.A., Chen, C., 2017. Camelina Seed Yield and Fatty Acids as Influenced by Genotype and Environment. *Agron. J.* 109, 947. <https://doi.org/10.2134/agronj2016.05.0256>
- Obour, A.K., Chen, C., Sintim, H.Y., McVay, K., Lamb, P., Obeng, E., Mohammed, Y.A., Khan, Q., Afshar, R.K., Zheljzkov, V.D., 2018. Camelina sativa as a fallow replacement crop in wheat-based crop production systems in the US Great Plains. *Ind. Crops Prod.* 111, 22–29. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.10.001>
- Oerke, E.-C., 2006. Crop losses to pests. *J. Agric. Sci.* 144, 31–43. <https://doi.org/10.1017/S0021859605005708>

- O'Hagan, A., Buck, C.E., Daneshkhah, A., Eiser, J.R., Garthwaite, P.H., Jenkinson, D.J., Oakley, J.E., Rakow, T., 2006. Uncertain Judgements: Eliciting Experts' Probabilities. John Wiley & Sons.
- O'Hagan, A., 2012. Probabilistic uncertainty specification: Overview, elaboration techniques and their application to a mechanistic model of carbon flux. *Environ. Model. Softw.*, Thematic issue on Expert Opinion in Environmental Modelling and Management 36, 35–48. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.03.003>
- Olsen, J., Kristensen, L., Weiner, J., Griepentrog, H., 2005. Increased density and spatial uniformity increase weed suppression by spring wheat. *Weed Res.* 45, 316–321. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2005.00456.x>
- Omonov, T.S., Kharraz, E., Curtis, J.M., 2017. Camelina (*Camelina Sativa*) oil polyols as an alternative to Castor oil. *Ind. Crops Prod.* 107, 378–385. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.05.041>
- Onguene, N.A., Ngo Nonga, F., Havard, M., Bella Manga, F., Pedelamore, P., 2011. Action-research in partnerships for agricultural innovations: lessons learnt from a Cameroonian experience in Grand-South Cameroon.
- Ott, M.A., Eberle, C.A., Thom, M.D., Archer, D.W., Forcella, F., Gesch, R.W., Wyse, D.L., 2019. Economics and Agronomics of Relay-Cropping Pennycress and Camelina with Soybean in Minnesota. *Agron. J.* 111, 1281–1292. <https://doi.org/10.2134/agronj2018.04.0277>
- Owen, M.D., Beckie, H.J., Leeson, J.Y., Norsworthy, J.K., Steckel, L.E., 2015. Integrated pest management and weed management in the United States and Canada. *Pest Manag. Sci.* 71, 357–376. <https://doi.org/10.1002/ps.3928>
- Ozpinar, S., 2006. Effects of tillage systems on weed population and economics for winter wheat production under the Mediterranean dryland conditions. *Soil Tillage Res.* 87, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.02.024>
- Parent, B., Leclere, M., Lacube, S., Semenov, M.A., Welcker, C., Martre, P., Tardieu, F., 2018. Maize yields over Europe may increase in spite of climate change, with an appropriate use of the genetic variability of flowering time. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 201720716. <https://doi.org/10.1073/pnas.1720716115>
- Parenty, S., 2018. Quelle organisation globale de l'amélioration des plantes pour favoriser une diversification des cultures ? (thesis). Grenoble Alpes.
- Paulsen, H.M., 2007. Organic mixed cropping systems with oilseeds: 1. Yields of mixed cropping systems of legumes or spring wheat with false flax (*Camelina sativa* L. Crantz). *Landbauforsch. Völkenrode* 57, 107–117.
- Paulsen, H.M., 2008. Organic mixed cropping systems with oilseeds 2. Yields of mixed cropping systems of linseed (*Linum usitatissimum* L.) with spring wheat, oats or false flax. *Landbauforsch. Volkenrode* 58, 307–314.
- Paulsen, H.M., 2011. Improving green-house gas balances of organic farms by the use of straight vegetable oil from mixed cropping as farm own fuel and its competition to food production. *Landbauforschung* 61, 209–216.
- Pavlista, A.D., Isbell, T.A., Baltensperger, D.D., Hergert, G.W., 2011. Planting date and development of spring-seeded irrigated canola, brown mustard and camelina. *Ind. Crops Prod.* 33, 451–456. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.10.029>

- Pelzer, E., Bazot, M., Makowski, D., Corre-Hellou, G., Naudin, C., Al Rifai, M., Baranger, E., Bedoussac, L., Biarnès, V., Boucheny, P., Carrouée, B., Dorvillez, D., Foissy, D., Gaillard, B., Guichard, L., Mansard, M.-C., Omon, B., Prieur, L., Yvergniaux, M., Justes, E., Jeuffroy, M.-H., 2012. Pea-wheat intercrops in low-input conditions combine high economic performances and low environmental impacts. *Eur. J. Agron.* 40, 39–53. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.01.010>
- Pelzer, E., Bourlet, C., Carlsson, G., Lopez-Bellido, R.J., Jensen, E.S., Jeuffroy, M.-H., 2017. Design, assessment and feasibility of legume-based cropping systems in three European regions. *Crop Pasture Sci.* 68, 902–914. <https://doi.org/10.1071/CP17064>
- Pernak, J., Łęgosz, B., Klejdysz, T., Marcinkowska, K., Rogowski, J., Kurasiak-Popowska, D., Stuper-Szablewska, K., 2018. Ammonium bio-ionic liquids based on camelina oil as potential novel agrochemicals. *RSC Advances* 8, 28676–28683. <https://doi.org/10.1039/C8RA03519A>
- Peters, K., Breitsameter, L., Gerowitt, B., 2014. Impact of climate change on weeds in agriculture: a review. *Agron. Sustain. Dev.* 34, 707–721. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0245-2>
- Petersen, R.G., 1994. *Agricultural field experiments: design and analysis*. CRC Press.
- Petit, M.S., Reau, R., Deytieux, V., Schaub, A., Cerf, M., Omon, B., Guillot, M.N., Olry, P., Vivier, C., Piaud, S., Minette, S., Nolot, J.M., 2012a. Systèmes de culture innovants : une nouvelle génération de réseau expérimental et de réseau de compétences. *Innovations Agronomiques* 25, 99–123.
- Petit, M.S., Reau, R., Dumas, M., Moraine, M., Omon, B., Josse, S., 2012b. Mise au point de systèmes de culture innovants par un réseau d'agriculteurs et production de ressources pour le conseil. *Innov. Agron.* 20 79-100 2012.
- Petit, M.-S., Reau, R., 2013. Le RMT Systèmes de culture innovants : un dispositif au service de l'innovation systémique, faisant évoluer le conseil et la formation en agronomie. *Agron. Environ. Sociétés* 3, 137–144.
- Petit, S., Cordeau, S., Chauvel, B., Bohan, D., Guillemain, J.-P., Steinberg, C., 2018. Biodiversity-based options for arable weed management. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 38, 48. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0525-3>
- Philibert, A., Loyce, C., Makowski, D., 2012. Assessment of the quality of meta-analysis in agronomy. *Agric. Ecosyst. Environ.* 148, 72–82. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.12.003>
- Platje, A., Wadman, S., 1998. From Plan-Do-Check-Action to PIDCAM: the further evolution of the deming-wheel. *Int. J. Proj. Manag.* 16, 201–208. [https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(97\)00031-8](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(97)00031-8)
- Plénet, D., Simon, S., 2015. Une démarche de conception et d'évaluation de systèmes de culture pour des vergers plus durables. *Sci. Eaux Territ.* Numéro 16, 58–63.
- Pollmann, B., 2014. Environment and agriculture of the transitional period from the Late Bronze to early Iron Age in the eastern Baltic: an archaeobotanical case study of the lakeshore settlement Luokesa 1, Lithuania. *Veg. Hist. Archaeobotany* 23, 403–418. <https://doi.org/10.1007/s00334-014-0464-0>

- 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. *Chem. Eng. Res. Des.* 103, 108–122. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2015.05.040>
- Pousset, J., 2009. La cameline. D'après l'expérience de Joseph Pousset (agriculteur-expérimentateur). Extrait du livre "Agriculture Naturelle." *Alter Agri* 96.
- Pretty, J.N., 1995. Participatory learning for sustainable agriculture. *World Dev.* 23, 1247–1263. [https://doi.org/10.1016/0305-750X\(95\)00046-F](https://doi.org/10.1016/0305-750X(95)00046-F)
- Prost, L., 2008. Modéliser en agronomie et concevoir des outils en interaction avec de futurs utilisateurs: le cas de la modélisation des interactions génotype-environnement et de l'outil DIAGVAR. (phdthesis). AgroParisTech.
- Prost, L., Makowski, D., Jeuffroy, M.-H., 2008. Comparison of stepwise selection and Bayesian model averaging for yield gap analysis. *Ecol. Model.* 219, 66–76. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.07.026>
- Prost, L., Berthet, E.T., Cerf, M., Jeuffroy, M.-H., Labatut, J., Meynard, J.-M., 2016. Innovative design for agriculture in the move towards sustainability: scientific challenges. *Res. Eng. Des.* 1–11. <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>
- Putnam, D.H., Budin, J.T., Field, L.A., Breene, W.M., 1993. *Camelina: a promising low-input oilseed.* New Crops Wiley N. Y. 314.
- Quinio, M., Détienne, F., Guichard, L., Jeuffroy, M.-H., 2019. Knowledge structures to support design of cropping systems by farmers. Presented at the 6th International Symposium for Farming Systems Design, Montevideo, Uruguay.
- Raslavičius, L., Povilaitis, V., 2013. Developing an Efficient Cover Cropping System for Organically Grown Barley. *Journal of Crop Improvement* 27, 153–169. <https://doi.org/10.1080/15427528.2012.745823>
- Ravier, C., Jeuffroy, M.-H., Gate, P., Cohan, J.-P., Meynard, J.-M., 2017a. Combining user involvement with innovative design to develop a radical new method for managing N fertilization. *Nutr. Cycl. Agroecosystems.* <https://doi.org/10.1007/s10705-017-9891-5>
- Ravier, C., Meynard, J.-M., Cohan, J.-P., Gate, P., Jeuffroy, M.-H., 2017b. Early nitrogen deficiencies favor high yield, grain protein content and N use efficiency in wheat. *Eur. J. Agron.* 89, 16–24. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.06.002>
- Ravier, C., Jeuffroy, M.-H., Gate, P., Cohan, J.-P., Meynard, J.-M., 2018. Combining user involvement with innovative design to develop a radical new method for managing N fertilization. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* 110, 117–134. <https://doi.org/10.1007/s10705-017-9891-5>
- Reau, R., Meynard, J.M., Robert, D., Gitton, C., 1996. Des essais factoriels aux essais "conduite de culture." *Expérimenter Sur Conduites Cult. Un Nouv. Savoir-Faire Au Serv. Une Agric. En Mutat.* Paris DERF-ACTA 52–62.

- Reau, R., Landé, N., 2006. Evaluation a priori de systèmes de cultures innovants conçus par des experts et adaptés à des contextes régionaux. Rapp. Final L'action 1 Proj. ADAR Systèmes Cult. Innovants 27 p.
- 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. *Innov. Agron.* 20, 5–33.
- Reau, R., Geloën, M., Laurent, A., Loyce, C., Schaub, A., Caballero, M., 2015. De novo design workshop: a method for co-designing innovative cropping systems. Presented at the 5th International Symposium for Farming Systems Design, Montpellier, France.
- Reau, R., Cros, C., Leprun, B., Merot, E., Omon, B., Paravano, L., 2016. La construction des schémas décisionnels et leurs mobilisations dans le changement des systèmes de culture. *Agric. Environ. Société* 6, 83–92.
- Reau, R., Cerf, M., Cros, C., Ferrane, C., Geloën, M., Lefevre, V., Pasquier, C., Petit, M.-S., Schaub, A., 2018. Ateliers de conception de systèmes de culture. Guide pour leur réalisation avec des agriculteurs.
- Reckling, M., Hecker, J.-M., Bergkvist, G., Watson, C.A., Zander, P., Schläfke, N., Stoddard, F.L., Eory, V., Topp, C.F.E., Maire, J., Bachinger, J., 2016. A cropping system assessment framework—Evaluating effects of introducing legumes into crop rotations. *Eur. J. Agron.* 76, 186–197. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.11.005>
- Reidsma, P., Jeuffroy, M.-H., 2017. Farming systems analysis and design for sustainable intensification: New methods and assessments. *Eur. J. Agron., Farming systems analysis and design for sustainable intensification: new methods and assessments* 82, 203–205. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.11.007>
- Reis, V.M., Baldani, J.I., Baldani, V.L.D., Dobereiner, J., 2000. Biological Dinitrogen Fixation in Gramineae and Palm Trees. *Crit. Rev. Plant Sci.* 19, 227–247. <https://doi.org/10.1080/07352680091139213>
- Rice, E.L., 1984. Allelopathy. Acad. Press N. Y.
- Righini, D., Zanetti, F., Monti, A., 2016. The bio-based economy can serve as the springboard for camelina and crambe to quit the limbo. OCL.
- Righini, D., Zanetti, F., Martínez-Force, E., Mandrioli, M., Toschi, T.G., Monti, A., 2019. Shifting sowing of camelina from spring to autumn enhances the oil quality for bio-based applications in response to temperature and seed carbon stock. *Ind. Crops Prod.* 137, 66–73. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.05.009>
- Robert, C., Ruck, L., Leflon, M., 2016. Ravageurs du colza. La France rattrapée par les résistances. *Perspect. Agric.* 434, 36–38.
- Rodríguez-Rodríguez, M.F., Sánchez-García, A., Salas, J.J., Garcés, R., Martínez-Force, E., 2013. Characterization of the morphological changes and fatty acid profile of developing *Camelina sativa* seeds. *Ind. Crops Prod.* 50, 673–679. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.07.042>

- Ronner, E., Descheemaeker, K., Almekinders, C., Ebanyat, P., Giller, K.E., 2019. Co-design of improved climbing bean production practices for smallholder farmers in the highlands of Uganda. *Agric. Syst.* 175, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2019.05.003>
- Rossing, W.A.H., Meynard, J.M., van Ittersum, M.K., 1997. Model-based explorations to support development of sustainable farming systems: case studies from France and the Netherlands, in: van Ittersum, M.K., van de Geijn, S.C. (Eds.), *Developments in Crop Science, Perspectives for Agronomy*. Elsevier, pp. 339–351. [https://doi.org/10.1016/S0378-519X\(97\)80033-5](https://doi.org/10.1016/S0378-519X(97)80033-5)
- Royo-Esnal, A., Edo-Tena, E., Torra, J., Recasens, J., Gesch, R.W., 2017. Using fitness parameters to evaluate three oilseed Brassicaceae species as potential oil crops in two contrasting environments. *Ind. Crops Prod.* 95, 148–155. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.10.020>
- Royo-Esnal, A., Valencia-Gredilla, F., 2018. Camelina as a Rotation Crop for Weed Control in Organic Farming in a Semiarid Mediterranean Climate. *Agriculture* 8, 156. <https://doi.org/10.3390/agriculture8100156>
- Ruf, F., Allagba, K., 2016. Le cacao aux portes d'Abidjan : de la forêt à la décharge publique. Traques et caches des innovations villageoises. *Bull. Veille Inter-Réseaux Dév. Rural.*
- Sadras, V.O., Lemaire, G., 2014. Quantifying crop nitrogen status for comparisons of agronomic practices and genotypes. *Field Crops Res.* 164, 54–64. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.05.006>
- Sadok, W., Angevin, F., Bergez, J.-E., Bockstaller, C., Colomb, B., Guichard, L., Reau, R., Messéan, A., Doré, T., 2009. MASC, a qualitative multi-attribute decision model for ex ante assessment of the sustainability of cropping systems. *Agron. Sustain. Dev.* 29, 447–461. <https://doi.org/10.1051/agro/2009006>
- Salembier, C., Meynard, J.M., 2013. Evaluation de systèmes de culture innovants conçus par des agriculteurs: un exemple dans la Pampa Argentine. *Innov. Agron.* 31, 27–44.
- Salembier, C., Grosso, S., Meynard, J.M., 2014. Les variétés de soja tolérantes aux herbicides, moteur de la spécialisation agricole dans la région pampéenne argentine. *Agron. Environ. Sociétés* 2 4 135-142 2014.
- Salembier, C., Elverdin, J.H., 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. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0343-9>
- Salembier, C., Segrestin, B., Berthet, E., Weil, B., Meynard, J.-M., 2018. Genealogy of design reasoning in agronomy: Lessons for supporting the design of agricultural systems. *Agric. Syst.* 164, 277–290. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2018.05.005>
- Salembier, C., 2019. Stimuler la conception distribuée de systèmes agroécologiques par l'étude de pratiques innovantes d'agriculteurs.
- Sardana, V., Mahajan, G., Jabran, K., Chauhan, B.S., 2017. Role of competition in managing weeds: An introduction to the special issue. *Crop Prot., Role of crop competition in weed management* 95, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2016.09.011>

- SAS PIVERT [WWW Document], 2019. Révéler l'innovation, du champ à la chimie. URL <https://sas-pivert.com/> (accessed 10.4.19).
- Saucke, H., Ackermann, K., 2006. Weed suppression in mixed cropped grain peas and false flax (*Camelina sativa*). *Weed Res.* 46, 453–461. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2006.00530.x>
- Sautier, M., Piquet, M., Duru, M., Martin-Clouaire, R., 2017. Exploring adaptations to climate change with stakeholders: A participatory method to design grassland-based farming systems. *J. Environ. Manage.* 193, 541–550. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.02.050>
- Sebillotte, M., 1990. Système de culture, un concept opératoire pour les agronomes, in: Combe L., Picard D. (Eds). *Les Systèmes de Culture*. INRA, Paris, pp. 165–196.
- Scheliga, M., Petersen, J., 2016. Selectivity of herbicides in camelina (*Camelina sativa* (L.) Crtz.). *Julius-Kühn-Arch.* 154–162. <https://doi.org/10.5073/jka.2016.452.020>
- Schillinger, W.F., Wysocki, D.J., Chastain, T.G., Guy, S.O., Karow, R.S., 2012. Camelina: planting date and method effects on stand establishment and seed yield. *Field Crops Res.* 130, 138–144.
- Schillinger, W.F., 2019. Camelina: Long-term cropping systems research in a dry Mediterranean climate. *Field Crops Res.* 235, 87–94. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.02.023>
- Schott, C., Mignolet, C., Meynard, J.-M., 2010. Les oléoprotéagineux dans les systèmes de culture : évolution des assolements et des successions culturales depuis les années 1970 dans le bassin de la Seine. *Ol. Corps Gras Lipides* 17, 276–291. <https://doi.org/10.1051/ocl.2010.0334>
- Schut, M., Klerkx, L., Sartas, M., Lamers, D., Campbell, M.M., Ogbonna, I., Kaushik, P., Atta-Krah, K., Leeuwis, C., 2016. Innovation platforms: experiences with their institutional embedding in agricultural research for development. *Exp. Agric.* 52, 537–561. <https://doi.org/10.1017/S001447971500023X>
- Sebillotte, M., 1990. Système de culture, un concept opératoire pour les agronomes, in: Combe L., Picard D. (Eds). *Les Systèmes de Culture*. INRA, Paris, pp. 165–196.
- Seck, P.A., Diagne, A., Mohanty, S., Wopereis, M.C.S., 2012. Crops that feed the world 7: Rice. *Food Secur.* 4, 7–24. <https://doi.org/10.1007/s12571-012-0168-1>
- Séguin-Swartz, G., Eynck, C., Gugel, R.K., Strelkov, S.E., Olivier, C.Y., Li, J.L., Klein-Gebbinck, H., Borhan, H., Caldwell, C.D., Falk, K.C., 2009. Diseases of *Camelina Sativa* (false flax). *Can. J. Plant Pathol.* 31, 375–386. <https://doi.org/10.1080/07060660909507612>
- Shahzad, M., Farooq, M., Jabran, K., Hussain, M., 2016. Impact of different crop rotations and tillage systems on weed infestation and productivity of bread wheat. *Crop Prot.* 89, 161–169. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2016.07.019>
- Shennan, C., Drinkwater, L.E., van Bruggen, A.H., Letourneau, D.K., Workneh, F., 1991. Comparative study of organic and conventional tomato production systems: An approach to on-farm systems studies, in: *Sustainable Agriculture Research and Education in the Field: A Proceedings*. National Academy Press Washington, DC, pp. 109–132.

- Shonnard, D.R., Williams, L., Kalnes, T.N., 2010. Camelina-derived jet fuel and diesel: Sustainable advanced biofuels. *Environ. Prog. Sustain. Energy* 29, 382–392. <https://doi.org/10.1002/ep.10461>
- Simon, H.A., 1969. *The sciences of the artificial*. Camb. MA.
- Simon, S., Lesueur-Jannoyer, M., Plénet, D., Lauri, P.-É., Le Bellec, F., 2017. Methodology to design agroecological orchards: Learnings from on-station and on-farm experiences. *Eur. J. Agron.* 82, 320–330. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.09.004>
- Sindelar, A.J., Schmer, M.R., Gesch, R.W., Forcella, F., Eberle, C.A., Thom, M.D., Archer, D.W., 2017. Winter oilseed production for biofuel in the US Corn Belt: opportunities and limitations. *GCB Bioenergy* 9, 508–524. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12297>
- Sintim, H.Y., Zheljazkov, V.D., Obour, A.K., Garcia y Garcia, A., Foulke, T.K., 2016. Evaluating Agronomic Responses of Camelina to Seeding Date under Rain-Fed Conditions. *Agron. J.* 108, 349–357. <https://doi.org/10.2134/agronj2015.0153>
- Solis, A., Vidal, I., Paulino, L., Johnson, B.L., Berti, M.T., 2013. Camelina seed yield response to nitrogen, sulfur, and phosphorus fertilizer in South Central Chile. *Ind. Crops Prod.* 44, 132–138. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.11.005>
- Soroka, J., Olivier, C., Grenkow, L., Séguin-Swartz, G., 2015. Interactions between *Camelina sativa* (Brassicaceae) and insect pests of canola. *Can. Entomol.* 147, 193–214. <https://doi.org/10.4039/tce.2014.42>
- Soroka, J. J., Olivier, C., Wist, T. J., Grenkow, L., 2017. Present and potential impacts of insects on camelina and crambe. *Integrated management of insect pests on canola and other Brassica oilseed crops*. Edited by GV Reddy. Centre for Agriculture and Biosciences International, Wallingford, United Kingdom, 316–340.
- Soulié, M., Bonifazi, M., Guichard, L., Quinio, M., Ballot, R., Jeuffroy, M.-H., Pelzer, E., 2019. Co-design and assessment of agronomical scenarios for reintroduction of legumes into a French territory. Presented at the European Conference on Crop Diversification, September 18-21, Budapest, Hungary.
- Soullignac, V., Pinet, F., Lambert, E., Guichard, L., Trouche, L., Aubin, S., 2019. GECO, the French Web-based application for knowledge management in agroecology. *Comput. Electron. Agric.* 162, 1050–1056. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.10.028>
- Spiertz, H., 2014. Agricultural sciences in transition from 1800 to 2020: Exploring knowledge and creating impact. *Eur. J. Agron.* 59, 96–106. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2014.06.001>
- Stagnari, F., Maggio, A., Galieni, A., Pisante, M., 2017. Multiple benefits of legumes for agriculture sustainability: an overview. *Chem. Biol. Technol. Agric.* 4, 2. <https://doi.org/10.1186/s40538-016-0085-1>
- Stassart, P.M., Baret, P., Grégoire, J.-C., Hance, T., Mormont, M., Reheul, D., Stilmant, D., Vanloqueren, G., Vissser, M., 2012. *L'agroécologie : trajectoire et potentiel Pour une transition vers des systèmes alimentaires durables*.

- Steiner, K.G., 1998. Using farmers' knowledge of soils in making research results more relevant to field practice: Experiences from Rwanda. *Agric. Ecosyst. Environ.* 69, 191–200. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(98\)00107-8](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(98)00107-8)
- Sumberg, J., Okali, C., 1988. Farmers, On-farm Research and the Development of New Technology. *Exp. Agric.* 24, 333–342. <https://doi.org/10.1017/S0014479700016185>
- Szumigalski, A., Acker, R.V., 2005. Weed suppression and crop production in annual intercrops. *Weed Sci.* 53, 813–825. <https://doi.org/10.1614/WS-05-014R.1>
- Tabatabaie, S.M.H., Tahami, H., Murthy, G.S., 2018. A regional life cycle assessment and economic analysis of camelina biodiesel production in the Pacific Northwestern US. *J. Clean. Prod.* 172, 2389–2400. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.172>
- Tabatabaie, S.M.H., Bolte, J.P., Murthy, G.S., 2018. A regional scale modeling framework combining biogeochemical model with life cycle and economic analysis for integrated assessment of cropping systems. *Sci. Total Environ.* 625, 428–439. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.208>
- Tavares, O., 2015. Paramétrage de l'outil PERSYST en Picardie.
- Tchamitchian, M., Martin-Clouaire, R., Lagier, J., Jeannequin, B., Mercier, S., 2006. SERRISTE: A daily set point determination software for glasshouse tomato production. *Comput. Electron. Agric.* 50, 25–47. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2005.07.004>
- Theau, J.P., Duru, M., Cruz, P., Jouany, C., Martin, G., Magne, M.A., Delmas, B., 2010. Contributions of partnerships to integrating agronomic knowledge on grassland management and developing actionable tools by forage advisers. *Proc. Symp. Innov. Sustain. Dev. Agric. Food Montp. Fr.* 28 June 1st July 2010.
- Tixier, P., Malézieux, E., Dorel, M., Wery, J., 2008. SIMBA, a model for designing sustainable banana-based cropping systems. *Agric. Syst.* 97, 139–150. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2008.02.003>
- Toffolini, Q., Prost, L., Jeuffroy, M.-H., 2014. Transition towards low-input cropping systems: characterization of actionable knowledge for technical change. Presented at the 11. European IFSA Symposium : Farming Systems Facing Global Challenges : Capacities and Strategies, p. 11.
- Toffolini, Q., Jeuffroy, M.-H., Prost, L., 2016a. L'activité de re-conception d'un système de culture par l'agriculteur : implications pour la production de connaissances en agronomie. *Agron. Environ. Sociétés* 6, np.
- Toffolini, Q., Jeuffroy, M.-H., Prost, L., 2016b. Indicators used by farmers to design agricultural systems: a survey. *Agron. Sustain. Dev.* 36. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0340-z>
- Toffolini, Q., Jeuffroy, M.-H., Mischler, P., Pernel, J., Prost, L., 2017. Farmers' use of fundamental knowledge to re-design their cropping systems: situated contextualisation processes. *NJAS - Wagening. J. Life Sci.* 80, 37–47. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2016.11.004>

- Toffolini, Q., Jeuffroy, M.-H., Meynard, J.M., Prost, L., 2019. Design as a source of renewal in the production of scientific knowledge in agroecology. Presented at the 6th International Symposium for Farming Systems Design, Montevideo, Uruguay.
- Tollenaar, M., Dibo, A.A., Aguilera, A., Weise, S.F., Swanton, C.J., 1994. Effect of Crop Density on Weed Interference in Maize. *Agron. J.* 86, 591–595. <https://doi.org/10.2134/agronj1994.00021962008600040003x>
- Trouche, L., AUBIN, S., Soulignac, V., Guichard, L., 2016. Construction of a semantic model for organizing knowledge dedicated to Agroecology. The case of Agro-PEPS/GECO. *Agron. Environ. Sociétés* 6, 141–150.
- Urbaniak, S.D., Caldwell, C.D., Zheljaskov, V.D., Lada, R., Luan, L., 2008. The effect of seeding rate, seeding date and seeder type on the performance of *Camelina sativa* L. in the Maritime Provinces of Canada. *Can. J. Plant Sci.* 88, 501–508.
- Urbina, R., 2019. Recensement et analyse des filières cameline (*Camelina sativa*) en France. AgroParistech Service Etudes.
- Vakulabharanam, V., 2014. Camelina Production in Saskatchewan, Canada.
- Valantin-Morison, M., Meynard, J.-M., 2012. A Conceptual Model to Design Prototypes of Crop Management: A Way to Improve Organic Winter Oilseed Rape Performance in Farmers' Fields, in: *Crop Management - Cases and Tools for Higher Yield and Sustainability*. Fabio R. Marin, p. 77.
- Van der Meulen, A., Chauhan, B.S., 2017. A review of weed management in wheat using crop competition. *Crop Prot., Role of crop competition in weed management* 95, 38–44. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2016.08.004>
- Van Kerkhoff, L., Lebel, L., 2006. Linking Knowledge and Action for Sustainable Development. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 31, 445–477. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.31.102405.170850>
- Vanloqueren, G., Baret, P.V., 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. *Dev. Crop Sci.* 25, 293–308. [https://doi.org/10.1016/S0378-519X\(97\)80029-3](https://doi.org/10.1016/S0378-519X(97)80029-3)
- Vellios, E., Karkanis, A., Bilalis, D., 2017. Powdery mildew (*Erysiphe cruciferarum*) infection on camelina (*Camelina sativa*) under mediterranean conditions and the role of wild mustard (*Sinapis arvensis*) as alternative host of this pathogen. *Emir. J. Food Agric.* 639. <https://doi.org/10.9755/ejfa.2017-02-493>
- 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. *Innov. Agron.* 74, 143–154.
- Voelker, T., Kinney, A.J., 2001. Variations in the Biosynthesis of Seed-Storage Lipids. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 52, 335–361. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.52.1.335>

- Voisin, A.-S., Guéguen, J., Huyghe, C., Jeuffroy, M.-H., Magrini, M.-B., Meynard, J.-M., Mougél, C., Pellerin, S., Pelzer, E., 2014. Legumes for feed, food, biomaterials and bioenergy in Europe: a review. *Agron. Sustain. Dev.* 34, 361–380. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0189-y>
- Vollmann, J., Damboeck, A., Eckl, A., Schrems, H., Ruckenbauer, P., 1996. Improvement of *Camelina sativa*, an underexploited oilseed. *Prog. New Crops ASHS Press Alex. VA* 1, 357–362.
- Vollmann, Steinkellner, Glauninger, 2001. Variation in Resistance of *Camelina* (*Camelina sativa* [L.] Crtz.) to Downy Mildew (*Peronospora camelinae* Gaum.). *J. Phytopathol.* 149, 129–133. <https://doi.org/10.1046/j.1439-0434.2001.00599.x>
- Vollmann, J., Moritz, T., Kargl, C., Baumgartner, S., Wagentristl, H., 2007. Agronomic evaluation of camelina genotypes selected for seed quality characteristics. *Ind. Crops Prod.* 26, 270–277. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2007.03.017>
- Vollmann, J., Laimer, M., 2013. Novel and Traditional Oil Crops and Their Biorefinery Potential, in: Yang, S.-T., El-Enshasy, H.A., Thongchul, N. (Eds.), *Bioprocessing Technologies in Biorefinery for Sustainable Production of Fuels, Chemicals, and Polymers*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, pp. 47–60.
- Walia, M.K., Wells, M.S., Cubins, J., Wyse, D., Gardner, R.D., Forcella, F., Gesch, R., 2018. Winter camelina seed yield and quality responses to harvest time. *Ind. Crops Prod.* 124, 765–775. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.08.025>
- Waligora, C., Thomas, F., 2009. Diversification des cultures. Sortez des chemins battus. *Tech. Cult. Simpl.* 55.
- Walsh, D.T., Babiker, E.M., Burke, I.C., Hulbert, S.H., 2012. *Camelina* mutants resistant to acetolactate synthase inhibitor herbicides. *Mol. Breed.* 30, 1053–1063. <https://doi.org/10.1007/s11032-011-9689-0>
- Walsh, K.D., Sanderson, D., Hall, L.M., Mugo, S., Hills, M.J., 2014. Allelopathic effects of camelina (*Camelina sativa*) and canola (*Brassica napus*) on wild oat, flax and radish. *Allelopathy J.* 33, 83–95. <https://doi.org/10.1007/s11032-011-9689-0>
- Waraich, E.A., Ahmed, Z., Ahmad, R., Ashraf, M.Y., Naeem, M.S., Rengel, Z., 2013. “*Camelina sativa*”, a climate proof crop, has high nutritive value and multiple-uses: A review. *Aust. J. Crop Sci.* 7, 1551.
- Wei, D., Liping, C., Zhijun, M., Guangwei, W., Ruirui, Z., 2010. Review of non-chemical weed management for green agriculture. *Int. J. Agric. Biol. Eng.* 3, 52–60.
- 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>
- Wezel, A., Brives, H., Casagrande, M., Clément, C., Dufour, A., Vandenbroucke, P., 2016. Agroecology territories: places for sustainable agricultural and food systems and biodiversity conservation. *Agroecol. Sustain. Food Syst.* 40, 132–144. <https://doi.org/10.1080/21683565.2015.1115799>

- Wisler, G.C., Norris, R.F., 2005. Interactions between weeds and cultivated plants as related to management of plant pathogens. *Weed Sci.* 53, 914–917. <https://doi.org/10.1614/WS-04-051R.1>
- Wittkop, B., Snowdon, R.J., Friedt, W., 2009. Status and perspectives of breeding for enhanced yield and quality of oilseed crops for Europe. *Euphytica* 170, 131–140.
- Woyengo, T.A., Beltranena, E., Zijlstra, R.T., 2017. Effect of anti-nutritional factors of oilseed co-products on feed intake of pigs and poultry. *Animal Feed Science and Technology* 233, 76–86. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2016.05.006>
- Wu, X., Leung, D.Y.C., 2011. Optimization of biodiesel production from camelina oil using orthogonal experiment. *Appl. Energy* 88, 3615–3624. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.04.041>
- Wysocki, D.J., Chastain, T.G., Schillinger, W.F., Guy, S.O., Karow, R.S., 2013. Camelina: seed yield response to applied nitrogen and sulfur. *Field Crops Res.* 145, 60–66. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.02.009>
- Yaduraju, N.T., Sharma, A.R., Rao, A.N., 2015. Weeds in Indian Agriculture: Problems and prospects to become self sufficient. *Indian Farming* 65, 02–06.
- Yang, J., Caldwell, C., Corscadden, K., He, Q.S., Li, J., 2016. An evaluation of biodiesel production from *Camelina sativa* grown in Nova Scotia. *Ind. Crops Prod.* 81, 162–168. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.11.073>
- Yildiz, M., Eroldogan, T.O., Ofori-Mensah, S., Engin, K., Baltaci, M.A., 2018. The effects of fish oil replacement by vegetable oils on growth performance and fatty acid profile of rainbow trout: Re-feeding with fish oil finishing diet improved the fatty acid composition. *Aquaculture* 488, 123–133. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.12.030>
- Zadoks, J.C., Chang, T.T., Konzak, C.F., 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Res.* 14, 415–421. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1974.tb01084.x>
- Zander, P., Amjath-Babu, T.S., Preissel, S., Reckling, M., Bues, A., Schläfke, N., Kuhlman, T., Bachinger, J., Uthes, S., Stoddard, F., Murphy-Bokern, D., Watson, C., 2016. Grain legume decline and potential recovery in European agriculture: a review. *Agron. Sustain. Dev.* 36, 26. <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0365-y>
- Zanetti, F., Monti, A., Berti, M.T., 2013. Challenges and opportunities for new industrial oilseed crops in EU-27: A review. *Ind. Crops Prod.* 50, 580–595. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.08.030>
- Zanetti, F., Scordia, D., Vamerali, T., Copani, V., Dal Cortivo, C., Mosca, G., 2016. *Crambe abyssinica* a non-food crop with potential for the Mediterranean climate: Insights on productive performances and root growth. *Ind. Crops Prod.* 90, 152–160. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.06.023>
- Zanetti, F., Eynck, C., Christou, M., Krzyżaniak, M., Righini, D., Alexopoulou, E., Stolarski, M.J., Van Loo, E.N., Puttick, D., Monti, A., 2017. Agronomic performance and seed quality attributes of *Camelina* (*Camelina sativa* L. crantz) in multi-environment trials across Europe and Canada. *Ind. Crops Prod.* 107, 602–608. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.06.022>

- Zhao, B., 2014. Determining of a critical dilution curve for plant nitrogen concentration in winter barley. *Field Crops Res.* 160, 64–72. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.02.016>
- Zhu, X., Wang, D., Li, N., Sun, X.S., 2017. Bio-Based Wood Adhesive from Camelina Protein (a Biodiesel Residue) and Depolymerized Lignin with Improved Water Resistance. *ACS Omega* 2, 7996–8004. <https://doi.org/10.1021/acsomega.7b01093>
- Zubr, J., 1997. Oil-seed crop: Camelina sativa. *Ind. Crops Prod.* 6, 113–119. [https://doi.org/10.1016/S0926-6690\(96\)00203-8](https://doi.org/10.1016/S0926-6690(96)00203-8)
- Zubr, J., 2003a. Dietary Fatty Acids and Amino Acids of Camelina Sativa Seed. *J. Food Qual.* 26, 451–462. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4557.2003.tb00260.x>
- Zubr, J., 2003b. Qualitative variation of Camelina sativa seed from different locations. *Ind. Crops Prod.* 17, 161–169. [https://doi.org/10.1016/S0926-6690\(02\)00091-2](https://doi.org/10.1016/S0926-6690(02)00091-2)
- Zubr, J., Matthäus, B., 2002. Effects of growth conditions on fatty acids and tocopherols in Camelina sativa oil. *Ind. Crops Prod.* 15, 155–162. [https://doi.org/10.1016/S0926-6690\(01\)00106-6](https://doi.org/10.1016/S0926-6690(01)00106-6)

Annexes

Annexe 1	224
Protocole expérimental du réseau multi-local et pluriannuel	
Annexe 2	239
Compte rendu de la réunion d'échanges autour des résultats	
Annexe 3	246
Compte rendu du tour de plaine	
Annexe 4	252
Retranscription des échanges du tour de plaine	

Annexe 1

Protocole expérimental du réseau multi-local et pluriannuel

Protocole expérimental du réseau d'essais multi-local et pluriannuel sur la cameline dans l'Oise

Margot Leclère
UMR Agronomie INRA/AgroParisTech
Version du 2 Août 2018

I. Objectifs du réseau d'essais

Ce réseau d'essais multi-local et pluriannuel a trois objectifs :

- (1) Evaluer différents itinéraires techniques de la cameline dans différents milieux et sur plusieurs aspects (la quantité, la qualité, les résultats économiques et les impacts environnementaux).
- (2) Tester des hypothèses sur l'effet de ces différents itinéraires techniques sur la pression adventice et sur la dynamique de l'azote (absorption, restitution, part de l'engrais N absorbé).
- (3) Formaliser collectivement (agriculteurs, conseillers, expérimentateurs) des règles de décision pour gérer la culture de cameline en agriculture conventionnelle sur différents types de sol en Picardie, à travers l'élaboration et la conduite des traitements des essais.

II. Présentation du réseau

1. Localisation des essais

Pour des raisons pratiques, les parcelles du réseau ont été choisies de façon à se trouver dans un périmètre restreint (~ 50 km). De plus, l'objectif de ce réseau étant de couvrir la diversité des sols présents dans le bassin d'approvisionnement de la future bioraffinerie, les parcelles ont été choisies dans les trois types de sol majoritaires (limons, sables et cranettes sur craie) et le nombre total de parcelles sur les deux années d'expérimentation par type de sol est en lien avec l'importance relative des sols sur la zone d'étude. Les parcelles expérimentales se situent dans le Nord-Est de l'Oise dans les communes d'Autrêches (AUT), Moulin-sous-Touvent (MOU), Rethondes (RET), Amy (AMY), Mortemer (MOR) et Gury (GUR). Cinq parcelles ont été implantées en 2017 : 3 en limons, 1 en cranettes et 1 en sables. En 2018, quatre parcelles ont été implantées : 1 en limons, 2 en cranettes et 1 en sables (Figure 1).

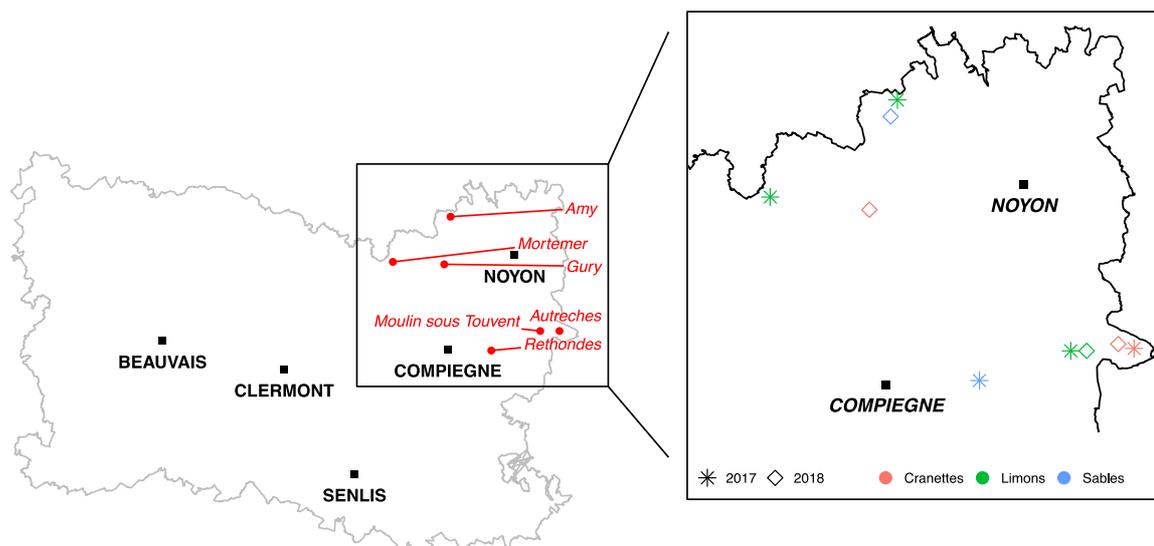


Fig 1 : Localisation des sites expérimentaux dans le département de l'Oise et types de sol des 9 parcelles

2. Description des traitements

Initialement, quatre traitements (T) ont été définis (Figure 2) :

- **Le traitement T1 « cameline pure, simple densité »** : cameline conduite selon un itinéraire technique tel que pratiqué dans les essais de cette région d'étude : une densité de semis à 4 kg/ha, un apport d'azote si nécessaire à la montaison et un traitement herbicide au semis.
- **Le traitement T2 « cameline pure, double densité »** : la densité de semis est doublée de manière à favoriser l'étouffement des adventices, ce qui permet de supprimer la protection herbicide.
- **Le traitement T3 « association cameline – orge de printemps »** : on associe la cameline pure (semée à la densité normale) avec une orge de printemps semée à 50% de sa densité optimale (70 kg/ha). La cameline est conduite comme dans le T1 mais sans herbicide : on fait en effet l'hypothèse que l'association va couvrir le sol et limiter ainsi le développement des adventices. Enfin, la dose d'azote est adaptée proportionnellement à la composition du mélange et du besoin des cultures.
- **Le traitement T4 « association cameline – pois de printemps »** : on associe la cameline semée à 100% de sa densité en culture pure (4 kg/ha) avec un pois de printemps semé à 50% de sa densité en culture pure (100 kg/ha soit 40 plantes/m²). On n'apporte pas d'engrais azoté de manière à favoriser la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique par le pois. Enfin, on fait l'hypothèse que l'association va couvrir le sol et limiter ainsi le développement des adventices, ce qui permet de supprimer la protection herbicide.

En 2017, compte tenu des conditions de levée difficiles pour la cameline, cette dernière a été étouffée par l'orge de printemps qui s'est développée beaucoup plus rapidement. Par conséquent, après concertation avec les agriculteurs, il a été décidé de mettre en place un cinquième traitement en 2018 avec une deuxième association cameline-orge de printemps où la densité de semis de l'orge a encore été réduite de 50%, soit 25% de la densité optimale. Cette modification de la densité plutôt qu'un décalage des dates de

semis des deux cultures a été choisie pour des questions pratiques (1 seul passage pour l'agriculteur).

- **Le traitement T5 « association cameline – orge de printemps adaptée »** : on associe la cameline pure (semée à la densité normale) avec une orge de printemps semée à 25% de sa densité optimale (35 kg/ha) pour limiter la compétition entre l'orge et la cameline. La cameline est conduite comme dans le T1 mais sans herbicide : on fait en effet l'hypothèse que l'association va couvrir le sol et limiter ainsi le développement des adventices. Enfin, la dose d'azote est adaptée proportionnellement à la composition du mélange et du besoin des cultures.

NB : En parallèle de ces cinq traitements, une hypothèse concernant le caractère allélopathique des résidus de cameline sera également testée (suite à la réalisation d'un atelier de réflexion avec des acteurs de la filière). Pour cela, deux traitements post-récolte seront mis en place pour permettre de tester l'hypothèse suivante : « *le broyage et l'enfouissement des résidus de cameline après la récolte permet la libération de composés qui conduisent à un effet allélopathique sur les adventices* ».

Ces mesures ont été réalisées en 2017 uniquement dans le cadre d'une collaboration avec le laboratoire BIOPI de l'université de Picardie Jules Verne. Le processus allélopathique étant complexe, il était difficile d'analyser un effet par le dispositif mis en place. Un travail à part entière mériterait d'être conduit sur cette question, d'où le choix de ne pas réitérer les mesures en 2018.

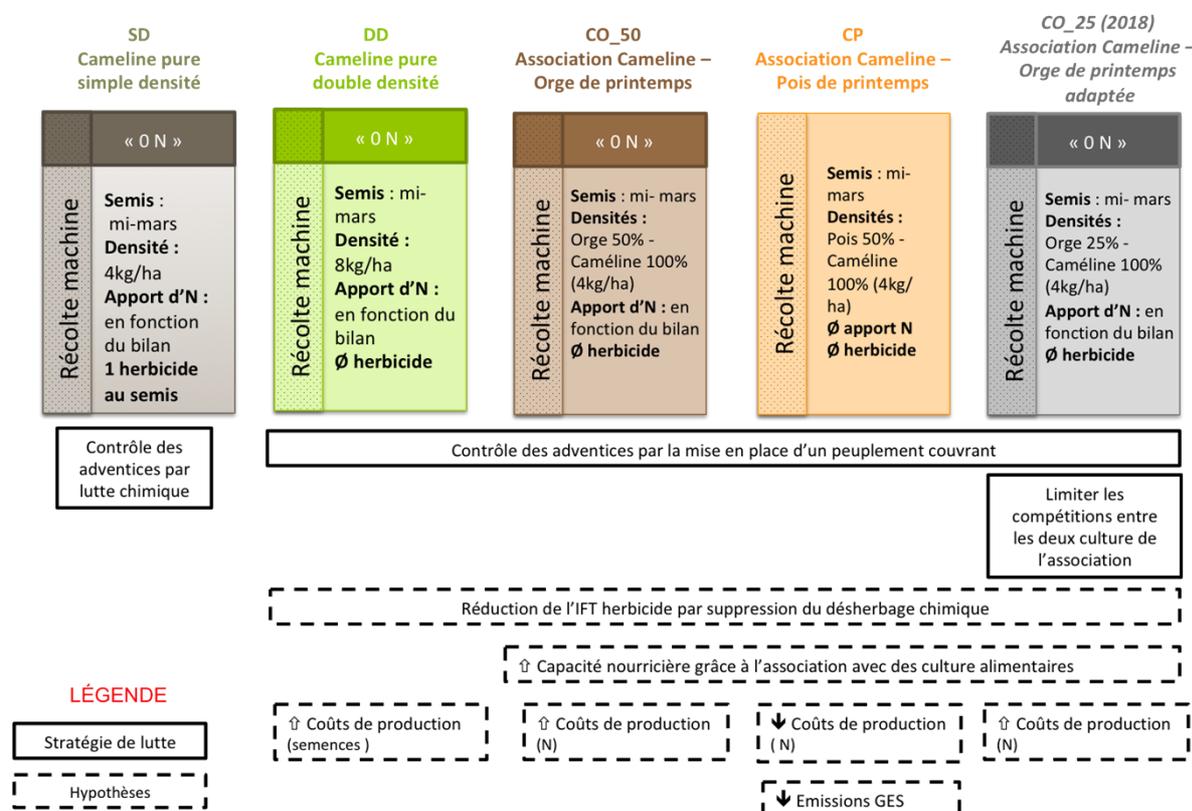


Fig 2 : Description des différents traitements et des hypothèses associées

3. Dimensionnement des bandes constituant les traitements expérimentaux

Les traitements sont organisés dans un dispositif en bandes sans répétition. Les différents traitements sont disposés en bandes parallèles sur une zone la plus homogène possible de la parcelle. La largeur des bandes est imposée par le matériel de l'agriculteur et correspond à 2 fois la largeur de la rampe du pulvérisateur utilisé (Figure 3). La longueur de la bande n'est pas fixée au préalable mais dépend de l'homogénéité de la parcelle. Compte tenu du nombre de mesures à réaliser sur la durée de l'essai, il est conseillé d'avoir une longueur comprise entre 70 et 100 m. Sur toute la longueur de la bande, on définira une zone de la largeur d'1m50 (largeur d'une moissonneuse expérimentale destinée à une récolte machine). Pour les traitements recevant une fertilisation azotée, on définira une zone « 0 azote » correspondant à environ 1/3 de la longueur totale de la bande. On veillera également à laisser une zone tampon sur les bordures de chaque bande, où aucun prélèvement ne sera effectué.

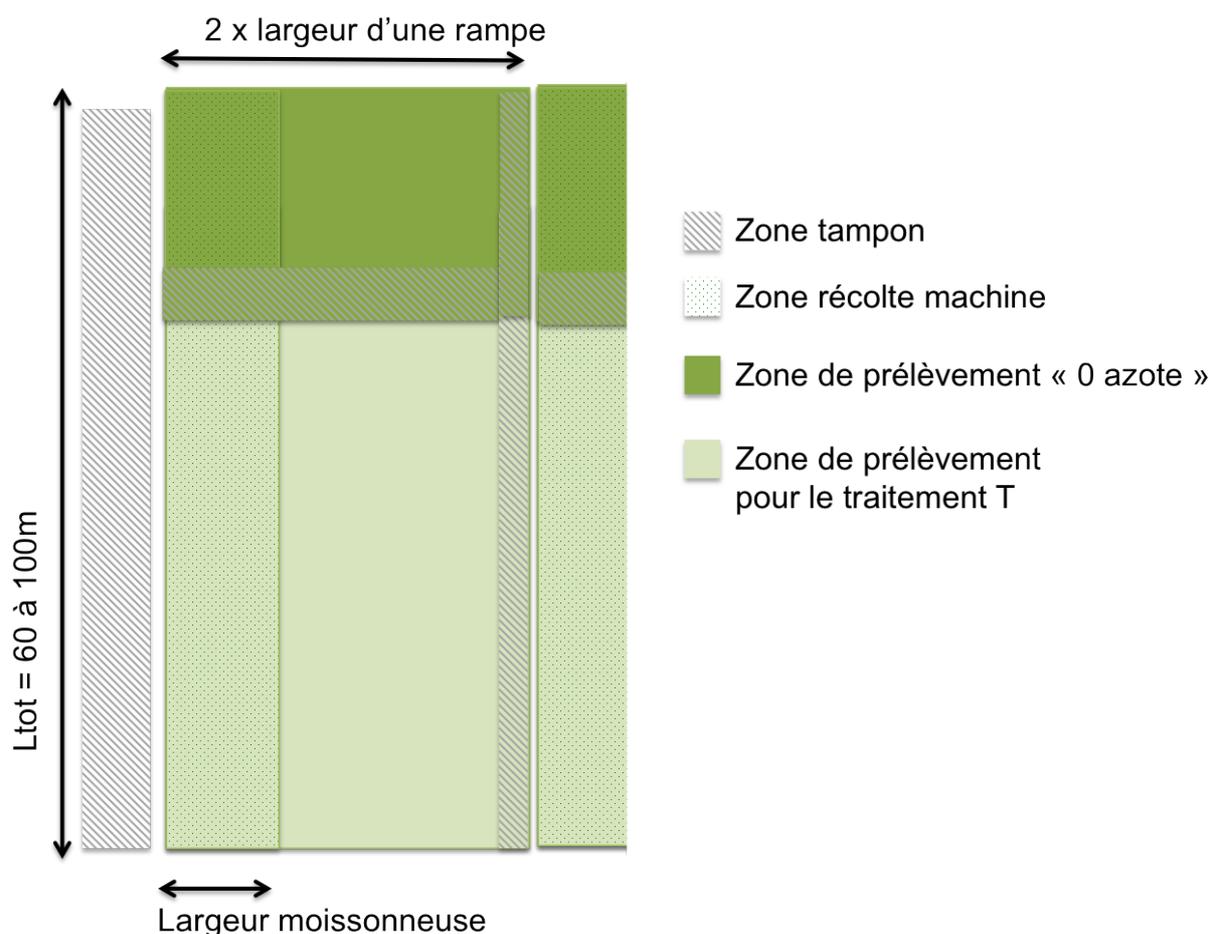


Fig 3 : Schéma du dimensionnement d'une bande correspondant à un des 4 traitements T de l'essai

III. Conduite de l'essai

1. Choix des variétés

Pour la cameline, la variété CALENA (PMG = 1,23 g) est utilisée. Compte tenu du marché actuel, les semences sont certifiées en agriculture biologique. Pour l'orge et le pois de printemps, des variétés locales sont choisies : Sangria (PMG = 32 g) et Kayanne (PMG = 246 g) respectivement. Les mêmes variétés ont été utilisées les deux années.

2. Gestion du semis

Règles de décision pour la date de semis

- Pour les traitements T2, T3 et T4 (et T5): si un faux semis est réalisable avant le 10 Mars, faire un faux semis puis semer courant Mars après levée et destruction des adventices. Sinon, faire le semis de la cameline (et des cultures qui lui sont associées dans les T3 et T4) à partir du 10 Mars quand les conditions le permettent.
- Pour le traitement T1: Semis à partir du 10 Mars quand les conditions le permettent sans faux-semis au préalable.

Densité de semis

Traitement	Densité cameline	Densité de la culture associée
T1	4 kg/ha	-
T2	8 kg/ha	-
T3	4 kg/ha	70 kg/ha (orge)
T4	4 kg/ha	100 kg/ha (pois)
T5	4 kg/ha	35 kg/ha (orge)

Travail du sol :

i la cameline possédant des petites graines, le semis nécessite un bon lit de semence bien nivelé et fin.

Gestion du semis :

- Pour la cameline pure (simple ou double densité) : semis en rangs (l'écartement dépend du matériel disponible sur l'exploitation) à environ 1 cm de profondeur puis roulage.
- Pour les associations de culture : le mode d'implantation choisi dépend du matériel disponible sur l'exploitation et de la géométrie de la parcelle. L'architecture du couvert n'est pas un facteur contrôlé de l'essai car on donne la priorité à la réussite de la levée. Deux modes d'implantation sont ainsi possibles : (i) un semis croisé (l'orge ou le pois en rangs en premier puis la cameline en second en rangs mais perpendiculairement) ou (ii) un semis sur le même rang en deux passages (d'abord orge ou pois puis cameline) ou un passage (avec un semoir de semis direct).

3. Gestion de la fertilisation NPK

Azote (N) : date et dose

L'apport d'azote, si il a lieu, **s'effectue à montaison**. La gestion de la fertilisation azotée est raisonnée à partir de calculs de bilans azotés (Annexe 1) et d'observations au champ. À partir des données des reliquats d'azote minéral en sortie hiver, une dose d'azote à apporter est calculée *a priori*. Les doses sont donc à adapter à chaque situation et sont différentes entre les sites. Si on note **Dc_N la dose d'azote calculée** en faisant la différence entre les besoins totaux en azote et la fourniture en N du sol, **les doses à**

appliquer au champ D_N répondent aux règles suivantes : on arrondi D_{C_N} à la dizaine, puis :

- Si $D_{C_N} \leq 0$ alors $D_N = 0$
- Si $0 < D_{C_N} \leq 30$ alors $D_N = 0$
- Si $D_{C_N} \geq 40$ alors $D_N = D_{C_N}$ arrondi à la dizaine

De plus :

- On applique la même dose D_N aux traitements T1 et T2. On estime que même si on augmente la densité, l'objectif de rendement est le même et donc les besoins en N de la culture également (Urbaniak et al. 2008, Johnson et al. 2009) : $D_N(T2) = D_N(T1)$;
- La dose $D_N(T3)$ est calculée à partir d'un calcul de bilan où l'on prend en compte les besoins d'une culture composée de cameline ayant les mêmes besoins en azote que le T1, car semée à 100% de sa densité, et d'orge ayant des besoins en N divisés par deux, car semée à 50% de sa densité (Pelzer et al. 2016) ;
- On n'apporte pas d'azote sur le traitement T4.

Lors de la phase de croissance de la cameline (lors de la montaison), des observations visuelles sur l'état général du peuplement végétal sont réalisées (vigueur, couleur, production de biomasse) sur les traitements dont le bilan azoté est déficitaire. En fonction de ces observations, la dose D_N est appliquée ou non sur le traitement considéré.

❶ Pour les traitements où il y a apport d'N : ne pas appliquer d'azote dans aucun des traitements sur la zone « 0 azote »

Phosphate (P) et Potassium (K)

Pas d'apport d'engrais de fond.

4. Gestion des bioagresseurs

Gestion des adventices

- Pour le traitement T1 : application de 1 l/ha de Novall. La dose peut être adaptée en fonction du type de sol (0,5 à 0,8 l/ha pour les sols sableux qui sont filtrants et donc avec des risques de phyto-toxicité pour la cameline plus importants).
- Pour les autres traitements (T2, T3 et T4) : pas d'application d'herbicide

Gestion des ravageurs et des maladies

A priori, les pressions ravageurs et maladies ne sont pas des facteurs limitant de la cameline, qui est la culture d'intérêt. De plus, on considère plutôt le pois et l'orge de printemps comme des plantes de service (avec une fonction de production moindre). Par conséquent, le seuil de tolérance est différent de celui habituellement pratiqué sur ces cultures.

En conclusion, dans le dispositif initial, aucun traitement phytosanitaire n'est envisagé. En revanche, on s'autorise à réaliser une intervention, si une des deux pressions altèrent fortement le rôle attendu des deux plantes de service (à savoir la couverture du sol).

5. Gestion de la récolte

Indicateur de maturité et date de récolte

La récolte s'effectue quand la caméline a atteint la maturité. Dans notre expérimentation, on considère que la caméline est mure quand plus de 90% des siliques sont arrivées à maturité (i.e. siliques jaunes et sèches, « *effet craquant si on écrase* ») et que les grains sont libres dans la silique, possèdent une couleur jaune foncé/orange et ont une humidité <15% c'est à dire qu'ils sont durs si on les presse entre les doigts.

❗ Si les grains sont encore faciles à écraser c'est qu'il y a trop d'humidité et qu'il faudra sécher les grains

Gestion de la récolte

Pour la bande « récolte machine », on utilise une mini moissonneuse-batteuse expérimentale afin d'obtenir des données de rendement précise. Le reste de l'essai est récolté avec le matériel habituel de l'agriculteur.

6. Gestion du post-récolte

Gestion des résidus de culture

Pour la gestion des résidus de culture, deux traitements différents sont pratiqués sur la parcelle (sur deux moitiés de l'essai) pour évaluer le potentiel effet allélopathique des pailles de caméline :

- un premier de traitement de référence où aucun travail du sol n'est réalisé : les résidus restent sur le sol et les chaumes restent en place.
- un second traitement consiste à réaliser un déchaumage superficiel (10cm) rapidement après la récolte pour bénéficier de l'humidité résiduelle et pour enfouir les résidus de culture et les chaumes.

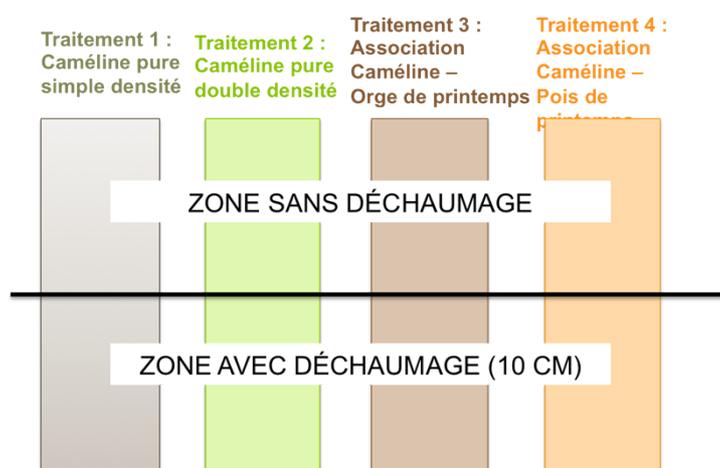


Fig 4 : Positionnement des deux modalités de gestion des résidus de récolte sur l'essai

Choix et conduite de la culture suivante

L'agriculteur est libre de choisir la culture suivante qui est adapté au système de culture en place dans lequel s'est inséré l'essai. Aucune contrainte n'est donnée sur la conduite de la culture suivante.

❶ Il faut veiller à bien garder la délimitation de l'essai d'une année sur l'autre pour pouvoir distinguer les traitements après la récolte (pour réaliser les mesures de biomasse adventices et les reliquats d'azote minéral en entrée et sortie hiver)

IV. Mesures et observations

1. Au préalable : repérage des parcelles et délimitation des traitements

La parcelle choisie par les agriculteurs (i) doit être dépourvue d'aphanomyces qui pourrait être un facteur limitant au développement du pois de printemps et si possible (ii) ne doit pas avoir reçu d'engrais organique (fumier ou boue) jusqu'à l'ante-précédent afin de limiter l'hétérogénéité. La zone de l'essai choisie dans la parcelle doit être la plus homogène possible en termes de pression adventice (notamment pas de foyer d'adventices pérennes comme les chardons).

Au sein de la zone, les quatre traitements doivent être délimités et organisés dans l'espace en tenant compte des transferts possibles de traitements phytosanitaires (sens du vent et/ou pente etc.) et des tournières pour permettre le semis. L'ordre des traitements peut changer d'un site à l'autre. Cette délimitation des traitements doit être faite en amont du début de l'essai car elle permet (i) d'indiquer à quel endroit il faut faire le faux semis et (ii) permet d'effectuer des reliquats N minéral différencié par traitement.

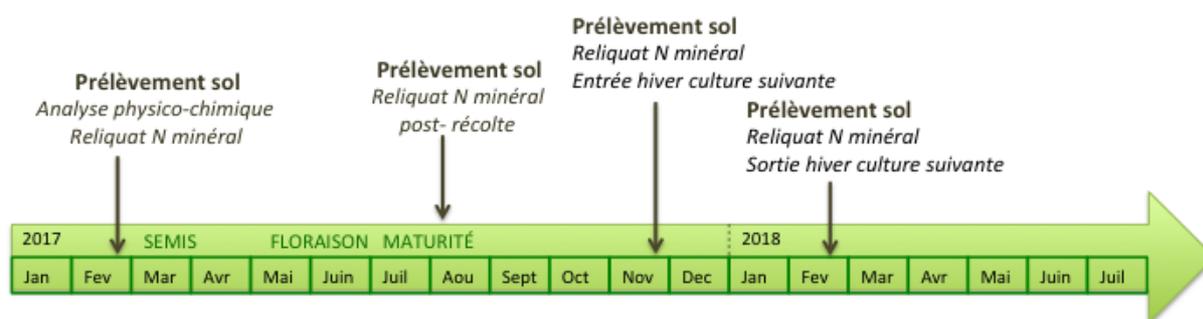
N.B. : Ne pas oublier de noter des éléments de repères (arbres, passage de roue, etc.) pour identifier l'essai et les traitements pour les observations post-récolte. Il est possible de noter les coordonnées GPS.

2. Mesure des reliquats d'azote minéral dans le sol

Objectifs : (i) Estimer la dynamique de l'azote minéral dans le sol au cours du temps en fonction des différents traitements et de la culture suivante et (ii) estimer les pertes azotées au cours de l'hiver

Quatre mesures à réaliser :

- un premier reliquat « sortie hiver » à réaliser avant le semis de l'essai et qui est également nécessaire pour déclencher ou pas l'apport de fertilisation azotée
- un second reliquat « post récolte » à réaliser juste après la récolte de l'essai (dans la semaine suivante)
- un troisième reliquat « entrée hiver » à réaliser dans la culture suivante avant l'hiver (Novembre)
- un quatrième reliquat « sortie hiver » de la culture suivante à réaliser en Février.



Pour chaque essai, prélever 8 carottes de sol en diagonale de chaque traitement (Figure 5), puis les mélanger en distinguant 3 horizons (0 – 30 cm ; 30 – 60 cm ; 60 – 90 cm). Au total on obtient donc : $3 \times 4 = 12$ échantillons par essai et donc 60 échantillons de sol pour les cinq sites en 2017 et $3 \times 5 = 15$ échantillons par essai et donc 60 échantillons de sol pour les quatre sites en 2018.

50 grammes de chaque échantillon sont envoyés au laboratoire LDAR d'Estrées Mons pour l'estimation de la quantité d'azote minéral. En parallèle, une partie de l'échantillon est utilisée pour estimer l'humidité du sol.

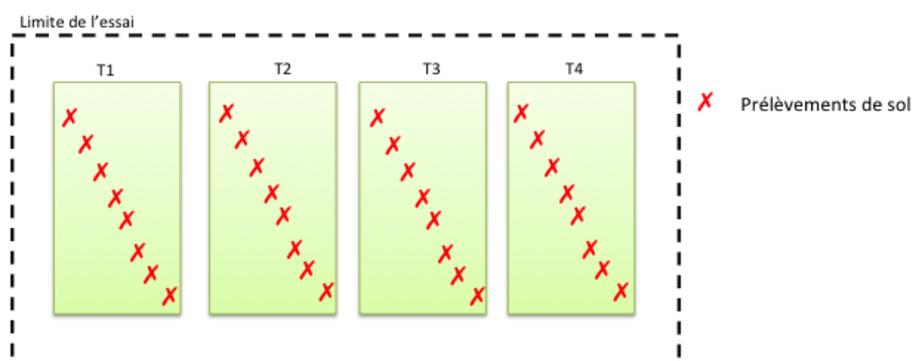


Fig 5 : Schéma de la disposition des prélèvements de sol

3. Analyse physico-chimique des sols

Objectifs : Caractériser les sols et leurs potentiels agronomiques

Cette analyse est réalisée uniquement pour la première date de prélèvement (sortie hiver avant le semis de l'essai).

À partir des prélèvements réalisés pour l'azote minéral, les échantillons sont regroupés de la façon suivante : pour chaque essai, on regroupe les 4 (ou 5) échantillons de l'horizon 0-30cm d'une part et les 8 (ou 10) autres échantillons des deux autres horizons restants.

→ Au total on obtient 2 échantillons (horizon de surface travaillé, horizon plus profond) par parcelle soit $2 \times 5 = 10$ échantillons au total en 2017 et 8 échantillons en 2018.

- Pour les deux horizons : on réalise la granulométrie 5 fractions avec décarbonatation
- Sur l'horizon de surface (0-30 cm) : on réalise également des mesures de pH, Corganique, Ntotal, P, K, CaCO₃, Mg

4. Evaluation du taux de levée et de la réussite de l'implantation de l'essai

Objectifs : (i) déterminer les densités réelles et les proportions des associations de cultures et (ii) évaluer la réussite de l'implantation

La mesure peut s'effectuer dès que la levée des cultures a eu lieu (entre 3 et 6 semaines après le semis). Pour chaque traitement, on réalise au minimum 6 observations (le nombre est à adapter en fonction de l'hétérogénéité observée sur la parcelle).

Pour la cameline pure (simple et double densité) compter le nombre de plantes sur 1m x 2 rangs. Pour les associations semées en croisé, le comptage s'effectuera sur 1m * 2 rangs pour chaque culture dans la même zone (au croisement entre deux rangs). Pour calculer les densités, penser à mesurer la largeur de l'inter-rang des semis.

5. Estimation des biomasses des cultures et des adventices (Figure 6)

Dans les différents traitements (en cours de culture)

Objectifs : (i) estimer la quantité de biomasse produite par les cultures et (ii) estimer la compétition des adventices via leur biomasse (relative par rapport à la biomasse des cultures)

Les prélèvements ont lieu à floraison et à maturité de la cameline. Les prélèvements s'effectuent sur toute la longueur de la bande dans la zone « prélèvement » c'est à dire en dehors de la zone récolte machine, des zones tampons et de la bande 0N si il y en a une.

Effectuer 6 prélèvements par bande pour les sols limoneux relativement homogènes, pour les essais sur les sols sableux et en cranettes augmenter le nombre de répétitions (jusqu'à 9), si nécessaire. Pour anticiper un potentiel gradient dans le sens de la bande, il est intéressant de toujours identifier les échantillons de 1 à 6 dans le sens de la bande.

Prélever une placette de 0,5 m².

→ Au total : 6 (9) x 4 = 24 (36) échantillons par essai soit, 120 à 180 échantillons pour chaque date de prélèvement en 2017.

Au laboratoire, trier les échantillons de façon à séparer les cultures et les adventices. Pour les associations, les deux cultures sont également séparées. Sécher à l'étuve à 80°C pendant 48h puis peser chaque sous-échantillon.

En 2018, un prélèvement supplémentaire de biomasse sera réalisé entre la levée et la floraison, en utilisant le même protocole (Figure 6).

Dans la bande « 0N » de l'essai (à la récolte)

Objectif : Evaluer le CAU (coefficient apparent d'utilisation de l'N) lorsqu'il y a eu apport d'N minéral.

Les prélèvements dans cette zone ont uniquement lieu à la maturité de la cameline. La zone 0N correspond alors à un témoin pour pouvoir calculer le CAU. Comme précédemment, 6 prélèvements sont effectués en suivant le même mode opératoire.

❶ Ces prélèvements ont lieu uniquement si il y a apport d'N

Au laboratoire, trier les échantillons de façon à séparer les cultures et les adventices. Pour les associations, les deux cultures sont également séparées. Sécher à l'étuve à 80°C pendant 48h puis peser chaque sous-échantillon.

Pendant l'interculture

Pour construire une dynamique de la biomasse des adventices, réaliser des prélèvements de biomasse après l'été dans les zones avec et sans déchaumage. Les prélèvements s'effectuent en dehors de l'ancienne bande 0N. Prélever 6 (ou 9) placettes de 0,5 m² pour chaque zone.

→ 24 (36) x 2 = 48 (72) échantillons par essai

Au laboratoire, séparer les repousses de cameline, d'orge et de pois des adventices. Sécher à l'étuve à 80°C pendant 48h puis peser chaque sous-échantillon.

6. Observation qualitative des adventices

Objectifs : (i) Mieux comprendre les dynamiques de compétitions en présence dans les différents traitements

En 2017, lors du dépouillement des placettes à floraison et maturité, des informations sur les espèces d'adventices majoritaires présentes dans les échantillons ont été relevées.

En 2018, des observations qualitatives complémentaires seront réalisées sur les parcelles du réseau. Lors du comptage, réalisée pour estimer le taux de levée, trois placettes (1 dans la potentielle zone 0N au démarrage de la bande et 2 dans le reste de la bande) seront positionnées dans la zone « récolte machine » (Figure 6). A chaque visite de l'essais (comptage, prélèvement montaison, prélèvement floraison et prélèvement récolte *a minima*), une photo de ces placettes sera prise. Lors des dépouillements en laboratoire des échantillons, les espèces présentes seront identifiées.

Une photo de l'ensemble de chaque bande sera également prise depuis un même point pour suivre l'évolution de l'architecture du couvert.

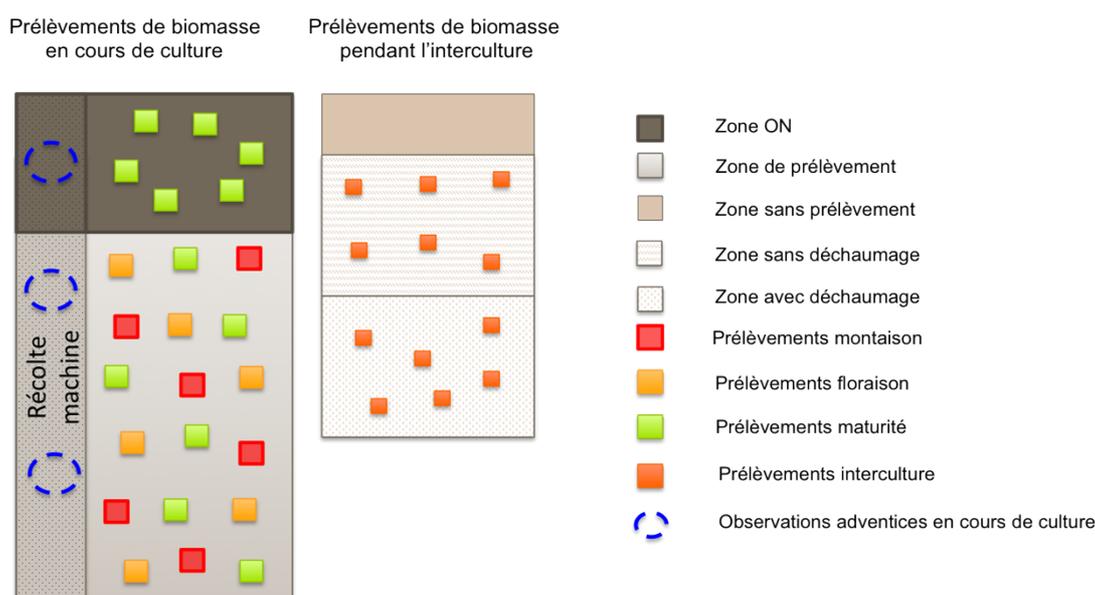


Fig 6 : Schéma de la disposition des prélèvements de biomasse (culture et adventice) et des observations

7. Mesures des teneurs en azote et en carbone

À la montaison et à la floraison, pour l'ensemble des échantillons de biomasse des cultures (donc sauf pour les adventices) réaliser une analyse de la teneur en azote totale et une analyse de la teneur en carbone total.

A la récolte, la teneur en N dans les grains séparément des pailles est réalisée pour les cultures. La teneur en carbone est mesurée dans les pailles pour avoir accès au rapport C/N des résidus de culture.

8. Estimation des rendements

Les rendements sont estimés pour les 3 cultures (cameline, orge, pois). Les rendements sont estimés (i) d'une part grâce aux prélèvements « placette » réalisés à la maturité et (ii) d'autre part par une récolte machine effectuée par un prestataire (batteuse expérimentale de petite taille).

Pour la récolte placette, les cultures sont coupées à ras du sol au champ et mis en botte et les adventices sont arrachées. Au laboratoire, après séparation des adventices et des cultures, on coupe la botte de cameline en séparant la partie basse (paille) de la partie haute (paille + grain). En pesant les deux échantillons on obtient une biomasse totale. Seule la partie haute sera battue pour obtenir le poids des grains. La quantité de paille sera obtenue par différence. Le battage de la cameline s'effectue manuellement, car cela permet de récupérer l'ensemble des autres parties végétatives pour réaliser l'analyse d'azote.

Pour la récolte machine, les mesures sont réalisées sur une bande délimitée à cet effet où aucun prélèvement n'a été effectué. Sur la longueur de l'essai, 3 mesures de rendement sont faites. Lors de la récolte, la longueur et la largeur de coupe de chaque prélèvement sont notées pour calculer la surface correspondante. Au laboratoire, les échantillons sont tamisés pour séparer la cameline des cultures associées puis chaque échantillon est passé à la colonne à air pour enlever les impuretés (siliques). Les sacs sont pesés (Matière fraîche) et un sous échantillon (1 barquette) est pesé, séché à l'étuve (48h à 80°C) puis pesé à nouveau pour obtenir l'humidité des grains et pouvoir ainsi estimer le rendement sec.

9. Mesures de qualité

Pour analyser la qualité des grains et des résidus différentes mesures sont réalisées à partir des échantillons prélevés à la récolte.

À partir des grains, on estimera : la teneur en huile, la teneur en protéines et la composition en acides gras. Afin d'expliquer un potentiel effet allélopathique de la cameline, la quantité de glucosinolates dans les pailles de la cameline sera également mesurée.

Les mesures de teneur en huile et en protéines et la composition en acide gras seront réalisées à partir des prélèvements placette et pour chacune des 6 répétitions par traitement.

En revanche les glucosinolates seront estimées à partir d'un sous échantillon des 6 répétitions (mélange des 6 répétitions puis sous échantillonnage).

10. Mesures complémentaires

Estimation des pertes de rendement liées à la grêle (2017)

En juillet 2017, juste avant la récolte, une averse de grêle a eu lieu sur 3 sites expérimentaux (Autrêches, Moulin-sous-Touvent et Rethondes) ce qui a entraîné l'ouverture des siliques et une perte de rendement. Au moment du prélèvement « récolte », une notation a été effectuée pour estimer un pourcentage de pertes de rendement.

Pour chaque traitement, à 3 endroits différents de la bande, le nombre de siliques ouvertes et le nombre de siliques fermées ont été comptés sur 5 plantes (sur la ramification principale).

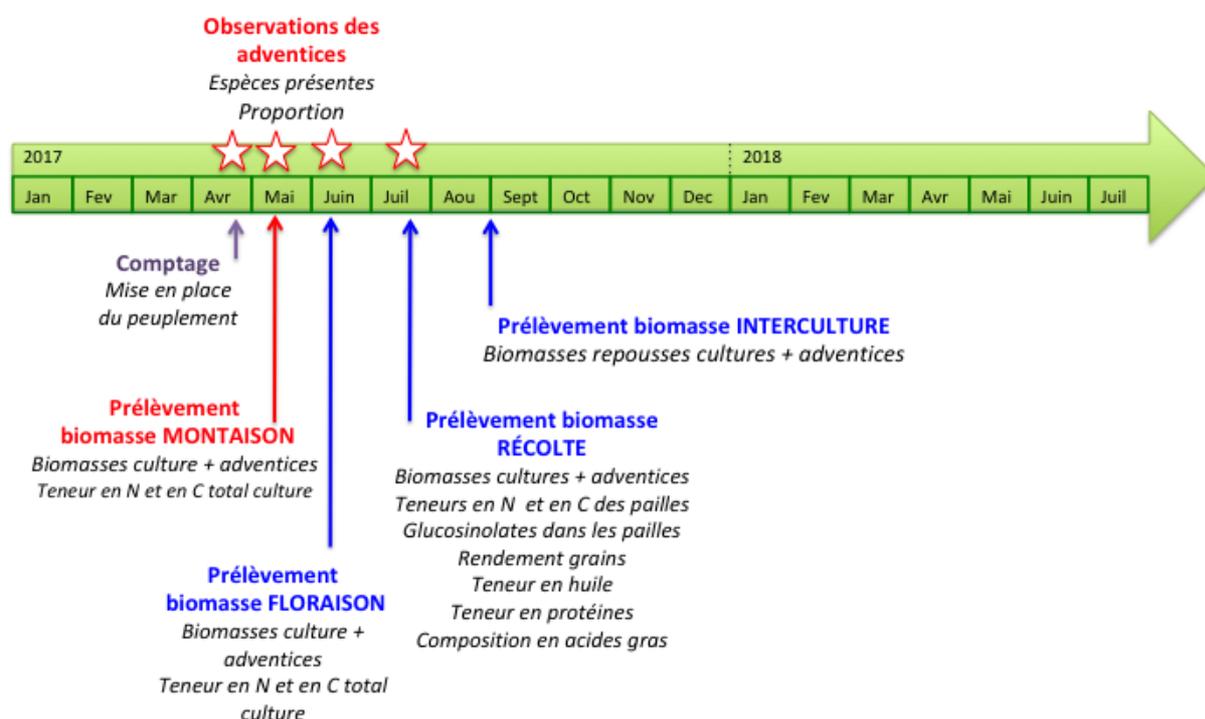
Estimation de l'incidence et de la sévérité d'un pathogène observé sur la cameline

En 2017, des symptômes de mildiou ont été observés sur certaines plantes de cameline entre la floraison et la récolte au niveau des siliques en formation. Comme l'incidence était faible (quelques plantes par bande), aucune notation n'a été réalisée.

En 2018, des symptômes de mildiou ont été observés dès le début du développement de la culture (stade rosette). Différentes notations pour estimer l'incidence et la sévérité de la maladie ont été réalisées au cours du temps :

- Le 03/05/2018, un seul site présentait des symptômes d'infection (Autrêches). A cette date, pour évaluer l'incidence, le nombre de plantes touchées sur 20 plantes a été compté 6 fois dans chaque bande.
- A montaison, le 15/03/2018, la même notation a été réalisée sur les sites qui présentaient des symptômes (Autrêches et Amy). Parmi les plantes touchées une distinction entre les plantes fortement touchées et faiblement touchées a été faite.
- A floraison (29/05/2018) afin d'intégrer l'incidence et la sévérité des symptômes, un nouveau système de notation a été mis en place. Sur 6 placettes de 0.25 m² par bande, une notation en pourcentage a été attribuée. Si la note est à 0% cela signifie qu'aucune plante est touchée. Si la note est égale à 100% cela signifie que l'ensemble des plantes sont gravement touchées. Entre 1 et 5%, seules quelques silliques sont touchées ou 1 seule plante mais gravement. Quand la note est de 15 à 25% cela signifie qu'il y a beaucoup de plantes touchées dont certaines gravement.
- A la récolte (17/07/2018), lors du dépouillement des échantillons de la récolte placette, une nouvelle évaluation de l'incidence et de la sévérité a été réalisée. Pour tous les sites, dans chaque placette, un sous-échantillon de 10 plantes a été réalisé. Sur ce sous échantillon, le nombre de plante malades (sur 10 plantes), le nombre total de siliques puis de siliques malades ont été comptés. Enfin, le pourcentage de tige touchée pour chaque plante a également été estimé.

A priori, ce sont les notations détaillées et chiffrées effectuées à la récolte qui permettront d'expliquer les pertes de rendement en lien avec le mildiou. En revanche la réalisation d'observation et de notations au cours du temps permettra d'évaluer la dynamique de la maladie.



Bibliographie

- GREN PICARDIE. « Guide de calcul de la dose d'azote à apporter sur les cultures et les prairies », 2013.
- Johnson, Eric N., Kevin Falk, Henry Klein-Gebbinck, Lance Lewis, Cecil Vera, Yantai Gan, H. Hall, et al. « Update on Camelina Agronomy Research Trials ». *AAFC Research Station, Saskatoon, SK*, 2009, 233–251.
- Pelzer, Elise, Mathieu Bazot, Laurence Guichard, et Marie-Hélène Jeuffroy. « Crop Management Affects the Performance of a Winter Pea–Wheat Intercrop ». *Agronomy Journal* 108, n° 3 (2016): 1089–1100.
- Tavares Olivia. « Paramétrage de l'outil PERSYST en Picardie », 2015.
- Urbaniak, S. D., C. D. Caldwell, V. D. Zheljzkov, R. Lada, et L. Luan. « The effect of seeding rate, seeding date and seeder type on the performance of Camelina sativa L. in the Maritime Provinces of Canada ». *Canadian Journal of Plant Science* 88, n° 3 (2008): 501–508.

Annexes du protocole expérimental

Annexe 1 : Méthode de calcul des bilans d'azote pour les traitements T1 et T3

1) Estimation des objectifs de rendement

En théorie : moyenne des rendements réalisés sur l'exploitation pour la culture considérée pour un type de sol sur 5 ans en excluant les valeurs minimales et maximales.

Pour la cameline, il existe des résultats d'essais expérimentaux en Picardie, mais uniquement conduits sur des sols limoneux. A partir de ces données, le rendement médian est calculé. L'objectif de rendement de la cameline en limons correspond à cette valeur de rendement médian.

Puis, pour adapter l'objectif de rendement en fonction des types de sol, on estime une perte moyenne de rendement pour une culture de printemps en Picardie par rapport au rendement en limons. Les données de rendements utilisées sont celles du paramétrage du modèle PerSyst pour la Picardie (Tavares, 2015). Les deux cultures utilisées pour estimer cette perte de rendement sont l'orge et le pois. Après calcul, on fixe les pertes à 23% et 17% par rapport au rendement en limons pour les sols de type sables limoneux et cranette sur craie respectivement.

Pour l'orge de printemps, semé à 50% de sa densité optimale, l'objectif de rendement est divisé par deux. Les données utilisées pour estimer l'objectif de rendement de référence sont celles du paramétrage du modèle PerSyst.

2) Estimation des « sorties » du bilan

Afin d'estimer les besoins en azote de la cameline, utiliser les besoins par unité de production du colza de printemps (= 5,2kgN/q).

Les besoins par unité de production de l'orge sont fixés à 2,5 kgN/q.

Les quantités d'azote restant dans le sol après la récolte dépendent (i) du type de sol et (ii) de la profondeur sur laquelle le bilan est réalisé. Un tableau de valeur est disponible pour les sols de l'Oise (GREN PICARDIE, 2013).

3) Estimation des « entrées » du bilan ou fournitures en azote

La valeur du reliquat azoté utilisée pour les calculs est la valeur moyenne des reliquats mesurés des quatre traitements.

La minéralisation du sol, des résidus de culture et de l'interculture dépend (i) du type de sol et (ii) de l'itinéraire technique pratiqué sur la parcelle. La valeur de chaque terme est adaptée à chaque situation en fonction des pratiques de l'agriculteur sur la parcelle. La valeur des termes est choisie à partir des tableaux, adaptées à la région, disponibles sur la plaquette du GREN PICARDIE (2013).

Annexe 2**Compte rendu de la réunion d'échanges autour des résultats**

Journée de restitution
**« Bilan des expérimentations cameline mises en place
dans le département de l'Oise en 2017 »**

22 Janvier 2018

COMPTE RENDU

Margot Leclère

UMR Agronomie INRA/AgroParisTech

Liste des participants :

Arnaud Butier (*UMR Agronomie INRA/AgroParisTech*); Philippe Carpentier (*agriculteur*); Vincent Cavois (*agriculteur*); Christophe Chatain (*Chambre d'Agriculture de l'Oise*); Bruno Delacour (*agriculteur*); Hervé de Smedt (*agriculteur*); Frédéric Fine (*Terres Inovia*); Caroline Godard (*Agro Transfert Ressources et Territoires*); Stéphane Hervieu (*Agro Transfert Ressources et Territoires*); Marie-Hélène Jeuffroy (*UMR Agronomie INRA/AgroParisTech*); Margot Leclère (*UMR Agronomie INRA/AgroParisTech*); Julien Lefevre (*agriculteur*); Sylvain Lefevre (*agriculteur*); Jérôme Le Nôtre (*SAS PIVERT*); François Mesnard (*Université Picardie Jules Verne*); Roland Molinié (*Université Picardie Jules Verne*); Brigitte Thomasset (*Université de Technologie de Compiègne*); Arnaud Van Boxsom (*Terres Inovia*); Alex Vandeputte (*agriculteur*); Vincent Vecten (*agriculteur*); Sophie Wieruszeski (*Chambre d'Agriculture de l'Oise*)

1) Rappel du contexte et des objectifs de la journée

Cette journée de restitution a été organisée dans le cadre des travaux de thèse de Margot Leclère portant sur l'introduction de la cameline dans les systèmes de culture de l'Oise pour approvisionner une bioraffinerie oléagineuse. En 2017, deux dispositifs expérimentaux ont été mis en place afin d'expérimenter différentes modalités d'insertion et de conduite de la cameline : un réseau d'essais multi-local et pluriannuel et un réseau « agriculteurs-expérimentateurs ». Le réseau d'essais a permis d'évaluer quatre modalités différentes semées au printemps dans cinq parcelles *via* un suivi expérimental. Dans le second dispositif, quatre agriculteurs ont mis en place treize modalités de conduite de la cameline semées en été (fin juin) qu'ils ont observées. Le suivi de ce dispositif a été réalisé *via* des enquêtes menées par Margot Leclère auprès des agriculteurs et des visites des parcelles.

L'objectif de la journée était (i) de présenter et discuter les résultats obtenus pour les deux dispositifs (matinée) et (ii) de préparer les essais pour l'année 2018 (après-midi).

2) Synthèse de la discussion autour des résultats obtenus

a) Gestion de l'implantation

Pour les semis de printemps, le taux de levée a été faible (30% en moyenne). Les traitements en double densité n'ont même pas atteint l'objectif de la simple densité (325 plantes/m²). Ceci s'explique principalement par l'absence de précipitations juste après le semis. Cependant, il faudrait affiner l'analyse des résultats en regardant s'il existe une différence entre les différentes méthodes de semis qui ont été utilisées par les agriculteurs (semis direct, avec ou sans faux semis, semis en 2 passages). De plus, comme la différence entre la densité obtenue et la densité visée est importante pour tous les traitements et dans tous les sites, il serait intéressant de regarder la capacité germinative du lot de graines utilisé pour les essais.

Pour la cameline en double culture, le semis en dérobé (après récolte de la culture suivante) est trop tardif pour permettre à la cameline d'arriver à maturité avant le semis de la culture suivante, sauf après des cultures à récolte très précoce (comme le pois de conserve). Dans ce cas, après un travail du sol, il faut planter la culture à 6 kg/ha (la densité de 4 kg/ha étant trop faible pour permettre de couvrir le sol). Le semis en relais (à la volée dans la culture précédente) est possible même si la cameline est une culture à petite graine. Cependant, il semblerait que l'orge d'hiver ne soit pas adaptée comme culture précédente car les repousses sont trop étouffantes et rendent nécessaire l'application d'un herbicide anti-graminées. Dans l'idéal il faut planter la cameline dans une culture de pois protéagineux ou de blé avec une coupe haute pour limiter les pailles au sol. En semis à la volée, compte tenu de l'hétérogénéité de la levée dans l'espace, il faudrait faire un semis à 8 kg/ha pour permettre la meilleure couverture du sol possible.

Il faut adapter la densité de semis en fonction de la capacité germinative des lots de semences et la méthode de semis (entre 4 et 8 kg/ha). L'implantation de la culture est une étape clef pour pouvoir s'affranchir d'un désherbage chimique en cours de culture. Il faudrait également favoriser des variétés précoces pour les semis d'été pour augmenter les chances d'atteindre la maturité. Il faudrait obtenir des informations sur la variabilité variétale du point de vue de la précocité.

b) Gestion de la fertilisation azotée

D'après les observations, il semblerait que l'apport d'azote en cours de culture favorise la phase végétative (effet visuel) mais n'impacte pas le rendement. Cependant, un apport d'azote au démarrage de la culture pourrait être un levier intéressant pour favoriser l'implantation de la cameline.

En 2018, on devrait être dans une situation très contrastée par rapport à 2017 avec des reliquats d'azote minéral dans les sols en sortie d'hiver beaucoup moins importants, donc il faudra surement envisager d'apporter de l'engrais azoté. Cela permettra d'étudier les effets potentiels de la fertilisation azotée sur la pression adventice, la qualité de l'huile, les maladies, etc. (sachant qu'un témoin ON est prévu pour chaque traitement).

c) *Gestion des bioagresseurs*

Une maladie dont les symptômes correspondent à un feutrage blanc sur la tige et les siliques a été observée dans les deux dispositifs. Il existe encore des incertitudes sur la nature de cette maladie (oïdium ou mildiou ?) et son incidence sur le rendement. La sévérité de la maladie varie en fonction de l'année : peu de symptômes ont été observés en 2016 alors qu'ils étaient assez présents en 2017.

Il faut identifier précisément la maladie qui touche la cameline et quantifier sa sévérité et son incidence afin de pouvoir envisager une stratégie de lutte.

A l'échelle du réseau d'essais multi-local et pluriannuel, le niveau d'adventices est globalement satisfaisant et acceptable du point de vue agronomique : même dans les traitements où il y a eu le plus d'adventices, le rendement potentiel ne semble pas affecté. Cependant, la présence de graines d'adventices dans la récolte peut affecter le stockage et l'extraction de l'huile et le tri optique reste cher et induit beaucoup de pertes (jusqu'à 50%). Par conséquent, il faut limiter au maximum les adventices au champ.

Il existe encore pas mal d'incertitudes sur l'efficacité réelle des herbicides. Dans le cas du réseau d'essais, quand la cameline a été désherbée chimiquement (Novall 1l/ha en pré levée), il y a eu plus d'adventices que dans les autres traitements. Deux hypothèses ont été formulées pour expliquer cette observation : (i) l'herbicide n'a pas été efficace à cause du manque précipitations après le semis ou (ii) l'herbicide a eu un effet phytotoxique sur la cameline ce qui a empêché la compétition avec les adventices. L'option d'un désherbage mécanique avec une herse ou une houe rotative est envisageable et pourrait être efficace mais il faut identifier le stade adéquat pour ne pas dégrader la culture de cameline.

Afin de gérer les adventices dans les parcelles et pour faciliter le traitement post-récolte des lots récoltés, il faut mettre en œuvre tous les leviers possibles pour favoriser une bonne implantation (semis dans un sol bien travaillé à une densité adéquate potentiellement couplée à un apport d'azote). Le désherbage mécanique peut être une alternative possible avant d'employer la lutte chimique. Il faudrait cependant avoir connaissance de produits qui pourraient être utilisés en post-levée en cas de besoin pour rattrapage.

d) *Gestion de la récolte, rendements et qualité des graines*

Concernant la date de récolte, même si la cameline semble moins sensible que le colza à l'égrainage, il ne faut pas trop attendre avant de récolter. Les rendements de l'ensemble des expérimentations sont satisfaisants et pour la majorité d'entre eux se situent dans la tranche haute des rendements connus pour la cameline (15-25 q/ha).

La cameline en culture pure et bien sèche est mécaniquement assez facile à récolter. Cependant, pour limiter les pertes il faut ouvrir au maximum les grilles et donc il faut trier par la suite pour séparer les capsules et les graines (ce qui se fait assez facilement). En revanche, il est très difficile de récolter de la cameline humide (comme pour la cameline d'été en 2017).

Pour la récolte des associations, il peut y avoir un léger décalage de maturité entre les espèces (notamment orge et cameline) ce qui peut entraîner le recul de la récolte pour permettre à l'orge d'arriver à maturité. Il ne semble pas difficile de trier après récolte les

graines d'orge ou de pois de celles de la cameline, mais il n'est pas facile de trouver un réglage qui permet de récupérer les deux graines. Une solution peut être d'ouvrir un maximum les grilles et de trier par la suite.

En moyenne, on observe une teneur en huile des grains comprise entre 30 et 40%. Il faut approfondir l'étude de la variabilité entre les sites et traitements, car en termes de composition en acides gras, une différence d'1% peut déjà être considérée comme importante notamment vis-à-vis de la rémunération. Le faible taux d'acide érucique est un atout intéressant mais il faut vérifier que cette valeur ne varie pas en fonction de l'itinéraire technique (en fonction de l'azote notamment).

Les résultats en termes de rendement et de qualité obtenus sur les essais 2017 semblent prometteurs. Les rendements et les teneurs en huile sont relativement élevés. Le profil en acide gras est intéressant. Il faudrait compléter cette analyse en regardant d'autres composés chimiques (glucosinolates, tocophérol, etc.). Afin d'améliorer la qualité, la variabilité génétique pourrait être un levier intéressant à mobiliser. Il faut donc regarder s'il existe à l'heure actuelle une variabilité variétale dans la composition en acides gras.

e) Gestion du post-récolte et qualité des graines de cameline

L'objectif est d'obtenir une graine très propre et à la bonne humidité pour éviter les problèmes de stockage ou d'extraction d'huile. Pour cela, il faut mettre en place des ateliers de tri post-récolte et potentiellement un séchage mais cela nécessite des volumes de production importants.

f) Bilan global

A l'heure actuelle, il ne manque pas beaucoup d'informations pour que les agriculteurs puissent réellement implanter la cameline dans leur exploitation. En conséquence, il est aujourd'hui nécessaire d'avoir une meilleure visibilité sur la filière pour pouvoir affiner les derniers éléments de l'itinéraire technique en fonction des attentes des industriels.

Suite à cette journée de restitution, un compte-rendu des résultats et des discussions sera communiqué par la SAS PIVERT auprès de l'interprofession et des partenaires industriels pour faire un état des lieux sur l'avancée des travaux conduits sur la cameline du point de vue agronomique.

3) Organisation des expérimentations de 2018

Afin de valider statistiquement les premiers résultats obtenus pour 2017 et d'améliorer la maîtrise technique de la conduite de la cameline, trois types d'essais seront mis en place en 2018 : des essais « itinéraires techniques » dans le cadre du réseau d'essais multi local et pluriannuel, des essais libres chez des agriculteurs et des essais factoriels en micro-parcelles sur la plateforme expérimentale de la chambre d'agriculture à Catenoy.

En parallèle du suivi propre à chaque type d'essais, l'objectif est d'organiser des visites des différents essais tout au long des cycles de développement pour permettre des échanges autour d'éventuels problèmes et des prises de décisions (*a priori* : une visite en fin avril/début mai, une visite en juin et éventuellement une visite en août pour les essais en semis tardif).

a) Mise en place de la 2^{ème} année du réseau d'essais cameline

En 2018, le réseau d'essais cameline est reconduit sur 5 parcelles (2 essais en limons, 1 essai en limons argileux, 1 essai en cranette et 1 essai en limons sableux). Les essais seront conduits sur une surface d'un hectare chez chaque agriculteur. En conséquence, la longueur des bandes sera adaptée en fonction de la largeur imposée par le matériel des agriculteurs.

Compte tenu des résultats obtenus pour l'association cameline/orge, il semble pertinent de réfléchir à une adaptation du traitement T3 en diminuant la densité de semis de l'orge : passage d'une densité de 70 kg/ha à 35 kg/ha. De plus, la variété d'orge utilisée (SANGRIA) n'est pas valorisable comme orge brassicole mais comme orge fourragère, une demande a été faite pour changer également la variété d'orge pour la variété PLANET. Les autres traitements (T1, T2, T3) sont reproduits « à l'identique ».

→ Les deux modifications proposées pour le T3 doivent encore être discutées pour pouvoir garantir le traitement statistique des données sur les deux années (nécessaire pour la valorisation des données par l'INRA).

Concernant le suivi de ces essais, il a été proposé de réaliser des observations en plus des mesures prévues initialement dans le protocole :

- Observation des « effets précédents » des différentes modalités sur les parcelles 2017 *via* des observations dans la culture suivante ou par un passage de drones en plus des mesures de reliquats d'azote minéral.
- Réalisation des tests de germination avant le semis pour pouvoir le cas échéant adapter la densité de semis de la cameline
- Observation de la morphologie de la cameline entre une simple et double densité
- Quantification de la sévérité de la maladie si des symptômes sont observés
- Estimation qualitative de la pression adventice en plus des mesures de biomasse

Après la récolte, en dehors des échantillons prélevés par l'INRA, l'objectif est de tout mettre en œuvre pour arriver à obtenir une production de cameline saine et viable à la fois pour constituer un stock de semences pour des semis futurs et pour envisager de presser une partie de la production pour faire de l'huile à consommer. En conséquence, les tourteaux ainsi produits pourraient peut-être être utilisés pour des analyses.

b) Réalisation d'essais « libre » par des agriculteurs

Dans la continuité du dispositif « agriculteurs-expérimentateurs », 4 agriculteurs sont intéressés pour reconduire des essais de cameline en double culture (semis en juin) derrière du pois de conserve, du pois protéagineux et du blé.

Compte tenu des problèmes liés à l'humidité en 2017, un agriculteur se propose de faire un essai où l'on fauche la cameline dès qu'elle atteint la maturité sans atteindre la bonne humidité pour voir si la qualité reste acceptable.

Cette année, faute de temps, il n'y aura pas de suivi de la part de l'INRA *via* des enquêtes, mais :

- un tour de plaine sera organisé au mois d'août pour visiter les parcelles
- les agriculteurs feront un suivi des essais et notamment pourront prendre des photos
- l'INRA récupère des échantillons pour faire des analyses de qualité (et éventuellement effectuer des mesures de rendements)
- les retours d'expérience seront partagés lors de la réunion de restitution qui sera organisée durant l'hiver 2018-2019.

c) Mise en place d'essais factoriels sur la plateforme expérimentale de Catenoy

Les différents facteurs étudiés dans ces essais seront : la date de semis, la densité de semis, le désherbage, la fertilisation azotée, les associations de culture et la variété. En tout au moins 25 modalités seront testées en micro parcelles (Tableau 1) et chaque modalité sera répétée 4 fois. Les mesures réalisées par la chambre d'agriculture dans le cadre de la plateforme (rendement, stades, notation maladies, etc.) seront complétées par des analyses de qualité *a minima* sur les traitements avec les doses d'azote variable.

Tableau 1 : Présentation des modalités testées dans les essais factoriels

(source CA60 – S. Wieruszkeski)

Modalités		Variété	Association	Date de semis	Densité de semis (kg/ha)	Dose d'azote	Pré-levée	rosette
1	Témoin	Variété 1	-	mi-mars	4	0 u	-	-
2	Date de semis	Variété 1	-	mi-avril	4	0 u	-	-
3		Variété 1	-	mi-mai	4	0 u	-	-
4		Variété 1	-	mi-juin	4	0 u	-	-
5	Densité	Variété 1	-	mi-mars	2	0 u	-	-
6		Variété 1	-	mi-mars	4	0 u	-	-
7		Variété 1	-	mi-mars	6	0 u	-	-
8		Variété 1	-	mi-mars	8	0 u	-	-
9	Désherbage	Variété 1	-	mi-mars	4	0 u	BUTISAN 1 l	-
10		Variété 1	-	mi-mars	4	0 u	NOVALL 1l	-
11		Variété 1	-	mi-mars	4	0 u	ALABAMA 2l	-
12		Variété 1	-	mi-mars	4	0 u	Produit DOW post-levée	-
13		Variété 1	-	mi-mars	4	0 u	Herse étrille	-
14		Variété 1	-	mi-mars	4	0 u	-	Herse étrille
15	Association	Variété 1	Pois de printemps	mi-mars	4 + 80	0 u	-	-
16		Variété 1	Lin	mi-mars	4 + X	0 u	-	-
17		Variété 1	Lentille	mi-mars	4 + 250 gr/m ²	0 u	-	-
18		Variété 1	Orge de printemps	mi-mars	4 + 25			
19		Variété 1	Orge de printemps	mi-mars	4 + 40 35		-	-
20		Variété 1	Orge de printemps	mi-mars	4 + 80 70			
21	Fertilisation azotée	Variété 1	-	mi-mars	4	40 u	-	-
22		Variété 1	-	mi-mars	4	80 u	-	-
23		Variété 1	-	mi-mars	4	120 u	-	-
24		Variété 1	-	mi-mars	4	80 u + X u Soufre	-	-
25	Variété	Variété 2		mi-mars	4	0 u	-	-
		...		mi-mars	4	0 u	-	-
		Variété x		mi-mars	4	0 u	-	-

Annexe 3**Compte rendu du tour de plaine****Tour de plaine
« Visite des essais cameline du réseau
multi-local dans l'Oise »***13 Juin 2018***COMPTE RENDU****Margot Leclère***UMR Agronomie INRA/AgroParisTech***Liste des participants :**

Philippe Carpentier (*agriculteur*) ; Christophe Chatain (*Chambre d'Agriculture de l'Oise*) ; Hervé de Smedt (*agriculteur*) ; Caroline Godard (*Agro Transfert Ressources et Territoires*) ; Marie-Hélène Jeuffroy (*UMR Agronomie INRA/AgroParisTech*) ; Nicolas Latraye (*Terres Inovia*) ; Margot Leclère (*UMR Agronomie INRA/AgroParisTech*) ; Anne-Raphaëlle Lorent

(UMR Agronomie INRA/AgroParisTech); Chantal Loyce (UMR Agronomie INRA/AgroParisTech); Alex Vandeputte (agriculteur)

1) Contexte et objectifs du tour de plaine

Ce tour de plaine a été organisé suite aux échanges lors de l'atelier de restitution en janvier 2018. L'objectif était de faire une évaluation qualitative des différents essais vis-à-vis de critères agronomiques importants pour les agriculteurs du réseau d'essais.

Au cours de la visite des parcelles, les agriculteurs ont été sollicités sur les questions suivantes : *Qu'observez vous ? Le traitement observé est-il satisfaisant ? Si oui, pourquoi ? Si non, pourquoi ? Quelles pistes d'amélioration proposez vous ?*

2) Quelques rappels sur le réseau d'essais multi local

Quatre parcelles ont été implantées en 2018, une parcelle en limons (MOULIN SOUS TOUVENT), deux parcelles en cranettes (GURY et AUTRÊCHES) et une parcelle en sables (AMY). L'ensemble des essais a été semé le 23 mars 2018. Au moment de la visite, la cameline est au stade du développement des siliques.

3) Principales observations

La pression adventice est très fortement liée au site et plus particulièrement à l'histoire culturale de la parcelle (type de travail du sol ou rotations).

En raison des conditions humides lors de la levée (mois d'avril), une forte présence de matricaire a été observé sur deux parcelles (AMY et MOULIN). Sur les autres parcelles la pression adventice était plus limitée avec une flore composée de chénopodes, mercuriales et/ou renouées liseron. La présence d'adventices semble être corrélée à la production de biomasse cultivée car peu d'adventices ont été observées dans les associations avec l'orge à 70 kg/ha qui est très compétitive.



À gauche, matricaires qui concurrencent fortement la cameline (Amy) ; à droite, présence de chénopodes dans la culture de cameline pure simple densité (Autrêches).

Tous les sites sont touchés par une attaque de mildiou (souche à préciser). Cependant l'intensité et la sévérité de cette maladie sont aussi très variables en fonction des sites. Plusieurs hypothèses peuvent expliquer ces attaques importantes par rapport à 2017 et la variabilité entre sites : d'une part, les conditions climatiques chaudes et humides en 2018 et d'autre part des plantes qui sont plutôt fragilisées (par les conditions climatiques ou la compétition avec les adventices).



À gauche, ramification de cameline touchée par du mildiou (Gury) ; à droite, plante de cameline fortement touchée par du mildiou (Autrêches) – photo prise le 31 mai 2018

Excepté sur le site de Moulin-sous-Touvent, où la levée des pois semble très faible (en lien avec la formation d'une croute de battance après le semis ?), l'association cameline/pois est celle qui présente le plus de stabilité entre sites : bon équilibre entre les deux cultures, une pression adventice relativement limitée et une disponibilité en azote pour la cameline visible après comparaison avec les associations cameline/orge.



Cameline associée à du pois avec un bon équilibre (à gauche, Amy) et avec prédominance de cameline (à droite, Moulin-Sous-Touvent).

Dans de nombreuses zones, il a été possible d'observer l'effet d'un apport N (organique ou minéral) sur la culture (culture plus verte, plus haute). Cependant, lorsque cet apport d'N est trop important, on observe également beaucoup plus d'adventices et de mildiou.



Zone ayant reçu de l'N lors de la fertilisation de la culture voisine à Amy (à gauche) et à Gury (à droite).

L'équilibre dans les associations avec l'orge à 30kg/ha est aléatoire : dans certaines situations, l'orge ne semble pas avoir pris complètement le dessus et pourrait donner des résultats de rendement intéressants. Mais cela reste une association risquée, notamment car la cameline est stressée du point de vue de l'azote, ce qui pourrait impacter la qualité des graines.



Comparaison de l'association cameline/orge à 70 kg par ha (à gauche) et cameline/orge à 35 kg par ha (à droite), photo du 31 mai 2018 sur le site d'Autrêches.

De manière générale, on ne voit souvent pas/peu de différence entre les traitements simple et double densité cette année. Par ailleurs, le potentiel de rendement est plus faible (en plus de la perte de production liée au mildiou).

4) Discussion et propositions d'adaptation des itinéraires techniques

Pour gérer la pression adventice, la réussite de l'implantation de la cameline semble très importante. En effet, pour l'instant la solution chimique du Novall à faible dose ne

semble pas être satisfaisante (ne contrôle pas assez les adventices et impacte trop la cameline).

- Réalisation d'un faux semis : cette technique pourrait être un levier intéressant si les solutions de désherbage chimique sont limitées. Mais la réussite est assez aléatoire (« *ça peut être tout aussi bien pire que mieux* »)
- Gestion de l'implantation : il faudrait faire un semis très superficiel (1cm maximum) voir un semis à la volée puis faire un roulage pour appuyer les graines sur le sol. Cela permettrait d'optimiser le taux de levée et de permettre une levée homogène.
- Gestion de la densité de semis : Compte tenu des faibles taux de levée pour les deux années, il faudrait raisonner l'itinéraire technique en tenant compte que lorsqu'on sème il n'y a que 80% des graines qui poussent (densité en pure plutôt autour de 6-7kg/ha que 4kg/ha). En sables, dans la zone tampon en dehors de l'essai où la densité de semis de cameline semble beaucoup plus élevée (+ de 10kg/ha), il y a une réduction de la présence des matricaires. Il faut cependant que le coût en semences reste acceptable pour mobiliser ce levier.
- Gestion de la fertilisation azotée : Du point de vue de la culture, il semble intéressant de faire un apport d'azote au démarrage de la culture. La date semble être importante : au semis cela risque de favoriser également les adventices, peut-être au stade rosette (à tester). La dose ne doit pas être trop importante (30 kg/ha comme pratiqué pour le colza dans cette zone ?).
- Comme l'association avec l'orge ne semble pas concluante (trop peu d'orge pour espérer faire un rendement correct et pas assez de cameline pour compenser la perte de rendement), d'autres associations avec des légumineuses pourraient être intéressantes : par ex. cameline/vesce (qui a été testée cette année sur le site d'Autrêches), cameline/féverole, cameline/lentille (testées sur la plateforme expérimentale de Catenoy).



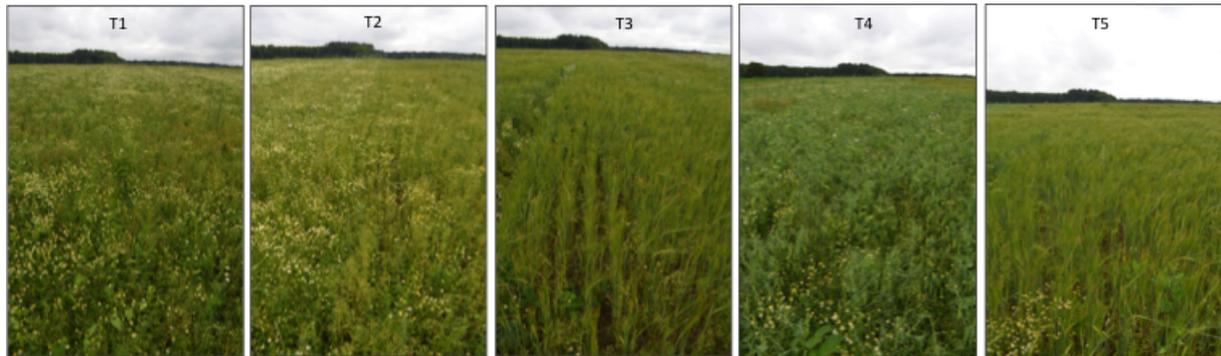
À droite, zone tampon avec une forte densité de semis de cameline et avec peu de matricaires (à droite de la photo, Amy) ; à gauche, association cameline vesce (Autrêches)

Annexe 4**Retranscription des échanges du tour de plaine**

Visite des essais cameline 13 juin 2018

Synthèse

I. Amy



Parcelle semée en direct le 23/03/2018 en sables.

Novall : 0,75l/ha sur le traitement T1

Parcelle en non-labour

➤ Observations générales :

La parcelle possède beaucoup de matricaires qui prédominent même aux cultures.

« Globalement pour l'endroit, le désherbage c'est un vrai problème » (CC)

De manière générale dans les sables (et encore plus si non labour) : il y a peu de possibilité de cultures, donc on sélectionne une flore adventice importante.

Présence de mildiou de manière assez importante (« on avait pas ça l'année dernière » ; HdS), ce qui risque d'impacter le rendement.

Explication : les conditions météo humides et chaudes « On est dans une ambiance climatique qui est très favorable au mildiou, ...dans les patates ça en est plein » (CC). « C'est du à la pluviométrie et à la chaleur » (AV) « C'est très chargé en eau, ça ne sèche pas, c'est tout le temps humide » « Il y a des brouillard toute la journée ».

Une plante fragilisée par les conditions météo qui alternent chaud et froid « une plante fragilisée est plus sensible aux maladies ».

➤ Pour le traitement T4

Le pois n'a pas permis d'étouffer les adventices, car il a été long à lever. En revanche l'équilibre entre les deux cultures est intéressant, il semblerait qu'il n'y ait pas une des cultures qui ait pris le dessus.

➤ Pour le traitement T5

Il n'y a pas assez de cameline. L'orge est beaucoup plus concurrentielle/agressive que le pois vis à vis de la cameline. Et ça fait 2 ans qu'on l'observe. L'orge est aussi agressive vis

à vis des adventices qui sont moins présentes dans cette bande. Même si c'est plus aéré dans l'association il y a quand même du mildiou.

« *Je ne sais pas si c'est une bonne association* » (AV)

« *C'est plutôt une association pour dire je produis de l'orge et après éventuellement je sépare ma cameline, c'est un sous-produit* » (AV)

➤ Pour le traitement T3

Pour l'équilibre du mélange c'est limite : il y a pas assez de cameline et trop peu d'orge (il n'y a pas assez d'épis au m²). Le faible rendement d'orge lié à la demi densité n'est pas compensé par la récolte de cameline. « *Tu pourrais faire une demi-récolte des deux, mais là non* » (AV). « *Idéalement il faudrait sortir 10q/ha en cameline et 40q/ha en orge* ». Compte tenu de ces observations, on se questionne réellement sur l'intérêt de l'orge : en quoi l'orge va être aidante à la culture de cameline ?

La date de semis de l'orge n'est pas trop tardive pour l'année.

NB : comparaison avec la plateforme où la date de semis est plus tardive.

(→ résultat : visuellement il semble y avoir plus de cameline sur la plateforme dans les 3 associations avec l'orge testées ; même celle à 70kg/ha. Regarder les rendements ?)

➤ Pour le traitement T1

Beaucoup d'adventice sur ce traitement « *C'est une association avec de la matricaire !!* » ; Du coup, il y a un vrai effet orge de printemps sur la matricaire. Mais heureusement que ça se nettoie facilement en sables (grâce à des rotations, ex. du vulpin).

Entre le traitement simple et double, il ne semble pas y avoir vraiment de différence visuelle, alors que c'était le cas l'année dernière.

La cameline a été longue à lever alors que les conditions étaient bonnes, peut-être les nuits froides ont freiné la levée.

« *C'est une année compliquée pour les plantes, on observe plein de phénomènes sur les colza ou les betteraves en lien avec des réactions physiologiques* ».

NB : A priori, la cameline semble avoir un potentiel de rendement moins important qu'en 2017, donc il pourrait être intéressant de comparer la baisse de rendement de cameline entre 2017 et 2018 à la baisse de rendement pour d'autres cultures, car à priori 2018 est une année difficile pour toutes les plantes.

→ À comparer au colza par ex. (cf. critères de l'atelier, il faut que ça produise au moins autant voir plus – du point de vue de la marge).

Le rendement va être difficile à évaluer à cause des adventices (autant de graines de cameline que de mauvaises herbes) : pb d'impuretés et d'humidité dans les lots récoltés. Quelles solutions ?

- Désherbage chimique : un produit homologué ? Car au final le Novall à 1L/ha c'est trop pour la cameline mais pas assez pour les adventices
- Faux semis : « *La solution ça reste quand même le faux semis, même si c'est compliqué, parce que après si il re-pleut dessus, ça peut être pire que mieux...* »

NB : dans le protocole envoyé par F.Valter pour les essais double culture, liste de désherbant possibles : devrinol, dopropamide → produits colza antigaminées

NB : Organiser des témoignages de producteurs de cameline lors de la prochaine réunion pour discuter autour de la gestion des adventices, de la fertilisation azotée par ex.

➤ Pour le traitement T2

La double densité y est par rapport au T1, mais visuellement la présence de matricaire est très importante (effet du désherbage sur le T1 ?). La matricaire est une adventice très compétitive.

Pas de récolte machine par l'agriculteur a priori dans ce traitement ...

➤ Autres remarques

1) Dans l'ancienne parcelle : il y a pas eu de labour après la cameline, juste un passage de chisel avant de semer ... et on voit qu'il y a des problèmes de repousses d'adventices (nécessité de passer la binette).

2) Une bande à droite de l'essai semé plus dense (10 - 12 kg/ha) et on voit qu'il y a nettement moins d'adventice, surtout matricaire alors que pas d'apport d'herbicide.

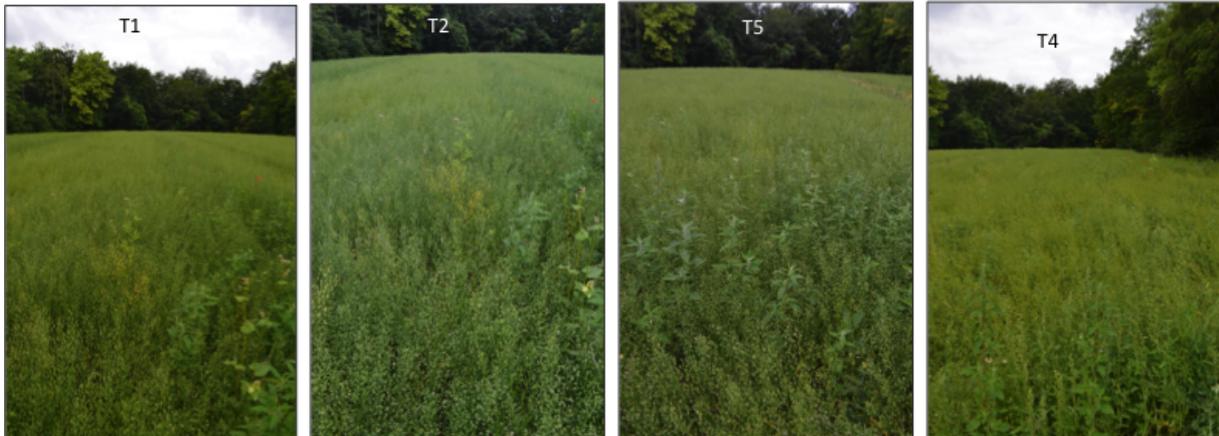
NB : Faudrait-il estimer le rendement dans cette bande et voir la densité de semis ?

« Il y a quelque chose à faire sur la qualité de semis » (HdS) → question du taux de levée faible ? Résultat des comptages ?

3) En bordure de l'essai à côté du maïs il y a une zone où il y a eu un effet N sur la cameline → On observe une bande beaucoup plus « verte » mais en revanche avec beaucoup plus d'adventices, beaucoup plus de maladie et la cameline est moins mature.



II. Gury



Parcelle semée en direct le 23/03/2018 en cranettes sèches (potentiel 60-70 q/ha en blé, 85t/ha de rendement en betterave).

Historique technique de la parcelle : précédent betteravare arrachées le 10/12. Apport de fientes de poule à 4t/ha (environ), puis semis d'une association orge de printemps /féveroles. Le jour du semis, la cameline a été semée sous couvert d'orge qui s'était bien développée, puis apport dans la foulée d'11/ha de round up pour détruire le couvert. Le couvert a bien été détruit, mais les deux passages (semis + herbicide) ont enfoui des graines d'orge présentes donc il y a eu des repousses d'orge. Apport de Select à 0.6l/ha le 21/04/2018.

➤ Observations générales :

Même si la parcelle est séchante, comme il y a eu de la pluie durant le printemps, la cameline s'est bien développée « *Pour moi globalement la cameline est satisfaisante, elle est plus haute que chez Philippe, elle s'en sort mieux* » (AV) ; « *Il y a moins de mildiou* » (CC).

Explication pour le mildiou : Il y plus d'N, la cameline a été plus compétitive vis à vis des adventices, donc la plante est moins stressée donc moins sensible au mildiou. « *Les maladies c'est des parasites de faiblesse* » (CC)

La pression adventice sur cette parcelle est beaucoup plus réduite que dans la parcelle en sable « *En tout cas en termes de désherbage c'est pas comparable* » (CC). Normalement, problème de ray-grass. Mais avec l'introduction de la betterave dans une rotation de cultures d'automne ça permet de réduire la pression adventice.

➤ Pour le traitement T4

Moins d'adventices que dans le site précédent. Mais l'équilibre pois/cameline est plutôt en faveur de la cameline. Perte de nombre de pieds liée au type de sol « *Comme c'est des terres limitantes en pois, est-ce qu'il y a eu un coup de sec à un moment donné ?* » (AV) ou aux ravageurs (sitones).

La bande est quand même hétérogène : il y a des zones où il y a pas mal de pois (à droite de la bande) → attention pour la récolte machine

➤ Pour le traitement T5

Dans cette parcelle l'équilibre entre la cameline et l'orge est respecté « *moi ça me plait bien, la culture principale reste la cameline, l'orge elle est en support et elle est pas trop compétitive* » (AV)

En comparant la zone avec de l'orge et la partie de la bande où l'orge a été détruit pas l'anti-graminée (cameline seule) on observe un effet dépressif de l'orge : la cameline est moins haute et moins verte : « on dirait que ça la freine un petit peu l'orge ». L'orge a sans doute prélevé de l'azote. En revanche la cameline dans le T4 est plus ressemblante à la partie cameline seule du T5 (sans « faim d'N »).



➤ Pour le traitement T1

Observation : le semis est régulier mais le nombre pied reste faible. L'implantation est réussie.

Quelles explications ? Profondeur de semis ? → A priori semis superficiel (1cm maximum, « on voyait des graines sur le sol »).

Proposition d'amélioration pour la technique de semis : « Si il y a de la pluie on pourrait facilement la semer à la volée » (AV) ou alors « Semer superficiel puis rouler » (PC) ; « Le petit coup de rouleau ça peut pas faire de mal » (AV)

Rmq HdS : comme j'ai semé en perpendiculaire, dans la double densité → il y a une meilleure levée.

➤ Pour le traitement T2

« Je ne vois pas de différence entre le T1 et le T2 » (AV)

À droite de la bande (côté du bois) il y a une zone plus verte → effet N organique ?

→ attention pour les prélèvements

➤ Autres remarques

1) Il y a une bande non désherbée, où la cameline a été semée dans l'asso orge/féveroles → la cameline n'a pas levée et l'orge n'a pas gelée

2) Une bande « double densité N » visible dans le traitement SD (ou effet MO ?) qui est visible : cameline plus verte et plus haute également

- 3) Discussion autour de l'N : L'apport d'N organique peut avoir un effet sur ces observations. Comme il y a eu un printemps chaud, il y a peut-être eu de la minéralisation rapide. « *Je pense qu'elle (la cameline) a besoin un petit peu au départ, bon il en faut pas de trop, mais pour lancer pour faire sa concurrence* » (HdS). En comparaison, on sort d'un automne pluvieux, avec un cumul de précipitation très importante concentré au début de l'année, donc dans les sables ça peut avoir lessivé fort. « *il y a peut-être un effet N incontestablement entre les deux parcelles* » (CC) ; « *Il y a peut-être 60-70U d'N* » (CC).
- 4) Une bande « adventice » témoin où il n'y a pas eu de semis de cameline = « *flore à colza* » (CC)
- 5) Au démarrage de la parcelle : une zone où il y a eu un apport d'N « accidentel » → visuellement la cameline est plus verte et plus haute, mais beaucoup d'adventices et plus de maladie ! c'est très visible.
- 6) Symptômes feuilles rouges : carences ? excès de calcaire ?



III. Autrêches



Parcelle semée le 23/03/2018 en cranettes
Patates il y a deux ans sur la parcelle

➤ Observations générales

De l'N a été apporté sur la moitié de l'essai (sauf sur le traitement en pois) un peu avant le 31/05/2018 : 40 unités partout.

NB : pour le T1 et T2 partie haute de la parcelle et pour le T3 et le T5 partie basse de la parcelle.

« *C'était peut-être un peu tard* » ; Aucune différence visuelle sur le couvert végétal. Ça aura peut-être un impact sur la qualité.

Globalement, la cameline est plus basse que sur le site de Gury

Explication : « *C'est l'azote au pied* » (AV)

Il y a plus de mildiou qu'à Amy « *C'est visuellement plus marquant que la première parcelle* » (CL)

La parcelle est globalement « propre » vis à vis des adventices.

➤ Pour le traitement T1

Pas mal de mercuriale, de chénopodes, même si ça ne dépasse pas et pas mal de mildiou. La cameline est plus dense en bordure (là où il a fait demi-tour).

➤ Pour le traitement T2

Dans ce traitement c'est beaucoup moins sale pour le T1.

Semis en croisé.

« *Mais c'est moins dru que l'année dernière* » (HdS)

« *On voit pas vraiment de différence de densité entre le T1 et le T2* » (MHJ)

➤ Pour le traitement T4

La cameline est vigoureuse « elle doit arriver à capter un peu d'N » (HdS)

L'équilibre entre les deux cultures est OK, pas beaucoup d'adventice.

« *Il faut avoir de la bonne terre pour faire de la cameline* » (PC)

→ c'est de la cranette plus profonde où on peut faire de la pomme de terre et de la betterave

➤ Pour le traitement T5

Il manque des pieds de cameline. La compétition reste importante.
Rendement à voir ? Car fort effet visuel.

➤ Pour le traitement T3

Il y a clairement beaucoup plus d'orge. « *Là tu vas commencer à récolter un peu d'orge* » (AV)
« *Là il faut la chercher (la cameline)* » (MHJ)

➤ Autres remarques :

1) Il faut travailler un peu l'apport d'N au démarrage.

Compte tenu des observations faites, il semblerait qu'un apport trop tardif ne bénéficie par à la culture (du point de vue agronomique, voir l'aspect qualité ?). Mais quand est ce qu'il faut apporter au démarrage : au semis (avec le risque de favoriser aussi les adventices)? au stade rosette ?

→ faire une expérimentation sur la date d'apport ? (HdS)

« *30 unités d'N à l'implantation comme le colza* » (CC)

« *Faut mettre tout en place dès le départ, faut qu'elle trouve systématiquement ce qu'elle veut, sans trop la surdoser* » (AV)

2) Le semis

Semis plus tardif sur la compétition avec les adventices ? → cf. plateforme

Le densité de semis (4kg/ha) trop faible ?

Quel taux de levée ? cf. résultat fourni par Vincent Vecten → pour raisonner la dose de semis, avoir une idée du taux de levée peut être important ! (« *Si tu sèmes à 6kg/ha tu te bases sur combien ? 80 ou 100 % ?* », CC)

Faire varier la densité de semis en fonction du type de sol (ex. dans les sables) → c'est ce qui se fait pour d'autres cultures.

La densité va également se raisonner vis à vis du coût des semences → calcul de marge important.

3) Association Vesce commune de printemps/Cameline

Dose : Vesce = 24kg/ha (pmg = 60g) (vs. 40 kg/ha en pure) et Cameline = 3.5 kg/ha

Mélange intéressant avec un équilibre satisfaisant entre les deux cultures. Il ne faut pas plus en densité sinon la cameline va se retrouver étouffer.

« *L'enherbement est vachement mieux qu'en cameline seule* » (CC)

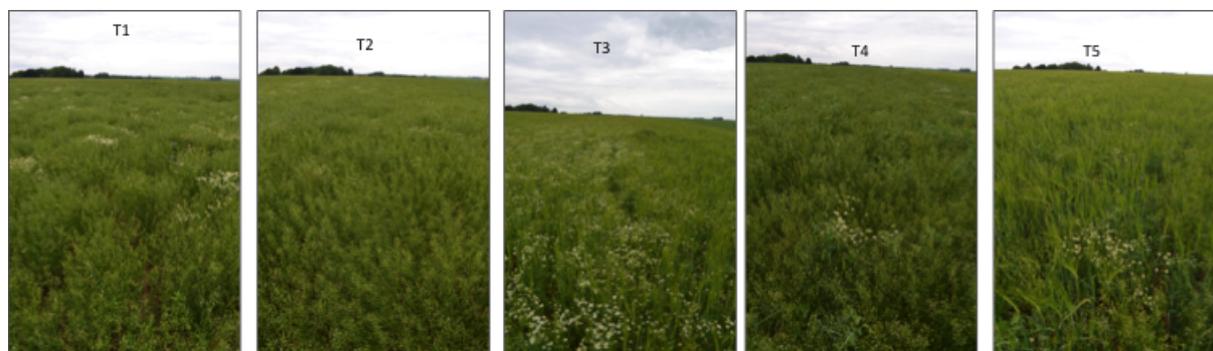
« *Moi je suis pour tester ça dans les sables* » (MHJ)

Autre proposition : faire une association cameline/févérole malgré les problèmes de bruches.

→ Faire des mesures de rendement dans cette partie ?



IV. Moulin sous Touvent



Parcelle semée le 23/03/2018 en limons

➤ Pour le traitement T1

Aspect moutonnant « *c'est pas jobard* ». Pas mal hétérogène.

En revanche, elle semble plus verte que la double densité → comme il y a moins de pied au m², la quantité d'N pour une plante est plus importante dans ce traitement.

➤ Pour le traitement T2

Ce traitement est beaucoup plus homogène avec moins d'adventices. En comparaison avec les autres sites, il commence à avoir un potentiel de rendement qui semble intéressant (nombre de siliques par plante important) malgré la présence de mildiou également sur cette parcelle. « *Le haut il y a plus rien* » (HdS)

Dès qu'on est sur des zones un peu moins couvertes on retrouve de la matricaire de manière importante (explication : la matricaire est favorisée par un sol humide en comparaison à l'année dernière → printemps sec).

➤ Pour le traitement T4

Par rapport aux autres sites, le pois est beaucoup moins présent « *Là il y a bien moins de pois* » (CC)

Hyp = problème lors du semis ? Battance ?

➤ Pour le traitement T5

« *C'est pas mal mais ça reste clair* », « *Tu risques d'être frustré sur les deux espèces en termes de rendement* »

Il y a un bon équilibre mais les deux sont clairs donc niveau rendement c'est sûrement pas satisfaisant.

➤ Pour le traitement T3

Plantes très petites... Présence très forte de matricaire. Encore plus qu'à Amy ?

« *On doit chercher la cameline* »

Hyp : Effet d'un produit sur la parcelle à côté, où l'on a observé un pois très petit

Il y a une bande où clairement il y a beaucoup de matricaire (là où les prélèvements ont été faits)



Liste des tables

Table 1. Composition de l'huile de cameline en comparaison avec trois autres cultures oléagineuses	33
Table 2. Exemple de la diversité des environnements expérimentés pour la cameline	35
Table 3. Exemples d'études s'intéressant à l'effet de différentes pratiques sur le rendement et la qualité des graines de cameline	37

CHAPITRE 1

Table 4. (a) Locations and soil types of the on-farm trials and (b) main climatic characteristics of the growing period for 2017 and for the reference climate (20-years period from 1996 to 2016)	59
Table 5. Description of the crop management options tested in 2017	60
Table 6. Description of the crop sequence prototypes designed during the workshop	63
Table 7. Knowledge gaps identified during the design processes	65
Table 8. Example of decision rules for the management of camelina based on farmer's observation	71

CHAPITRE 2

Table 9. Description of the nine environments of the experimental network. Each environment corresponds to a combination of a year, a location, a soil type and a cropping system	92
Table 10. Description of the four camelina crop management routes tested in the multi-environment trial, and the associated hypotheses related to weed control. In the three alternative crop management routes (DD, CB and CP), no herbicide was applied. For the intercrops (CB and CP), barley and pea respectively were sown at half of the advised rate.	94
Table 11. Description of the four models tested with the data to identify the significance of the environment and the crop management effects on total crop biomass, weed biomass and yields	96
Table 12. Akaike information criterion (AIC) for the four models tested (described in Table 3), for the total crop biomass and the weed biomass at two stages (flowering and maturity), and for camelina, pea and barley yields. For each variable studied, the lowest values, which correspond to the best model, are in bold. For barley and pea yields, only M1 and M3 were compared.	97

CHAPITRE 3

Table 13. Description and location of the thirty-nine experimental strips	116
Table 14. Results of the linear regression models between the quantitative and qualitative variables studied	122
Table 15. Relationship between yield, oil content, PUFA content, or ALA content and their candidate limiting factors estimated with model mixing method combined with bootstrap	125
Table 16. Parameter estimation, standard deviation and p-value of the four-factor linear model defined to explain the effect of environmental conditions and crop management routes on NNI ($R^2 = 0.69$)	128

CHAPITRE 4

Table 17. Description des dix modalités d'insertion de la cameline proposées par les agriculteurs lors de l'atelier.	150
Table 18. Exemple de la diversité des modalités de conduite conçues pour une même modalité d'insertion de la cameline	152

Liste des figures

Figure 1. Évolution de l'indicateur de diversité des assolements par commune entre 1970 et 2010 en France (source : Agreste).....	1
Figure 2. Principaux blocages à la diversification sur l'ensemble de la filière (d'après Meynard et al., 2018).....	4
Figure 3. Localisation du site de Venette et du bassin d'approvisionnement sur la carte des Petites Régions Naturelles (PRN) de l'ex-région Picardie (source : Gourdet et Godard, 2017).....	6
Figure 4. La cameline, une des cinq cultures oléagineuses candidates pour diversifier l'approvisionnement de la bioraffinerie.	7
Figure 5. Schéma de synthèse de la théorie C-K (d'après Le Masson and McMahon (2016)).....	20
Figure 6. Cycle de développement de la cameline. Source photos : M. Leclère.....	32
Figure 7. Diversité des débouchés de l'huile, du tourteau et des résidus de culture de cameline.	34
Figure 8. Schéma de la démarche générale : une approche participative et multi-acteurs articulant conception, test au champ et échanges collectifs.....	46

CHAPITRE 1

Figure 9. A participatory design approach to produce actionable knowledge and identify knowledge gaps.....	57
Figure 10. Camelina management options designed during the workshop : Camelina as second crop after barley as relay crop (a) and double crop (b).	67
Figure 11. Farmers' qualitative appraisal of the on-farm trials (Light grey = satisfactory, Dark grey = satisfactory but with some concerns, Black: unsatisfactory, NA: Non-assessed).	69
Figure 12. Camelina yields measured in the on-farm trials.....	72

PRÉAMBULE AUX CHAPITRES 2 ET 3

Figure 13. Schéma du raisonnement de conception des modalités testées au sein du réseau multi-local et pluriannuel.....	82
Figure 14. Principaux éléments de l'itinéraire technique des cinq modalités testées dans le cadre du réseau multi-local et pluriannuel et hypothèses associées.	83

CHAPITRE 2

Figure 15. Monthly rainfall (in mm) and monthly mean temperatures (in °C) during the growing season of camelina for 2017, 2018 and the 20-year reference period (1996-2016).	93
Figure 16. Average (triangle), median (bold black line), 25th and 75th percentiles (black fine line) of the total crop biomass (g.m ⁻²) for the four camelina crop management routes at flowering and maturity.....	98
Figure 17. (a) Average (triangle), median (bold black line), 25th and 75th percentiles (fine black line) of the weed biomass (g.m ⁻²) and outliers (small black point) for the four camelina crop management routes at flowering and maturity, and (b) weed biomass for each environment and crop management route at flowering and maturity.....	99
Figure 18. Weed biomass related to the total crop biomass (g.m ⁻²) at harvest in which situations are characterised by the crop management route, the year, and the "soil type by tillage system by crop rotation length" combination.....	101

Figure 19. (a) Average (triangle), median (bold black line), 25th and 75th percentiles (black fine line) for the camelina, pea and barley yields (kg.ha⁻¹) for the four camelina crop management routes, and (b) camelina, pea and barley yields for each environment and crop management route.102

CHAPITRE 3

Figure 20. a) Symptoms of downy mildew observed on camelina at the end of flowering in 2018 (Location: Gury), and b) opening of pods due to hailstorm in 2017 (Location: Rethondes).....119

Figure 21. Camelina yield (in kg ha⁻¹) and oil, protein, PUFA, MUFA, ALA, and LA contents (in %) in camelina seeds across the experimental network: relationships between (a) camelina plot yield and oil content, (b) oil and protein content, (c) PUFA and MUFA content, and (d) ALA and LA content.123

Figure 22. Camelina yield (in kg ha⁻¹) as a function of Nitrogen Nutrition Index of camelina at flowering (NNI, unitless) and pod loss due to mildew (in %).126

Figure 23. Linolenic content (in %) as a function of grain filling duration (in °Cd) and high temperatures.126

Figure 24. Nitrogen Nutrition Index (NNI) as a function of the amount of uptake nitrogen by the intercrop species at flowering stage (NDFS in kgN ha⁻¹) and the total nitrogen available in soil (Nsoil in kg N ha⁻¹).128

CHAPITRE 4

Figure 25 : Exemple de retranscription de la fiche culture d'une proposition d'insertion de la cameline en double culture après de l'orge d'hiver.144

Figure 26 : Exemple des deux choix de formalisation pour représenter les connaissances lors du partage de connaissances. (a) Relation entre la biomasse adventice et la biomasse cultivée à la récolte, illustrée par des photographies et (b) Tableau d'évaluation qualitative des essais agriculteurs, explicité par des citations d'agriculteurs.146

Figure 27 : Schémas fonctionnels construits à partir des résultats (a) du réseau multi-local et pluriannuel et (b) des essais agriculteurs-expérimentateurs.148

Figure 28 : Arbre d'exploration représentant les modalités conçues lors de l'atelier de conception (en rouge) et de l'atelier de réflexion multi-acteurs.151

DISCUSSION GÉNÉRALE

Figure 29 : Co-conception de cinq modalités d'insertion de la cameline à partir d'une proposition initiale faites par des agriculteurs.174

Titre : Introduire une espèce de diversification dans les systèmes de culture d'un territoire : articuler production de connaissances et conception dans des dispositifs multi-acteurs. Cas de la cameline dans l'Oise.

Mots clés : Transition agroécologique ; Cultures mineures ; *Camelina sativa* ; Bioraffinerie ; Recherche participative ; Essais en ferme

Résumé : L'introduction d'espèces de diversification, voie incontournable pour assurer la transition agroécologique, pose aujourd'hui une question majeure : comment produire de manière économe les connaissances nécessaires sur ces espèces orphelines de recherche ?

Nous avons proposé et mis en œuvre une démarche articulant production de connaissances et conception, et combinant différents dispositifs multi-acteurs, pour accompagner l'introduction d'une nouvelle espèce dans les systèmes de culture. Ce travail s'appuie sur le cas de la cameline, introduite soit en culture principale soit en double culture dans les systèmes de culture de l'Oise, en vue du développement d'une bioraffinerie oléagineuse. Nous avons d'abord articulé un atelier multi-acteurs -regroupant agriculteurs, conseillers, chercheurs, ingénieurs en R&D agricole et industriels- et des essais de modalités de conduite de la cameline en double culture, conçus, gérés et évalués par des agriculteurs dans leur ferme. Cette approche a permis d'identifier des trous de connaissances et de produire des connaissances utiles pour la conception (ex : des règles de décision pour la conduite de la cameline). En parallèle, nous (chercheurs) avons conçu et évalué, au sein d'un réseau multi-local et pluriannuel de parcelles agricoles, trois itinéraires techniques de la cameline de printemps sans herbicide, en comparaison à l'itinéraire technique classiquement recommandé.

Nos résultats montrent que l'augmentation de la densité de semis de cameline ou l'association de la cameline avec une autre espèce (orge ou pois) sont des leviers agroécologiques efficaces pour maîtriser les adventices dans la culture de cameline. De plus, le diagnostic de la variabilité du rendement, de la teneur en huile des graines, et de leur composition en acides gras, réalisé au sein de ce même réseau d'essais, a permis d'identifier (i) les principaux facteurs responsables (ex : le statut azoté de la culture pour le rendement), et (ii) les conditions environnementales (ex : fourniture d'azote minéral par le sol) et les pratiques (ex : association d'espèces) déterminant ces facteurs. La formalisation de ces connaissances, leur confrontation à la littérature scientifique, ainsi que leur partage et leur mise en discussion au cours de différents dispositifs d'échanges multi-acteurs au champ et en salle ont conduit à élargir la gamme des modalités d'insertion et de conduite de la cameline, conçues par les agriculteurs et adaptées à leurs conditions individuelles, lors d'un atelier de conception.

Enfin, nous discutons en quoi cette combinaison originale de dispositifs multi-acteurs, permet (i) de produire à moindre coût des connaissances situées et génériques, utiles pour la conception, et (ii) d'outiller à la fois l'agriculteur-concepteur, le conseiller agricole et le chercheur, pour accompagner la diversification des systèmes de culture d'une région.

Title: Introducing diversifying species into the cropping systems of a territory: combining knowledge production and design within multi-stakeholders platforms. Application to the case study of camelina in the Oise department.

Keywords : Agroecological transition ; Minor crops ; *Camelina sativa* ; Biorefinery ; Participatory action research ; On-farm research

Abstract: Crop diversification, a way to ensure agroecological transition, raises a major question: how to produce, at low cost, knowledge on these minor species, usually poorly studied by agronomic research?

We proposed and implemented an approach combining knowledge production and design, within several multi-stakeholders platforms, to support the introduction of new species into cropping systems. The case study of camelina, introduced either as a main crop or as a second crop in the cropping systems of the Oise department, was used, in the context of the development of a local oilseed biorefinery. First, we combined a multi-stakeholders workshop - gathering farmers, advisors, researchers, agronomist from agricultural R&D and industrials - with on-farm trials on camelina crop management routes as second crop. These crop management routes were designed, managed and appraised by farmers themselves. This approach made it possible to identify knowledge gaps and to produce knowledge useful for design (e.g. decision rules to manage camelina). In parallel, we (researchers) designed and assessed, within an on-farm trial

network, three herbicide-free crop management routes for spring camelina. Our results show that increasing camelina sowing rates or intercropping camelina with another species (barley or peas) were effective agroecological ways to control weeds in camelina crop. In addition, the diagnosis of the variability of yield, oil seed content, and fatty acid composition, carried out within the same experimental network, made it possible to identify (i) the main explaining factors (e.g. nitrogen status of the crop for yield), and (ii) environmental conditions (e.g. supply of mineral nitrogen from the soil) and practices (e.g. species intercropping) determining these factors. This knowledge production led, during a design workshop, to broaden the range of modalities of introduction and management of camelina designed by farmers. Finally, we discuss how this original combination of multi-stakeholders platforms makes it possible (i) to produce at low cost located and generic knowledge, useful for design, and (ii) to provide tools to designer-farmers, agricultural advisors and researchers to support crop diversification within a territory.

