



HAL
open science

Contribution à la conception et l'évaluation de systèmes agricoles diversifiés, durables et résilients

Matthieu Carof

► **To cite this version:**

Matthieu Carof. Contribution à la conception et l'évaluation de systèmes agricoles diversifiés, durables et résilients. Agronomie. Université de Rennes, 2023. tel-04098570

HAL Id: tel-04098570

<https://hal.inrae.fr/tel-04098570>

Submitted on 16 May 2023

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

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



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

Contribution à la conception et l'évaluation de systèmes agricoles diversifiés, durables et résilients

Mémoire soutenu le 9 mai 2023 pour obtenir le diplôme
d'**Habilitation à Diriger des Recherches**

par

Matthieu CAROF

Composition du jury :

Présidente :

Anne-Marie Cortesero Professeure Université de Rennes

Rapporteurs :

Caroline Halde Professeure Université Laval

Guillaume Martin Directeur de recherche INRAE

Lorène Prost Directrice de recherche INRAE

Membres du jury :

Anne Le Ralec Professeure L'Institut Agro

Aurélie Metay Professeure L'Institut Agro

Avant-propos

Merci à toutes les personnes dont le nom apparaît dans mon *curriculum vitae* : autant que moi, ils ont permis la réalisation des travaux nécessaires à ce mémoire.

Merci aux collègues qui m'ont apporté leur soutien lors de la rédaction de ce document : Olivier Godinot, Anne Laperche, Edith Le Cadre, Aude Ridier.

Merci tout particulièrement à Philippe Leterme et Valérie Viaud pour les relectures et conseils avisés qu'ils m'ont apportés.

La science dit le premier mot sur tout, le dernier mot sur rien.
Victor Hugo, Post-scriptum de ma vie – L'Âme

Table des matières

Curriculum vitæ	7
Bilan des activités de recherche 2003 – 2022	23
1. Introduction.....	25
1.1. Conception et évaluation multicritère : définitions	25
1.1. Objets étudiés, questions abordées	29
1.2. Axes de recherche pour la conception et l'évaluation de systèmes diversifiés	34
2. Apports méthodologiques pour la conception et l'évaluation multicritère.....	37
2.1. Comment mieux évaluer les systèmes à bas niveaux d'intrants ?.....	37
2.2. Comment comparer plus justement des systèmes entre eux ?	40
2.3. Comment intégrer la diversité des systèmes dans un modèle bioéconomique ?.	45
2.4. Conclusion du chapitre	48
3. Connaissances nouvelles sur les systèmes de culture.....	49
3.1. Des pistes techniques et économiques pour favoriser la diversité cultivée.....	49
3.2. La complémentarité des productions, une solution imparfaite pour accroître l'autonomie protéique du Grand Ouest.....	59
3.3. Des systèmes avec cultures associées prometteurs, mais à améliorer	61
3.4. Conclusion du chapitre	62
4. La formation, l'autre moitié de mon temps de travail	64
Projet scientifique	67
1. Faciliter les réflexions scientifiques sur la conception de systèmes agricoles	69
2. Prendre en compte le temps long pour concevoir des systèmes de culture diversifiés, durables et résilients	71
2.1. Le temps long pour la conception	72
2.2. Les différents pas de temps pour l'évaluation	77
2.3. Conclusion.....	79
Références bibliographiques	80

Curriculum vitæ

Matthieu Carof

matthieu.carof@agrocampus-ouest.fr

Maître de conférences à l'Institut Agro (CNECA¹ n° 5)

Nationalité française

EXPERIENCES PROFESSIONNELLES

Depuis Janvier 2010	Maître de conférences en agronomie à l'Institut Agro
Septembre 2007 à décembre 2009	Enseignant-chercheur en agronomie au Groupe ESA ²
Mars 2007 à juillet 2007	Chercheur post-doctorant au GEVES ³
Novembre 2006 à février 2007	Maître de conférences contractuel à AgroParisTech
Octobre 2003 à septembre 2006	Doctorant dans l'UMR Agronomie INRA/INA P-G ⁴
De 1997 à 2000	Plusieurs contrats à durée déterminée (aide d'exploitation) Station expérimentale Vert-Marine, réseau Astria

DIPLOMES POST-BAC

2006	Diplôme de Docteur de l'INA P-G (mention Très honorable) Thèse sous la direction de Stéphane de Tourdonnet (encadrant) et Jean Roger-Estrade (directeur de thèse) Allocataire de recherche du Ministère chargé de la Recherche
2003	Diplôme d'Ingénieur de l'INA P-G DEA ⁵ <i>Adaptation des plantes aux contraintes</i> de l'INA P-G (mention Bien)
2000	DUT, Génie Biologique, option Agronomie, IUT ⁶ de Brest

¹ CNECA, Commission Nationale des Enseignants-Chercheurs relevant du ministre chargé de l'Agriculture

² ESA, École Supérieure d'Agriculture d'Angers

³ GEVES, Groupement d'Etude et de contrôle des Variétés et des Semences

⁴ UMR, Unité Mixte de Recherche ; INRA, Institut National de la Recherche Agronomique ; INA P-G, Institut National Agronomique Paris-Grignon

⁵ DEA, Diplôme d'Etudes Approfondies

⁶ DUT, Diplôme Universitaire de Technologie ; IUT, Institut Universitaire de Technologie

FORMATIONS COMPLEMENTAIRES

2022	Formation de sauveteur secouriste du travail (2 jours)
2021	Formation à la « préparation et accompagnement à l'encadrement des doctorant.e.s » (1 jour)
2020	Formation sur « l'écoute au service de la relation : mettre en place la communication bienveillante en milieu professionnel au service du travail en équipe » (2 jours)
2019	Formation sur « la modélisation, un outil pour l'accompagnement de la conception de systèmes agricoles à l'échelle de territoires associant cultures et élevage » (2 jours)
2012	Formation des enseignants-chercheurs du Ministère en charge de l'agriculture à la pédagogie (17 jours)

PUBLICATIONS

Articles – Revues scientifiques à comité de lecture (IF selon JCR⁷ 2021)

Carof, M., Godinot, O., Le Cadre E., 2022. Biodiversity-based cropping systems: A long-term perspective is necessary. *Science of The Total Environment*, 838, 156022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156022>. IF: 10.753

Jouan, J., **Carof, M.**, Baccar, R., Bareille, N., Bastian, S., Brogna, D., Burgio, G., Couvreur, S., Cupial, M., Dufrêne, M., Dumont, B., Gontier, P., Jacquot, A.-L., Kanski, J., Magagnoli, S., Makulka, J., Pérès, G., Pérès, G., Ridier, A., Salou, T., Sgolastra, F., Szelag-Sikora, A., Tabor, S., Tombarkiewicz, B., Weglarz, A., Godinot, O., 2021. A dataset for sustainability assessment of agroecological practices in a crop-livestock farming system. *Data in Brief*, 36, 107078. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.107078>

Jouan, J., **Carof, M.**, Baccar, R., Bareille, N., Bastian, S., Brogna, D., Burgio, G., Couvreur, S., Cupial, M., Dufrêne, M., Dumont, B., Gontier, P., Jacquot, A.-L., Kanski, J., Magagnoli, S., Makulka, J., Pérès, G., Pérès, G., Ridier, A., Salou, T., Sgolastra, F., Szelag-Sikora, A., Tabor, S., Tombarkiewicz, B., Weglarz, A., Godinot, O., 2021. SEGAE: An online serious game to learn agroecology. *Agricultural Systems*, 191, 103145. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103145>. IF: 6.765

Jouan, J., **Carof, M.**, Godinot, O., 2021. SEGAE : un jeu sérieux pour enseigner l'agroécologie. *Fourrages*, 246, 1–9. IF: 0.193

Godinot, O., Vertès, F., Leterme, P., **Carof, M.**, 2020. Nouveaux indicateurs d'efficience de l'azote à l'échelle de l'exploitation. *Fourrages*, 241, 45–56. IF: 0.193

Jouan, J., De Graeuwe, M., **Carof, M.**, Baccar, R., Bareille, N., Bastian, S., Brogna, D., Burgio, G., Couvreur, S., Cupial, M., Dumont, B., Jacquot, A.-L., Magagnoli, S., Makulka, J.,

⁷ IF, Impact Factor ; JCR, Journal Citation Reports

- Maréchal, K., Pérès, G., Ridier, A., Salou, T., Tombarkiewicz, B., Sgolastra, F., Godinot, O., 2020. Learning interdisciplinarity and systems approaches in agroecology: experience with the serious game SEGAE. *Sustainability*, 12, 4351. <https://doi.org/10.3390/su12114351>. IF: 3.889
- Jouan, J., Ridier, A., **Carof, M.**, 2020. Legume production and use in feed: analysis of levers to improve protein self-sufficiency from foresight scenarios. *Journal of Cleaner Production*, 274, 123085. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123085>. IF: 11.072
- Jouan, J., Ridier, A., **Carof, M.**, 2020. SYNERGY: A regional bio-economic model analyzing farm-to-farm exchanges and legume production to enhance agricultural sustainability. *Ecological Economics*, 175, 106688. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106688>. IF: 6.536
- Carof, M.**, Godinot, O., Ridier, A., 2019. Diversity of protein-crop management in western France. *Agronomy for Sustainable Development*, 39, 15. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0561-7>. IF: 7.832
- Jouan, J., Ridier, A., **Carof, M.**, 2019. Economic drivers of legume production: approached via opportunity costs and transaction costs. *Sustainability*, 11, 705. <https://doi.org/10.3390/su11030705>. IF: 3.889
- Carof, M.**, Godinot, O., 2018. A free online tool to calculate three nitrogen-related indicators for farming systems. *Agricultural Systems*, 162, 28–33. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.01.015>. IF: 6.765
- Carof, M.**, Godinot, O., 2018. Survey data from 38 integrated crop-livestock farming systems in western France. *Data in Brief*, 18, 723–726. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.03.066>
- Carof, M.**, Laperche, A., Cannavo, P., Menasseri, S., Godinot, O., Jubault, M., Manzaneres-Dauleux, M., Guenon, R., Jaffrezic, A., Pérès, G., Le Cadre, E., 2018. Valorisation des interactions plante-sol pour la nutrition et la santé des plantes. *Innovations Agronomiques*, 69, 71–82. <https://doi.org/10.15454/D8RT59>
- Legrand, F., Picot, A., Cobo-Díaz, J.F., **Carof, M.**, Chen, W., Le Floch, G., 2018. Effect of tillage and static abiotic soil properties on microbial diversity. *Applied Soil Ecology*, 132, 135–145. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.08.016>. IF: 5.509
- Godinot, O., Leterme, P., Vertès, F., **Carof, M.**, 2016. Indicators to evaluate agricultural nitrogen efficiency of the 27 member states of the European Union. *Ecological Indicators*, 66, 612–622. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.02.007>. IF: 6.263
- Carof, M.**, Raimbault, J., Merrien, A., Leterme, P., 2015. Survey of 47 oilseed flax (*Linum usitatissimum* L.) growers to identify ways to expand its cultivation in France. *OCL*, 22, 1–14. <https://doi.org/10.1051/ocl/2015043>
- Godinot, O., Leterme, P., Vertès, F., Faverdin, P., **Carof, M.**, 2015. Relative nitrogen efficiency, a new indicator to assess crop livestock farming systems. *Agronomy for Sustainable Development*, 35, 857–868. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0281-6>. IF: 7.832
- Godinot, O., **Carof, M.**, Vertès, F., Leterme, P., 2014. SyNE: An improved indicator to assess nitrogen efficiency of farming systems. *Agricultural Systems*, 127, 41–52. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2014.01.003>. IF: 6.765

- Naudin, C., **Carof, M.**, Celette, F., Mawois, M., Aveline, A., 2014. Former pour accompagner l'innovation et son évaluation en agriculture : valorisation d'expertises acquises en recherche au service de la formation en agronomie. *Fourrages*, 217, 91–99. IF: 0.193
- Carof, M.**, Colomb, B., Aveline, A., 2013. A guide for choosing the most appropriate method for multi-criteria assessment of agricultural systems according to decision-makers' expectations. *Agricultural Systems*, 115, 51–62. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2012.09.011>. IF: 6.765
- Carof, M.**, Marie, M., Pavie, J., 2013. Quels outils pour évaluer des systèmes fourragers adaptés au changement climatique ? *Fourrages*, 215, 257–264. IF: 0.193
- Colomb, B., **Carof, M.**, Aveline, A., Bergez, J.-E., 2013. Stockless organic farming: strengths and weaknesses evidenced by a multicriteria sustainability assessment model. *Agronomy for Sustainable Development*, 33, 593–608. <https://doi.org/10.1007/s13593-012-0126-5>. IF: 7.832
- Merrien, A., Arjauré, G., **Carof, M.**, Leterme, P., 2013. Freins et motivations à la diversification des cultures dans les exploitations agricoles : étude de cas en Vendée. *OCL*, 20, 1–6. <https://doi.org/10.1051/ocl/2013009>
- Fontaine, L., Fourrié, L., Garnier, J.-F., Mangin, M., Colomb, B., **Carof, M.**, Aveline, A., Prieur, L., Quirin, T., Chareyron, B., Maurice, R., Glachant, C., Gouraud, J.-P., 2012. Connaître, caractériser et évaluer les rotations en systèmes de grandes cultures biologiques. *Innovations Agronomiques* 25, 27–40.
- Carof, M.**, de Tourdonnet, S., Coquet, Y., Hallaire, V., Roger-Estrade, J., 2007. Hydraulic conductivity and porosity under conventional and no-tillage and the effect of three species of cover crop in northern France. *Soil Use and Management*, 23, 230–237. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2007.00085.x>. IF: 3.672
- Carof, M.**, de Tourdonnet, S., Saulas, P., Le Floch, D., Roger-Estrade, J., 2007. Undersowing wheat with different living mulches in a no-till system. I. Yield analysis. *Agronomy for Sustainable Development*, 27, 347–356. <https://doi.org/10.1051/agro:2007016>. IF: 7.832
- Carof, M.**, de Tourdonnet, S., Saulas, P., Le Floch, D., Roger-Estrade, J., 2007. Undersowing wheat with different living mulches in a no-till system. II. Competition for light and nitrogen. *Agronomy for Sustainable Development*, 27, 357–365. <https://doi.org/10.1051/agro:2007017>. IF: 7.832

Chapitres d'ouvrages

- Laperche, A., Jubault, M., Manzanares-Dauleux, M., **Carof, M.**, Le Cadre, E., 2022. Développer des espèces et des variétés permettant la reconception des systèmes de culture. *In* Zéro pesticide. Un nouveau paradigme de recherche pour une agriculture durable, Jacquet, F., Jeuffroy, M.-H., Jouan, J., Le Cadre, E., Malausa, T., Reboud, X., Huyghe, C. (eds), 149–175. Éditions Quae.

Rapports diplômants

- Carof, M., 2006. Fonctionnement de peuplements en semis direct associant du blé tendre d'hiver (*Triticum aestivum* L.) à différentes plantes de couverture en climat tempéré. Thèse de doctorat, INA P-G. <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-00338817/>

Carof, M., 2003. Diagnostic de l'impact des systèmes de culture sous couverture végétale sur le fonctionnement de l'agrosystème et sur la production : importance de la nature des espèces cultivées et de couverture. DEA, INA P-G.

Carof, M., 2000. Influence des thrips sur le développement des points noirs de l'artichaut (*Cynara scolymus* L). DUT, IUT de Brest.

Communication dans des conférences internationales⁸

Babin, C., Godinot, O., Auberger, J., **Carof, M.**, 2022. A method to evaluate the sustainability and resilience of grass-based dairy farms in Brittany. *In* Diversification & digitalisation – Trends that shape future agriculture, XVII ESA Congress, Potsdam (Germany), 356-357.

Geffroy, K., Auberger, J., Busnot, S., **Carof, M.**, Jacquot, A.-L., Novak, S., Parnaudeau, V., et al., 2022. A multicriteria method to evaluate the resilience of grass-based dairy farms to climate change in Brittany. *In* Grassland at the heart of circular and sustainable food systems, 29th EGF general meeting, Caen (France), 400-402.

Carof, M., Bourdin, L., Godinot, O., Le Cadre, E. 2020. A conceptual model to link crop diversification with ecosystem services. *In* Smart agriculture for great human challenges, XVI ESA Congress, Sevilla (Spain), 69.

Jouan, J., **Carof, M.**, Baccar, R., Burgio, G., Dumont, B., Jacquot, A.-L., Makulska, J., Pères, G., Salou, T., Godinot, O., 2020. Conception and test of an interdisciplinary serious game to learn agroecology ». *In* Smart agriculture for great human challenges, XVI ESA Congress, Sevilla (Spain), 51.

Jouan, J., **Carof, M.**, Ridier, A., 2018. SYNERGY: A bio economic model assessing the economic and environmental impacts of increased regional protein self-sufficiency. *In* Book of abstracts, 166th EAAE seminar on sustainability in the agri-food sector, Galway (Ireland). <https://doi.org/10.22004/agg.econ.276191>

Jouan, J., **Carof, M.**, Ridier, A., 2018. SYNERGY: A model to assess the economic and environmental impacts of increasing regional protein self-sufficiency. *In* Proceedings of the 20th N workshop – Coupling C-N-P-S cycles, 20th N workshop, Rennes (France), 113-114.

Joannon, A., **Carof, M.**, Cotinet, P., Dupont, A., Guezengar, A., Heddadj, D., Lubac, S., et al., 2017. Organic cropping systems tend to be more sustainable than low-input ones - A case study in Brittany, France. *In* Scientific track, 19th Organic World Congress, New Delhi (India), 103-106.

Jouan, J., **Carof, M.**, Ridier, A., 2017. Upscaling bio-economic model: Economic and environmental assessment of introducing legume and protein rich crops in farming systems of Western France. *In* Towards sustainable agri-food systems: balancing between markets and society, XV EAAE Congress, Parma (Italy).

Godinot, O., Leterme, P., Vertès, F., **Carof, M.**, 2015. Indicators for the evaluation of nitrogen efficiency and nitrogen balance in agriculture for 27 member states of the European Union. *In* Multi-functional farming systems in a changing world, 5th ISFSD, Montpellier (France), 215-216.

⁸ S'il s'agit d'une communication orale, le nom du présentateur est souligné.

- Fontaine, L., Fourrié, L., Garnier, J.-F., Colomb, B., **Carof, M.**, Aveline, A., 2014. Knowing, characterizing and assessing systems of organic crop rotations. *In* 4th ISOFAR science track, 18th Organic World Congress, Istanbul (Turkey), 315–318.
- Godinot, O., **Carof, M.**, Vertès, F., Leterme, P., 2014. Developing a tool to compare nitrogen use efficiency of diversified farming systems. *In* The nitrogen challenge: Building a blueprint for nitrogen use efficiency and food security, 18th N Workshop, Lisbon (Portugal), 103–104.
- Godinot, O., **Carof, M.**, Vertès, F., Leterme, P., 2013. Developing a new indicator to assess nitrogen efficiency of various farming systems. *In* New challenges facing animal production for diversified territories, market demands and social expectations – Book of abstracts, 64th EAAP annual meeting, Nantes (France), 425.
- Naudin, C., **Carof, M.**, Celette, F., Mawois, M., Aveline, A., 2012. Valoriser l'expertise acquise en recherche pour enseigner l'évaluation multicritère de systèmes de culture en agronomie. *In* Quelle université pour demain ?, Congrès 2012 de l'AIPU, Trois-Rivières (Québec), 565–566.
- Aveline, A., **Carof, M.**, Morvan, T., Denis, E., de Marguerye, A., 2010. How can farmers be assisted when adapting to low-input management of their cropping systems? *In* Agro2010, XI ESA Congress, Montpellier (France).
- Carof, M.**, Bresson, L.-M., Coquet, Y., Hallaire, V., Le Floch, D., de Tourdonnet, S., Roger-Estrade, J., 2006. Changes over time in soil structural porosity under various tillage and living cover crop management systems. Consequences for soil water transfers. *In* Sustainability – Its impact on soil management and environment, ISTRO 17th triennial conference, Kiel (Germany), 1527–1534.
- Carof, M.**, de Tourdonnet, S., Roger-Estrade, J., 2005. Changes of structural porosity due to climatic and biological activities under no-till cropping systems with permanent living cover crops: Impacts on soil hydrodynamics properties. *In* Linking production, livelihoods and conservation – Proceedings, 3rd WCCA, Nairobi (Kenya).
- Carof, M.**, de Tourdonnet, S., Saulas, P., Roger-Estrade, J., 2005. Agronomic diagnosis of no-till cropping systems with permanent living cover crop in France: Effects on winter wheat (*Triticum aestivum* L.) production. *In* Linking production, livelihoods and conservation – Proceedings, 3rd WCCA, Nairobi (Kenya).
- de Tourdonnet, S., **Carof, M.**, Saulas, P. 2003. A contribution to the development of cropping systems with permanent cover crop in open fields in France. *In* Proceedings of the 2nd WCCA, 2nd WCCA, Iguassu Falls (Brazil), 262–265.

Communication dans des conférences francophones

- Godinot, O., Ridier, A., Le Cozler, Y., **Carof, M.**, 2022. Évaluation de l'intérêt pédagogique du jeu sérieux SEGAE pour la formation initiale d'ingénieurs agronomes à l'agroécologie. *In* Premières Journées GAMAE, Clermont-Ferrand (France).
- Jouan, J., Ridier, A., **Carof, M.**, 2021. La production de légumineuses et leur utilisation en alimentation animale : analyse de leviers pour améliorer l'autonomie protéique définis à partir de scénarios prospectifs. *In* 3^{ème} édition des RFL, Angers (France).

- Jouan, J., Ridier, A., **Carof, M.**, 2018. Déterminants économiques de la production de légumineuses : approche par les coûts d'opportunité et les coûts de transaction. *In* 12^{èmes} JRSS, Nantes (France), E64.
- Jouan, J., Ridier, A., **Carof, M.**, 2018. Déterminants économiques du développement des légumineuses dans les systèmes de production agricole : approche par les coûts d'opportunité et les coûts de transaction. *In* Livre des Résumés, 2^{ème} édition des RFL, Toulouse (France), 100–101.
- Jouan, J., Ridier, A., **Carof, M.**, 2018. SYNERGY: A bioeconomic model to assess the impacts of increased protein self-sufficiency through farm-to-farm exchanges. *In* 12^{èmes} JRSS, Nantes (France), B43.
- Carof, M.**, Ridier, A., 2016. Comprendre les pratiques des agriculteurs du Grand Ouest produisant des protéagineux à graines pour diffuser et améliorer leurs itinéraires techniques. *In* Des légumineuses pour l'élevage. Quels défis & quels enjeux pour le Grand Ouest ?, Colloque organisé par l'AAF, AGROCAMPUS OUEST et le GIS "Élevages Demain", Rennes (France). <https://hal.inrae.fr/hal-02796078>
- Carof, M.**, Marie, M., Pavie, J., 2013. Quels outils pour évaluer des systèmes fourragers adaptés au changement climatique ? *In* Le changement climatique : incertitudes et opportunités pour les prairies et les systèmes fourragers – Actes des journées professionnelles, Journées professionnelles 2013 de l'AFPF, Paris (France), 165–174.
- Carof, M.**, Le Cozler, Y., 2011. Choisir un outil adapté à ses enjeux : un certain regard sur l'utilisation des outils d'évaluation. L'utilisateur en production végétale et le néophyte. *In* Méthodes et outils d'évaluation de la durabilité des productions animales : pour quoi ? pour qui ? comment ? – Actes du colloque, Séminaire AVIBIO, Angers (France), 47–51.
- Colomb, B., Fontaine, L., Glandières, A., Aveline, A., **Carof, M.**, Celette, F., Craheix, D., et al., 2011. Une approche de la durabilité des systèmes de grandes cultures biologiques spécialisés. *In* Les transversalités de l'agriculture biologique, Colloque 2011 de la SFER, Strasbourg (France).
- Colomb, B., Aveline, A., **Carof, M.**, Fontaine, L., Glandières, A., Prieur, L., Craheix, D., 2010. Appropriation et adaptation de MASC par des conseillers agricoles pour l'évaluation de systèmes de culture biologiques. *In* Le modèle MASC et ses utilisations pour l'évaluation de la durabilité des systèmes de culture – Programme et résumés, Séminaire MASC, Paris (France), 13–14.
- Colomb, B., Glandières, A., Aveline, A., **Carof, M.**, Fontaine, L., Craheix, D., 2010. L'évaluation multicritère qualitative des systèmes de grandes cultures. Appropriation du modèle MASC par des conseillers agricoles pour le repérage des systèmes de cultures biologiques innovants. *In* Conseil en agriculture, Colloque 2010 de la SFER, Dijon (France).

ENCADREMENT SCIENTIFIQUE

Étudiants en thèse

2020	Julia Jouan (directrice de thèse : Aude Ridier) <i>Valorisation économique et environnementale des complémentarités culture-élevage à travers la production locale de légumineuses : approche par modélisation de l'Ouest de la France</i>
2014	Olivier Godinot (directeur de thèse : Philippe Leterme) <i>Proposition de nouveaux indicateurs d'efficience d'utilisation de l'azote à l'échelle du système de production agricole et du territoire</i>

Chercheurs post-doctoraux, chargés de mission

2019-20	Julia Jouan, Dr (durée : 7 mois ; co-encadrant) Thibault Salou, Dr (durée : 6 mois ; co-encadrant) <i>Projet « SERious Game in AgroEcology (SEGAE): Development of a serious game for digital learning of agroecology in Europe »</i>
2016	Ambroise Garnier, ingénieur (durée : 6 mois ; co-encadrant) <i>Projet « Mise au point d'un tableau de bord pour piloter la transition des exploitations agricoles vers l'agriculture écologiquement intensive »</i>
2015	Pauline Cuenin, ingénieur (durée : 4 mois ; encadrant principal) <i>Projet « SecuriProt : Sécuriser et augmenter la production de Protéagineux grains destinés à l'alimentation animale »</i>
2013-14	Pascaline Moreau, Dr (durée : 1 an ; encadrant principal) <i>Projet « État des lieux des connaissances et outils disponibles permettant de modéliser les fuites d'azote et d'évaluer l'impact des pratiques agricoles et des structures de paysage sur la qualité de l'eau des bassins versants »</i>

Étudiants en stage de fin d'études

2022	Corentin Babin, master <i>Biologie, agrosociences</i> (encadrant principal) <i>Construction d'une méthode d'évaluation multicritère de la durabilité et de la résilience des exploitations agricoles</i>
2022	Cecilia Moltrasio, master <i>Biologie, agrosociences</i> (co-encadrant) <i>Construction d'un référentiel technique et de collecte de données écophysiological pour la simulation d'espèces de diversification avec le modèle APSIM</i>

2020	Louis Bourdin, master <i>Biologie, agrosociétés</i> (encadrant principal) <i>Which crop model to simulate the ecosystem services provided by crop diversification in Brittany?</i>
2012	Jérémy Monnier, master BioVIGPA ⁹ (co-encadrant) <i>Évaluation agroenvironnementale d'exploitations laitières adhérentes à la Coopédome : détermination de leurs efficacités azotées</i>
2009	Émilie Denis, master BioVIGPA (co-encadrant) <i>Évaluation de la durabilité agri-environnementale et propositions d'amélioration des pratiques culturales pour des exploitations du projet Grandes Cultures Économiques</i>
2005	Noémie Briand, DUT (encadrant principal) <i>Impact des systèmes de culture sous couverture végétale sur l'évolution de la porosité structurale des sols : conséquences sur les transferts hydriques</i>
2004	Pierre-Émilien Rouger, DUT (encadrant principal) <i>Impact des systèmes de culture sous couverture végétale sur le fonctionnement de l'agrosystème : application aux flux d'eau et d'azote</i>

Participation à des comités de thèse

- Comité de thèse d'Éloïse Couthouis (thèse en cours)
Biodiversité et multifonctionnalité supportées par les haies à différentes échelles
- Comité de thèse de Lorry Bécot (thèse en cours) (tuteur de l'école doctorale)
Sélectionner des poules pondeuses adaptées à un système d'élevage alternatif à la cage
- Comité de thèse de Caroline Roussy (thèse soutenue en 2016)
Système de culture innovants : déterminants de l'adoption et rôle du risque
- Comité de thèse de Jean-Claude Govindin (thèse soutenue en 2014)
Les plantes de service : une alternative au travail du sol dans les systèmes de culture d'ananas

PROJETS DE RECHERCHE

Coordination de projets, de WP¹⁰, de tâches

2020-21	Projet INRAE ¹¹ EIDER (méthodologie pour l'Évaluation Intégrée de la Durabilité Et de la Résilience des systèmes de production laitiers agroécologiques) <i>Co-coordonateur</i>
---------	---

⁹ BioVIGPA, Biologie Végétale Intégrative : Gène, Plante, Agrosystème

¹⁰ WP, Workpackage

¹¹ INRAE, Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'alimentation et l'Environnement

2017-20	Projet Erasmus+ SEGAE (SERious Game in AgroEcology: Development of a serious game for digital learning of agroecology in Europe) <i>Coordinateur du WP4 « Game building »</i> <i>Responsable d'une tâche du WP1 « General model framework conception »</i>
2016-20	Projet FEADER PEI-AGRI ¹² / Région Pays de la Loire TERUnic (TErritory Economical, the Right Understanding) <i>Co-coordonateur du WP3 « Construction et estimation du modèle bioéconomique à l'échelle de l'exploitation » / co-encadrement d'une thèse</i>
2015-16	Projet Chaire AEI ¹³ (Mise au point d'un tableau de bord pour piloter la transition des exploitations vers l'agriculture écologiquement intensive) <i>Coordinateur</i>
2014-15	Projet Régions Bretagne / Pays de la Loire SecuriProt (Sécuriser et augmenter la production de Protéagineux grains destinés à l'alimentation animale) <i>Responsable de sept tâches du WP1 « Sérifier les déterminants au déploiement des cultures de protéagineux grains pour l'alimentation animale »</i>
2013-14	Projet Creseb ¹⁴ (État des lieux des connaissances et outils disponibles permettant de modéliser les fuites d'azote et d'évaluer l'impact des pratiques agricoles et des structures de paysage sur la qualité de l'eau des bassins versants) <i>Coordinateur</i>
2012-15	Projet européen CANTOGETHER (Crops and ANimals TOGETHER) <i>Responsable d'une tâche du WP1 « Identify and design innovative mixed farming systems using a participatory approach and modelling »</i>

En lien avec mes activités d'enseignant, je coordonne, presque chaque année, des études financées (budget de 2 à 10 k€), mises en œuvre par des étudiants, dont certains résultats sont valorisés dans des publications scientifiques.

Participants

2020-26	Projet ANR ¹⁵ FAST (Faciliter l'Action publique pour Sortir des pesTicides) <i>Participant à la tâche 1.3 du WP1 « Drivers of farmers' production practice and crop protection choices » / co-encadrement d'une thèse</i>
2008-12	Projet CIVAM ¹⁶ Grandes Cultures Économies

¹² FEADER, Fonds Européen Agricole pour le DÉveloppement Rural ; PEI-AGRI, Partenariat Européen pour l'Innovation

¹³ Chaire AEI, Chaire Agriculture Écologiquement Intensive

¹⁴ Creseb, Centre de ressources et d'expertise scientifique sur l'eau de Bretagne

¹⁵ ANR, Agence Nationale de la Recherche

¹⁶ CIVAM, Centre d'Initiatives pour Valoriser l'Agriculture et le Milieu rural

2008-10	Projet CASDAR ¹⁷ RotAB (Rotations en Agriculture Biologique – Peut-on construire des rotations et assolements qui limitent les impacts environnementaux tout en assurant une viabilité économique de l'exploitation ?)
---------	---

PARTICIPATION A DES INSTANCES

2022-...	Membre élu du Conseil d'administration de l'Institut Agro Membre de droit du Conseil d'école de l'Institut Agro Rennes-Angers
2021-...	Animateur, dans mon UMR, de l'axe de recherche Conception (Conception de nouveaux systèmes agricoles, en rupture, insérés dans des territoires)
2020-...	Membre élu du Conseil scientifique du département AgroEcoSystem de l'INRAE
2020-21	Membre élu du Conseil des enseignants de l'Institut Agro Membre de droit de la Commission des enseignants de l'Institut Agro Rennes-Angers
2017-21	Co-animateur, dans mon UMR, de l'axe de recherche AGILE (Accompagner la transition agroécologique des systèmes et territoires d'élevage)
2016-...	Représentant d'AGROCAMPUS OUEST au sein du groupe thématique « Agroéquipement, agriculture numérique et nouvelles technologies » d'Agreenium
2013-20	Membre élu du Conseil des enseignants d'AGROCAMPUS OUEST
2011-19	Représentant d'AGROCAMPUS OUEST au sein de l'UVAE ¹⁸

ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

Responsabilité (à l'Institut Agro)

2020	Co-responsable de la semaine intensive sur l'agroécologie et le jeu sérieux SEGAE, à l'Université de Bologne (2 ECTS ¹⁹ , 52 étudiants ; niveau M2)
2018-...	Co-responsable du module obligatoire <i>Stage en exploitation agricole</i> en deuxième année du diplôme d'ingénieur agronome de l'Institut Agro Rennes-Angers (6 ECTS, environ 130 étudiants par année universitaire ; niveau M1)

¹⁷ CASDAR, Compte d'affection Spécial au Développement Agricole et Rural

¹⁸ UVAE, Université Virtuelle d'AgroÉcologie

¹⁹ ECTS, European Credit Transfer and Accumulation System

2016-...	Responsable de l'option <i>Agrosystèmes : conception et évaluation</i> de la spécialisation <i>Sciences et ingénierie du végétal</i> de l'Institut Agro Rennes-Angers (51 ECTS, environ 10 étudiants par année universitaire ; niveau M2)
2016-...	Responsable de l'option <i>Fonctionnement et gestion des agrosystèmes</i> du master <i>Biologie, agrosociétés</i> de l'Institut Agro Rennes-Angers, de l'Université de Rennes 1 et d'Oniris (55 ECTS, environ 15 étudiants par année universitaire ; niveau M2)
2013-...	Co-responsable du module optionnel <i>Agroécologie</i> en deuxième année du diplôme d'ingénieur agronome de l'Institut Agro Rennes-Angers (4 ECTS, environ 30 étudiants par année universitaire ; niveau M1)
2011-12	Co-responsable de la licence professionnelle PARTAGER ²⁰ d'AGROCAMPUS OUEST et de l'Université de Rennes 1 (60 ECTS, 20 étudiants ; niveau L3)
2011-...	Co-responsable du module obligatoire <i>Approche globale de l'exploitation agricole et des conditions de production</i> en première année du diplôme d'ingénieur agronome de l'Institut Agro Rennes-Angers (2 ECTS, environ 130 étudiants par année universitaire ; niveau L3)

Enseignements

- En moyenne, 210 heures équivalent TD²¹ (882 heures de travail effectif) par année universitaire
- Participation aux jurys de mémoires de fin d'études (de 15 à 20 étudiants par an), participation à d'autres jurys de mémoires (de 2 à 6 étudiants par an)
- (Co-)coordinateur de la création de deux cours en ligne :
 - Leterme, P., Carof, M., Godinot, O., Jalam, G., Regan, J., 2016. Crop-livestock farming systems assessment in Europe. *In* Ressource numérique du projet européen CANTOGETHER. <http://cantogether.agrocampus-ouest.fr>
 - Carof, M., Corre-Hellou, G., Munier-Jolain, N., Peigné, J., Roger-Estrade, J., Valantin-Morison, M., 2015. Quelles connaissances scientifiques pour concevoir des systèmes de culture biologiques ? *In* Module en ligne ENVAM. <https://rebrand.ly/Oh63re>
- Contributeur d'un cours en ligne :
 - Baatard, B., Carof, M., Clermont-Dauphin, C., Doré, T., Fitoussi, G., Gardarin, A., Herry, C., Sarthou, J.-P., 2014. Qu'est-ce que l'agroécologie ? *In* Ressource numérique UVED. <https://rebrand.ly/uxxsir>

²⁰ PARTAGER, Pratiques Agricoles, Aménagement Rural, Techniques Alternatives et Gestion Écologique des Ressources

²¹ TD, Travail Dirigé

EXPERTISE

Revue

- Révision de 13 articles scientifiques dans des articles à comité de lecture (e.g., Agricultural Systems, Agronomy for Sustainable Development, Environmental modelling and software)

Jurys

- Membre du jury de la thèse de doctorat d'Emma Soulé (Université de Lorraine ; école doctorale SIRENa ; 2022)
- Membre titulaire du jury de recrutement d'un maître de conférences en agronomie systémique à Bordeaux Sciences Agro (CNECA n° 5 ; A2BSA000107 ; 2021)
- Membre suppléant du jury de recrutement d'un maître de conférences en agroécologie à AgroParisTech (CNECA n° 5 ; MC 01-075 ; 2011)

Projets, colloques

- Révision de projets scientifiques :
 - Actions de recherche en agriculture biologique soumis à la CIRAB²² (2013-19)
 - Appel à propositions du programme PSDR²³ IV (2015)
 - Appel à projets de recherche d'intérêt régional, région Centre (2011)
- Sélection de communications pour La Terre est notre métier (2022)
- Sélection de communications pour 20th N Workshop (2018)

AUTRES PRODUCTIONS

- Co-développeur du jeu sérieux SEGAE, <https://www.segae.org>
- Co-développeur du calculateur SyNE, <https://nefficiencycalculator.fr>
- Coordinateur des fiches Creseb sur la qualité de l'eau, <https://rebrand.ly/t86nzqn>

²² CIRAB, Commission Interprofessionnelle de Recherche en Agriculture Biologique de Bretagne

²³ PSDR, Pour et Sur le Développement Rural

Bilan des activités de recherche 2003 – 2022



Figure 1. Les limites planétaires sont les seuils à ne pas dépasser pour que l'humanité puisse continuer à vivre dans un écosystème terrestre sûr. Ces neuf limites (trait pointillé épais) concernent le changement climatique (climate change), les entités chimiques nouvelles néfastes pour l'environnement (novel entities), la diminution de l'ozone stratosphérique (stratospheric ozone depletion), la charge en aérosols atmosphériques (atmospheric aerosol loading), l'acidification des océans (ocean acidification), les cycles biogéochimiques (biogeochemical flows), la consommation d'eau douce (freshwater use), le changement d'usage des sols (land-system change) et l'intégrité de la biosphère (biosphere integrity). Les cycles biogéochimiques comportent deux sous-limites relatives au cycle de l'azote (N) et au cycle du phosphore (P) ; l'intégrité de la biosphère comporte deux sous-limites relatives à la diversité génétique (E/MSY) et à la diversité fonctionnelle (BII). L'état de la planète par rapport à chaque seuil est quantifié par une mesure spécifique telle que la part de la forêt originelle pour le changement d'usage des sols ou la concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère pour le changement climatique. Quatre limites sont déjà dépassées (zones jaunes et oranges) : le changement climatique, les cycles biogéochimiques, le changement d'usage des sols, l'intégrité de la biosphère. Trois limites ne sont pas dépassées (zones vertes) et deux ne sont pas encore quantifiées (not yet quantified). (Crédit : J. Lokrantz/Azote based on Steffen et al. 2015)

1. Introduction

Depuis 2003, mes travaux scientifiques participent à l'**émergence de nouveaux systèmes agricoles** en s'attachant (i) à **comprendre** ceux en place ou à venir, et (ii) à les **évaluer** sur leurs performances économiques et environnementales. Je m'inscris ainsi dans le vaste champ de recherche sur la **conception** et l'**évaluation multicritère** des systèmes.

1.1. Conception et évaluation multicritère : définitions

Depuis longtemps, l'agriculture a cherché à répondre aux attentes, parfois contradictoires, de la société. Ces attentes sont aujourd'hui très nombreuses : produire des aliments sains, nutritifs, diversifiés, accessibles à tous les êtres humains, en préservant l'environnement naturel, en stimulant les économies locales et le partage de richesses, en favorisant la transmission des connaissances nouvelles et des savoirs traditionnels, en facilitant les dialogues intergénérationnels (Cartron & Fichet, 2020 ; Talukder *et al.*, 2020). Malheureusement, de nombreux auteurs ont démontré que l'agriculture contemporaine répondait mal à ces attentes : le désormais célèbre concept des « limites planétaires » de Rockström *et al.* (2009) est une parfaite illustration des impacts négatifs des activités humaines – l'agriculture en particulier – sur l'environnement (Figure 1). De nombreux autres auteurs ont aussi démontré les faiblesses sociales et économiques des formes dominantes de l'agriculture contemporaine (voir par exemple, Therond *et al.* (2017) à propos de l'agriculture industrielle).

Pour établir ces constats, la plupart de ces auteurs ont eu recours à des outils d'évaluation des systèmes. L'évaluation est, en effet, une **démarche scientifique qui permet d'apprécier, qualitativement ou quantitativement, les conséquences positives ou négatives des pratiques agricoles, existantes ou à venir, sur un ensemble d'objectifs qui peuvent être économiques, environnementaux ou sociaux** (Lairez & Feschet, 2015a).

Chaque objectif évalué est décrit par un ou plusieurs critère(s), « caractère, principe, élément auquel on se réfère pour juger, apprécier, définir quelque chose » (CNRS & Université de Lorraine, 2012). L'évaluation est considérée comme **multicritère** dès lors qu'au-moins deux critères, appartenant généralement à des dimensions différentes de la durabilité, sont mobilisés pour analyser l'état d'un système donné.

Le degré de maîtrise, par le système évalué, de chaque critère est obtenu grâce à l'emploi d'un (ou plusieurs) **indicateur(s)** *i.e.*, une variable fournissant une information synthétique sur des phénomènes complexes ou difficilement mesurables (Parent *et al.*, 2013). Cette variable peut être quantitative ou qualitative, issue d'une mesure, d'une observation, d'une simulation numérique ou d'une expertise, mais elle est toujours positionnée par rapport à une référence afin de faciliter son interprétation.

L'évaluation multicritère peut se faire à **différentes échelles spatiales** (*e.g.*, la parcelle, l'exploitation, la planète) et **temporelles** (*e.g.*, la campagne culturale, la durée d'une rotation culturale) et concerner donc **différents niveaux d'organisation** comme le système de culture, le système de production, le système alimentaire, *etc.* (Feschet & Lairez, 2015).

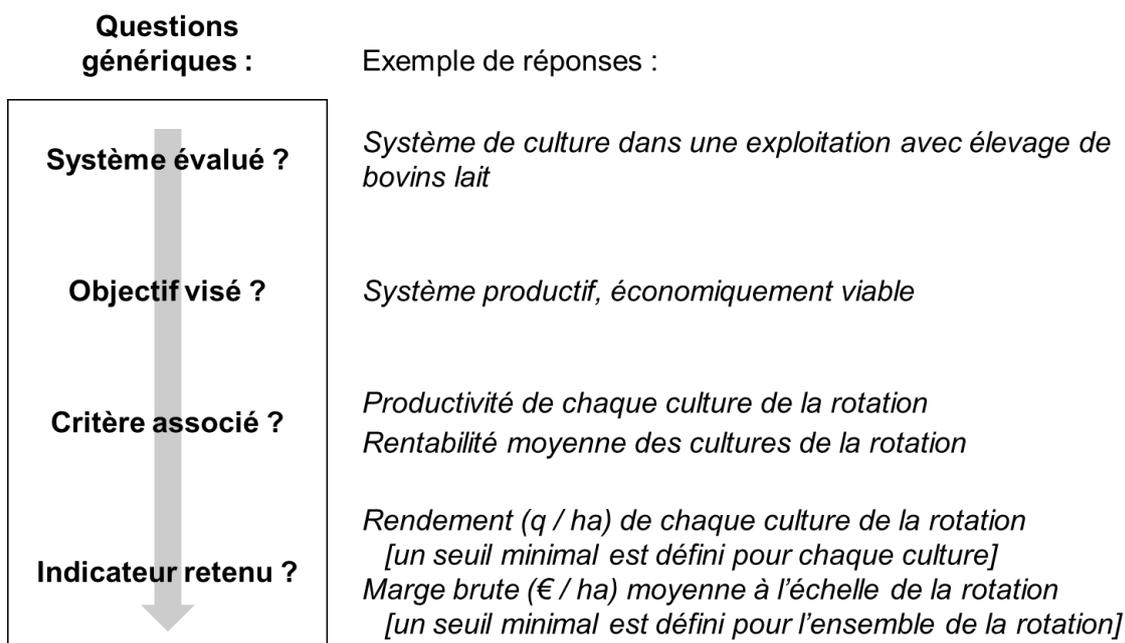


Figure 2. Les différentes questions à se poser lors de la mise en œuvre d'une démarche d'évaluation multicritère de systèmes agricoles et exemple de réponses. Les indicateurs retenus peuvent être choisis librement ou inclus dans une méthode d'évaluation ; c'est le cas, par exemple, avec EDEN-E basée sur l'Analyse de Cycle de Vie (van der Werf et al., 2009) ou MASC (Sadok et al., 2009).

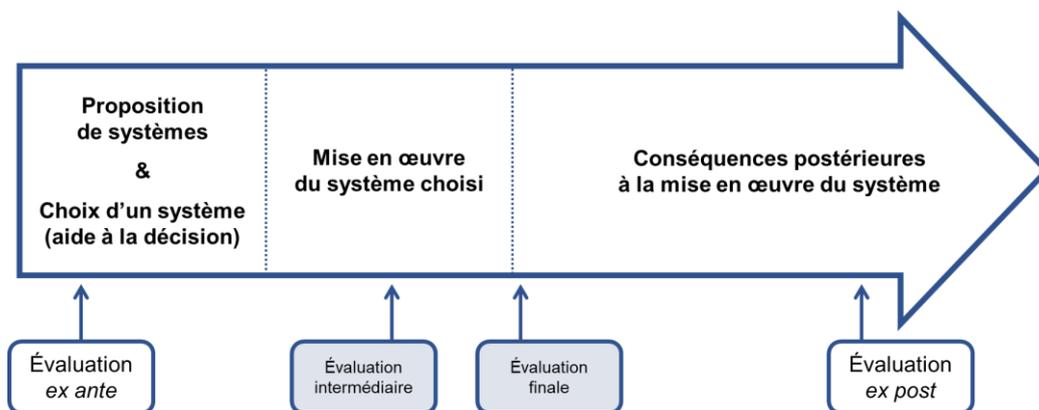


Figure 3. L'évaluation d'un système agricole peut intervenir à plusieurs moments-clés, en particulier avant (évaluation ex ante) et après (évaluation ex post) sa mise en œuvre. Cette figure, adaptée d'un article de Samset & Christensen (2017) sur l'évaluation en général, utilise l'expression « évaluation intermédiaire » (i.e., une évaluation qui a lieu pendant que le système se réalise) : en agriculture, l'expression employée est plutôt « pilotage » e.g., le pilotage des cultures d'une rotation ou le pilotage stratégique de l'exploitation agricole. De même, en agriculture, la distinction entre « évaluation finale » et « évaluation ex post » n'est pas toujours faite (théoriquement, l'évaluation ex post comprend une appréciation des impacts d'un système donné sur le temps long). Le lecteur notera que définir la fin de la mise en œuvre d'un système est complexe : au bout d'une rotation pour un système de culture ? au bout d'un an d'exploitation pour un système de production ? etc.

La Figure 2 résume les questions à se poser lors de la mise en œuvre d'une démarche d'évaluation multicritère. Une telle démarche peut s'appliquer à des systèmes déjà existants (*i.e.*, déjà mis en œuvre, que ce soit dans une expérimentation, chez un agriculteur, sur un territoire ou dans une filière) ou à des systèmes nouvellement conçus, n'ayant pas encore été éprouvés sur le terrain. Dans la première situation, l'évaluation est dite **ex post** (ou *a posteriori*) : elle permet d'apprécier les conséquences effectives d'un système donné après sa réalisation (Figure 3 ; Samset & Christensen, 2017). Dans la seconde situation, l'évaluation est dite **ex ante** (ou *a priori*) : elle permet d'apprécier les conséquences possibles d'un système donné avant sa réalisation (Samset & Christensen, 2017). L'évaluation *ex ante* est indissociable de la **conception de systèmes** *i.e.*, un **processus cognitif**, individuel ou collectif, **qui sert à mettre au point un système nouveau pour combler les besoins d'utilisateurs ciblés**, étant données certaines contraintes (Ertas & Jones, 1996 ; Visser, 2009). En accord avec Prost (2019), ce processus inclut non seulement le raisonnement sur le système à créer (*i.e.*, la formation des idées s'y afférant) mais également sa réalisation. Associée à ce processus actif, intentionnel et organisé, l'évaluation *ex ante* sert à choisir, sur un ensemble de critères et en mobilisant les techniques de l'aide à la décision, la meilleure alternative possible parmi plusieurs propositions, avant, généralement, sa réalisation sur le terrain. Les **outils pour l'évaluation multicritère** sont nombreux, que ce soit pour le **renseignement des indicateurs** ou bien encore l'**agrégation des critères** d'évaluation (voir par exemple, Ishizaka & Nemery, 2013 ; Lairez & Feschet, 2015b ; Marta-Costa & Silva, 2013). Pour l'évaluation *ex ante*, deux types d'outil sont particulièrement utiles pour prédire les impacts potentiels d'un système sur tel ou tel indicateur : (i) la simulation numérique, et (ii) l'expertise, surtout lorsque, pour certains indicateurs, les outils de simulation numérique n'existent pas. L'évaluation *ex post* peut aussi mobiliser ces deux types d'outil lorsqu'il s'agit de prévoir les impacts d'un système sur le temps long et/ou à une échelle spatiale autre que celle du système en question. Bien sûr, l'évaluation *ex post* exploite avant tout les mesures et observations obtenues pendant la période de mise en œuvre du système.

Comme indiqué au début de cette partie, l'évaluation multicritère peut servir à faire un constat et une quantification des impacts des systèmes agricoles sur l'environnement, la société, l'économie. Elle peut aussi servir dans les **démarches de conception de systèmes** et à ce titre, de nombreux auteurs y ont formalisé sa place (voir par exemple, Descheemaeker *et al.*, 2019 ; Lançon *et al.*, 2007 ; Loyce & Wery, 2006 ; Martin *et al.*, 2013 ; Moraine *et al.*, 2017 ; Plénet & Simon, 2015). Ces démarches incluent le plus souvent une étape initiale de **diagnostic** qui sert (i) à caractériser le système en place pour mettre en évidence ses imperfections, et donc ce qu'il faudrait améliorer dans un futur système, et/ou (ii) à définir un ensemble de contraintes à respecter et d'objectifs à atteindre pour le système à construire. Lorsqu'il s'agit de caractériser le système en place, ce diagnostic mobilise souvent les outils de l'évaluation multicritère (et s'apparente alors à l'idée de « constat » évoquée *supra*). Vient ensuite l'étape de **conception** proprement dite, accompagnée d'une éventuelle étape d'**évaluation ex ante** surtout s'il est nécessaire de faire un choix entre les alternatives conçues avant leur mise en œuvre. Cette étape d'évaluation *ex ante* peut aussi conduire à re-concevoir les propositions initiales si celles-ci présentent trop de défauts ou des défauts rédhibitoires par

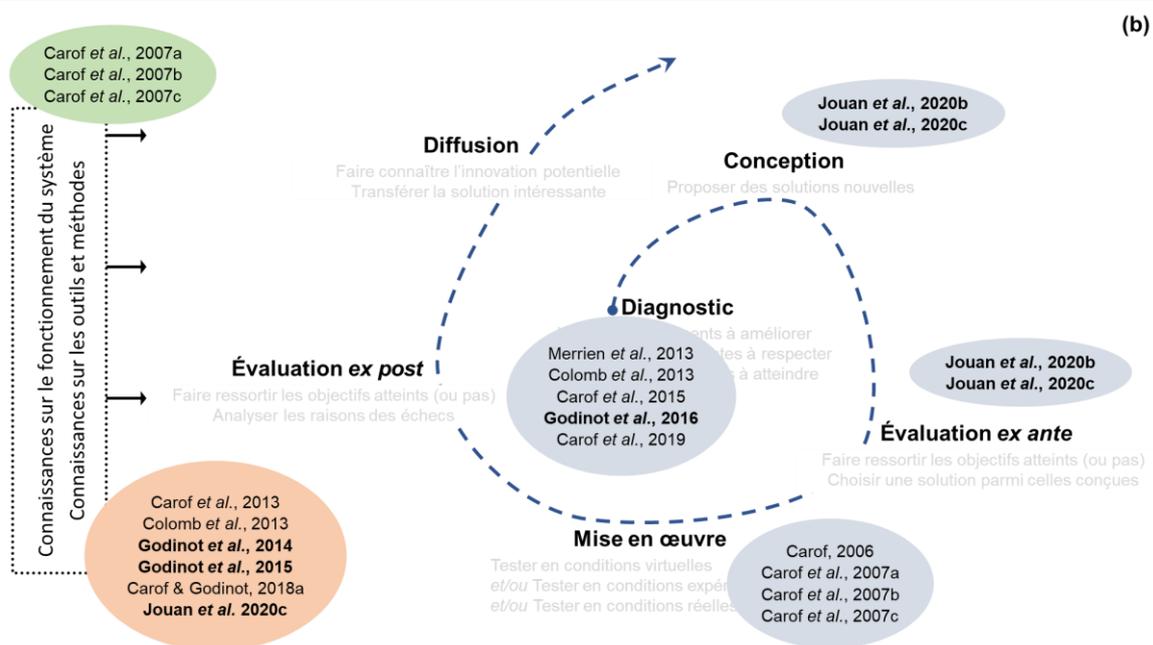
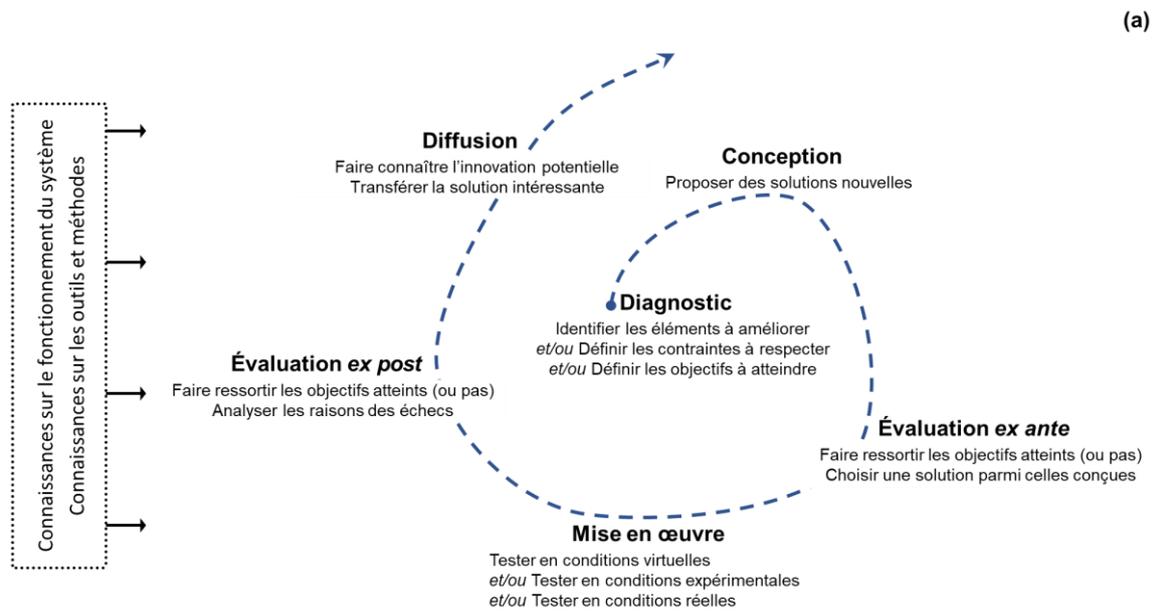


Figure 4. La partie (a) de cette figure est une représentation possible des démarches de conception de systèmes agricoles comprenant les étapes de Diagnostic, Conception, Évaluation ex ante, Mise en œuvre, Évaluation ex post et Diffusion. La partie (b) organise mes principales publications scientifiques par rapport à ces démarches. Les publications de la bulle verte portent sur l'accroissement des « connaissances sur le fonctionnement du système », celles de la bulle orangée portent sur l'accroissement des « connaissances sur les outils et méthodes » et celles des bulles bleues portent sur l'une ou l'autre des étapes de la démarche de conception proprement dite. Les publications en gras sont celles impliquant les doctorants que j'ai encadrés. Pour alléger la figure, je fais le choix de ne pas ajouter les flèches représentant les allers-retours possibles, et souvent nécessaires, entre étapes. Cette figure est inspirée de Plénet & Simon (2015).

rapport aux objectifs à atteindre. La **mise en œuvre** des systèmes est l'étape suivante ; elle se concrétise de différentes manières, par exemple grâce à des expérimentations-systèmes, des tests chez des agriculteurs ou des expérimentations virtuelles. Une **évaluation ex post** peut alors être conduite afin de confronter les résultats de la mise en œuvre des systèmes par rapport aux objectifs à atteindre ; de nouveau, la re-conception des systèmes est possible si les résultats sont trop discordants des objectifs initiaux. La dernière étape consiste à **diffuser**, auprès des acteurs qui utiliseront ou recommanderont les systèmes conçus²⁴ (e.g., des agriculteurs d'un territoire, des décideurs publics), les connaissances produites dans les étapes de conception et d'évaluation. À chacune des étapes décrites, des connaissances nouvelles peuvent être produites, que ce soit pour mieux comprendre le fonctionnement des systèmes conçus ou pour proposer de nouveaux outils et méthodes de conception et d'évaluation.

Pour la bonne compréhension de ce mémoire, le lecteur retiendra que l'expression « *démarche(s) de conception* » inclut l'ensemble des étapes présentées ci-dessus alors que l'expression « *conception* » concerne uniquement l'étape où est imaginé un système nouveau.

1.1. Objets étudiés, questions abordées

L'analyse des principaux travaux scientifiques dans lesquels je suis intervenu ces 19 dernières années montre qu'au fil des projets financés, j'ai contribué, de différentes façons, à la conception et à l'évaluation multicritère de systèmes agricoles. À ce titre, je propose au lecteur la Figure 4 où je positionne mes travaux en regard des étapes nécessaires aux démarches de conception de systèmes :

- J'ai réalisé des **diagnostics de systèmes de culture** en **enquêtant** des agriculteurs sur leurs pratiques, ce qui a permis d'étudier la **diversité actuelle des cultures** (Carof *et al.*, 2019, 2015 ; Colomb *et al.*, 2013 ; Merrien *et al.*, 2013). Ces diagnostics ont été accompagnés d'apports méthodologiques par (i) la **structuration d'un guide** pour aider des évaluateurs à choisir l'outil le plus en adéquation avec leurs attentes (Carof *et al.*, 2013), (ii) l'**élaboration d'un outil d'évaluation multicritère** considérant les spécificités de l'agriculture biologique (Colomb *et al.*, 2013), et (iii) la **proposition d'un questionnaire** orienté vers la « traque aux innovations » (Carof *et al.*, 2019).
- Je me suis impliqué dans la réalisation d'un **diagnostic de l'agriculture, vis-à-vis de sa gestion de l'azote, à l'échelle de pays entiers**, ce qui a permis d'**analyser les importantes disparités** entre les pays étudiés (Godinot *et al.*, 2016). Ce diagnostic a été rendu possible grâce à un nouvel apport méthodologique : la **création d'indicateurs** relatifs à la gestion de l'azote et d'un **calculateur en ligne**, en accès libre, pour leur utilisation (Carof & Godinot, 2018a ; Godinot *et al.*, 2015, 2014).
- J'ai participé à la **conception, virtuelle²⁵, de systèmes de production** et à leur **évaluation ex ante** en mobilisant un **modèle bioéconomique**, ce qui a permis d'étudier l'**insertion de cultures de diversification** – les légumineuses – dans ces systèmes de production (Jouan *et al.*, 2020b). Ce modèle bioéconomique a bénéficié de mon expertise pour qu'il **intègre des aspects agronomiques** tels que

²⁴ Les démarches de conception sont souvent participatives et des acteurs variés sont présents du diagnostic jusqu'à la diffusion.

²⁵ J'entends par l'expression « conception virtuelle » le fait de proposer de nouveaux systèmes sans aller jusqu'à leur mise en œuvre. Les principales caractéristiques des systèmes sont modélisées mais ne sont pas réalisées.

Encadré 1. L'autonomie protéique des élevages en France

Pour un système donné (e.g., une exploitation, une région, un pays), l'autonomie protéique « correspond à la part des besoins en protéines [...] des [...] élevage[s du système] qui est couverte par la production végétale [du système] » (Pellerin, 2020).

À l'échelle de la France, l'autonomie protéique des élevages est élevée (84 % en 2015 selon le travail de Saille *et al.* publié en 2022), bien que variable d'un type d'élevage à l'autre. Cependant, si le calcul de l'autonomie protéique s'établit sur les seules matières premières riches en protéines²⁶ (e.g., le tourteau de soja, le tourteau de colza), celle-ci diminue fortement, dans tous les élevages, pour atteindre une valeur moyenne de 55 %²⁷ sur la période 2012-2020 (Terres Univia, 2021, 2019, 2015). Lorsqu'elles ne sont pas produites sur le territoire national, ces matières premières riches en protéines sont importées d'Amérique du Sud ou des pays bordant la Mer Noire (Céréopa, 2017).

Exprimée une première fois au milieu des années 1970 (Hache, 2015), la France a récemment réaffiché son ambition de réduire sa dépendance²⁸ à l'importation de protéines végétales (MAA, 2020 ; MAAF, 2014). Le plan Protéines végétales du ministère en charge de l'Agriculture a ainsi pour objectif de « (1) réduire [la] dépendance [de la France] aux importations de matières riches en protéines, notamment le soja importé de pays tiers, (2) améliorer l'autonomie alimentaire des élevages, à l'échelle des exploitations, des territoires et des filières, et (3) développer une offre de produits locaux en matière de légumes secs (lentilles, pois chiche, haricots, fèves, etc.) » (MAA, 2020).

Pour augmenter l'autonomie protéique des élevages, il existe deux voies principales, non exclusives : (i) réduire les besoins en protéines végétales en diminuant le cheptel et/ou les objectifs de production assignés au cheptel, et (ii) réduire l'achat d'aliments en augmentant, dans l'alimentation des animaux, la part des protéines végétales produites localement et/ou en diminuant les pertes. Ces deux voies ne sont pas simples à opérer dans l'Union Européenne où les transformations récentes de l'agriculture ont dissocié les productions végétales des productions animales, au niveau des exploitations comme des territoires (Dupraz, 1997). Cette dissociation résulte des processus de spécialisation et de concentration qui ont permis de substantielles économies d'échelle et d'agglomération (Dupraz, 1997 ; Roguet *et al.*, 2015). Cependant, ces avantages économiques ne peuvent faire oublier que cette dissociation s'est accompagnée de très forts impacts négatifs sur l'environnement e.g., Jacquet & Jouan (2022) et Peyraud *et al.* (2012).

²⁶ Une matière première riche en protéines contient plus de 15 % de protéines (Sebillotte, 2003). En 2011, toutes filières animales confondues, les matières premières riches en protéines représentaient environ 35 % de la consommation de protéines des animaux d'élevage (Dronne, 2018). Ces matières premières riches en protéines facilitent la composition équilibrée des rations.

²⁷ Selon Saille *et al.* (2022), cette valeur serait surestimée, de plusieurs unités, car le mode de calcul de Terres Univia considère que toutes les matières premières riches en protéines produites en France sont utilisées par les élevages français, ce qui est faux (une partie est exportée ou utilisée pour l'alimentation humaine).

²⁸ Je ne reviens pas ici sur les raisons pour lesquelles la France souhaite réduire sa dépendance protéique, pour les élevages en particulier. À ce sujet, le lecteur pourra lire les articles de Pellerin (2020) et Saille *et al.* (2022).

« l'effet précédent – la sensibilité du suivant » ou la diversité des rotations (Jouan *et al.*, 2020c).

- J'ai **testé, au champ, des systèmes de culture potentiellement innovants**, ce qui a permis de produire des connaissances nouvelles sur ceux-ci (Carof, 2006 ; Carof *et al.*, 2007a, 2007b, 2007c).

Dans tous ces travaux, le **système de culture a été l'objet que j'ai principalement étudié** mais j'ai progressivement cherché à **ne pas l'étudier séparément de sa place dans les systèmes production**. Ceci est devenu une nécessité quand je me suis intéressé aux systèmes de culture dans des **exploitations combinant productions végétales et animales**, ce qui fut le cas dès 2010 lors de mon arrivée à l'Institut Agro, les projets de mon unité de recherche s'accomplissant fréquemment dans des contextes agricoles avec de l'élevage. Ainsi, à quelques exceptions près, les travaux listés ci-dessus se sont situés dans les **territoires d'élevage de l'Ouest de la France** et ont concerné les **systèmes de culture dans des exploitations élevant des bovins laitiers**.

Pourquoi ai-je employé le terme une « nécessité » ? La première raison est que, dans les exploitations combinant productions végétales et animales, les objectifs et la mise en œuvre des systèmes de culture dépendent, au moins pour partie (i) de ceux des systèmes d'élevage, et (ii) de l'organisation du travail pour ces deux systèmes techniques (Madelrieux *et al.*, 2006 ; Papy, 2001). Autant que faire se peut, mes réflexions dans les démarches de conception ont donc tenu compte de cette dépendance pour **éviter d'aboutir à des conclusions erronées et de proposer des alternatives inadaptées**.

La seconde raison, qui découle de la précédente, est que la **complémentarité des productions végétales et animales doit être questionnée**, le fait de produire des végétaux et des animaux dans un même système ne garantissant pas une valorisation *ad hoc* des productions (**Moraine *et al.*, 2013**). Pourtant, par rapport aux systèmes spécialisés, les systèmes mixtes, qui valorisent cette complémentarité, ont souvent des impacts plus faibles sur l'environnement (Leterme *et al.*, 2019 ; Ryschawy *et al.*, 2012) et en situations d'incertitudes (par exemple, des variations de prix importantes et peu prévisibles), leur profit serait plus stable (Diakité *et al.*, 2019 ; Ryschawy *et al.*, 2012). La complémentarité des productions végétales et animales se caractérise par des flux de matières (les effluents d'élevage comme source de nutriments pour les cultures ; ces dernières comme source d'aliments pour les animaux) et des opportunités techniques (*e.g.*, la diversification des productions végétales en assolant aussi bien des cultures fourragères, dont les prairies, pour l'alimentation animale que des grandes cultures, des cultures légumières, *etc.* pour l'alimentation humaine) ; la complémentarité peut s'exercer dans une même exploitation ou entre exploitations d'un même territoire.

J'ai interrogé cette complémentarité au regard de l'**autonomie protéique des élevages** (Encadré 1). Je l'ai interrogé également au regard de la **réduction de l'usage**

Tableau 1. Les objets étudiés et les méthodes mobilisées dans mes travaux scientifiques, par ordre chronologique des publications. Pour chaque travail, la couleur bleu foncé indique l'objet étudié ou la méthode mobilisée principalement et la couleur bleu clair, l'objet étudié ou la méthode mobilisée secondairement.

Thème	Publication	Objet			Méthode			
		Système de culture	Système de production	Territoire	Enquête	Analyse multicritère	Expérimentation au champ	Modélisation
Test de systèmes de culture potentiellement innovants incluant une plus grande diversité de cultures	Carof, 2006							
	Carof <i>et al.</i> , 2007a							
	Carof <i>et al.</i> , 2007b							
	Carof <i>et al.</i> , 2007c							
Diagnostic de la diversité des cultures en Vendée	Merrien <i>et al.</i> , 2013							
Diagnostic de systèmes de culture d'exploitations biologiques sans élevage	Colomb <i>et al.</i> , 2013					①		
Élaboration de nouveaux indicateurs pour évaluer la gestion de l'azote dans les systèmes de production	Godinot <i>et al.</i> , 2014							
	Godinot <i>et al.</i> , 2015					②		
	Carof & Godinot, 2018b							
Diagnostic de la diversité des cultures / développement d'une culture de diversification (lin oléagineux)	Carof <i>et al.</i> , 2015							
Diagnostic de la gestion de l'azote à l'échelle des pays membres de l'UE	Godinot <i>et al.</i> , 2016							
Diagnostic de la diversité des cultures / développement de cultures de diversification (protéagineux)	Carof <i>et al.</i> , 2019							
Conception et évaluation de systèmes de production favorisant des cultures de diversification (légumineuses)	Jouan <i>et al.</i> , 2020b							③
	Jouan <i>et al.</i> , 2020c							

① Pour ce travail, un outil d'évaluation multicritère a été conçu puis utilisé. ② Pour ces travaux, trois nouveaux indicateurs ont été conçus. ③ Pour ces travaux, un modèle bioéconomique a été conçu.

des intrants²⁹ (engrais azotés de synthèse, produits phytosanitaires) et de l'**insertion de cultures de diversification**, en considérant les opportunités permises par la présence d'un élevage mais aussi les contraintes qui s'y affèrent :

- *La nécessaire satisfaction des besoins nutritionnels du troupeau*

Les besoins alimentaires des animaux doivent être satisfaits, en quantité et en qualité, par tout ou partie des cultures de l'exploitation. Ceci contraint le nombre de cultures à inclure dans les rotations puisque l'agriculteur doit disposer, chaque année, d'une surface minimale pour la production des cultures ingérées par les animaux.

- *Le recours variable aux prairies*

Les prairies servent à l'alimentation de troupeaux d'herbivores. Sur le plan environnemental, elles participent au maintien de la biodiversité et régulent les écoulements dans les parcelles (Huyghe, 2005). Également, des prairies judicieusement gérées séquestrent du carbone pour progressivement en augmenter le stock dans le sol (Dawson & Smith, 2007). Sur le plan agronomique, les prairies modifient favorablement le milieu pour la culture suivante e.g., Colbach *et al.* (2010). À l'inverse, la présence de prairies peut être un frein à une répartition optimale des systèmes de culture sur le territoire d'exploitation (les prairies pâturées doivent être implantées à proximité des bâtiments d'élevage).

- *L'utilisation facilitée de légumineuses en rotation ou en association*

Dans des exploitations sans élevage, la valorisation des légumineuses est difficile car elle dépend de l'existence d'une filière adaptée (sauf lorsqu'elles sont utilisées comme plantes de service). Dans des exploitations avec élevage, les légumineuses produites peuvent constituer un aliment riche en protéines, facilement valorisable, permettant d'accroître l'autonomie protéique des élevages (par exemple, en se substituant aux tourteaux de soja importés). Cependant, les légumineuses – en particulier, les espèces protéagineuses – présentent souvent des rendements faibles, très variables d'une année à l'autre et des marges brutes jugées insuffisantes par les agriculteurs eux-mêmes (Cernay *et al.*, 2015 ; Ridier *et al.*, 2016).

De plus, la mise en culture de légumineuses dans des exploitations avec élevage peut entraîner un certain nombre de complications structurelles du fait des contraintes d'épandage liées à la directive « nitrates » (Directive 91/676/CEE du Conseil, du 12 décembre 1991). Par exemple, en Bretagne et dans les Pays de la Loire, les légumineuses ne pouvant être fertilisées (sauf cas particuliers), la surface épandable des exploitations est diminuée si ces cultures sont réalisées, ce qui peut compliquer la gestion des effluents s'ils sont produits en grande quantité.

- *Le recyclage des matières organiques d'origine animale*

Les animaux produisent des fèces et de l'urine récupérées par l'agriculteur sous forme de lisier ou de fumier (ou encore directement excrétées par les animaux lors du pâturage). Ces matières organiques sont un atout : ce sont des fertilisants utilisables sur l'exploitation pour la production de végétaux. Ces fertilisants améliorent alors la teneur en carbone organique du sol (McLauchlan, 2006) ou bien encore la stabilité des

²⁹ À noter que je me suis aussi intéressé à la réduction de l'usage des intrants dans des systèmes de culture sans élevage cf. la partie 2.1, page 37.

agrégats (Abiven *et al.*, 2009). Ils permettent également d'augmenter la teneur en éléments minéraux du milieu (Edmeades, 2003), utilisables par les cultures.

En revanche, les quantités produites ainsi que les dates auxquelles ces matières organiques sont disponibles doivent être en cohérence avec les besoins nutritifs des végétaux pour éviter tout risque de pertes d'éléments minéraux par ruissellement ou lessivage (Edmeades, 2003). Or ce n'est généralement pas le cas : la production est continue alors que les besoins des plantes ne le sont pas. Cela impose des installations de stockage qui peuvent être le lieu de transformations dirigées de l'effluent comme le compostage. D'autre part, les équilibres entre éléments chimiques des effluents sont différents de ceux des plantes. Par ailleurs, la nécessaire incorporation au sol de ces matières organiques peut engendrer des contraintes en matière de travail du sol.

- *Une organisation plutôt orientée vers l'élevage*

Il est généralement admis que les agriculteurs élevant des animaux consacrent plus de temps aux systèmes d'élevage qu'aux systèmes de culture ; l'astreinte aux animaux structure la journée de travail et réduit le temps disponible pour d'autres activités (Dedieu *et al.*, 1999). De plus, ils sont souvent plus intéressés par l'atelier animal que par l'atelier végétal (ce sont des éleveurs avant d'être des cultivateurs) : ceci influence leur niveau de connaissances et de compétences sur la gestion des cultures. Les éleveurs ont souvent à cœur de gérer des systèmes de culture simples, robustes et faiblement chronophages *e.g.*, Beguin *et al.* (2021).

1.2. Axes de recherche pour la conception et l'évaluation de systèmes diversifiés

La prise en compte des éléments ci-dessus dans plusieurs de mes travaux passés participe de leur originalité et les distingue de travaux sur la conception et l'évaluation multicritère de systèmes de culture dans des exploitations dédiées à la production végétale *e.g.*, Belmin *et al.* (2022) et Jeuffroy *et al.* (2022). Mes travaux peuvent être vus comme une **source supplémentaire de connaissances sur les systèmes de culture**, en particulier ceux associés à de l'élevage, et alimentent ainsi la réflexion sur leur évolution dans le cadre de la transition agroécologique, une forte attente sociétale au cœur des activités de recherche en cours et futures (INRAE, 2021a).

Pour étudier les systèmes de culture dans des démarches de conception et questionner leur place dans les systèmes de production avec élevage, j'ai eu recours à **plusieurs méthodes agronomiques** (Tableau 1, page 32). En début de carrière, j'ai conduit des travaux expérimentaux à la parcelle puis mon passage par le Groupe ESA et mon arrivée à l'Institut Agro m'ont amené à considérer d'autres types de méthodes – l'analyse multicritère, l'enquête, la modélisation. Chaque appropriation d'une nouvelle méthode a été l'occasion pour moi **d'œuvrer à son amélioration en proposant de nouveaux outils plus adaptés aux systèmes à promouvoir** dans le cadre de la transition agroécologique *i.e.*, les systèmes à bas niveau d'intrant, les systèmes diversifiés, les systèmes ancrés dans leur territoire.

Finalement, des éléments présentés ci-dessus se dégage une structuration du bilan de mes activités selon deux axes de recherche : l'un sur ma **contribution méthodologique aux**

outils pour la conception et l'évaluation multicritère et l'autre sur les **connaissances nouvelles sur les systèmes de culture** actuels et potentiellement innovants. Ces deux axes sont présentés tour à tour dans les deux chapitres suivants de ce mémoire. Un dernier chapitre concerne ce qui occupe (plus de) la moitié de mon temps de travail, l'**enseignement**, que je rapproche de mes recherches à plusieurs occasions *e.g.*, au travers (i) de cours et travaux dirigés sur les démarches de conception, et (ii) de la réalisation de projets tutorés dans lesquels les étudiants acquièrent de nouvelles connaissances et compétences et où ils collectent des données utiles pour mes travaux.

Encadré 2. Brève description de l'outil MASC 1.0

MASC 1.0, pour Multi-attribute Assessment of the Sustainability of Cropping systems, version 1.0, évalue les systèmes de culture sur 32 critères « de base » : quatre critères de durabilité économique, cinq critères de durabilité sociale et 23 critères de durabilité environnementale.

Chaque critère « de base » est renseigné suite à la discrétisation d'un indicateur qui peut être une variable de sortie d'un modèle, un avis d'expert, etc. La discrétisation est rendue possible par l'existence de valeurs-seuils propres à chaque indicateur et modifiables selon le contexte. Par exemple, dans MASC 1.0, le critère de base *Consommation d'énergie* est renseigné grâce à l'indicateur « énergie », I_{EN} , de la méthode INDIGO® (Bockstaller *et al.*, 1997), calculé pour chaque culture de la rotation et moyenné ensuite : si la valeur de l'indicateur est inférieure ou égale à 4, la *consommation d'énergie* est *élevée* ; si la valeur de l'indicateur est comprise entre 4 et 7, la *consommation d'énergie* est *moyenne* ; si la valeur de l'indicateur est supérieure ou égale à 7, la *consommation d'énergie* est *faible*.

Ces 32 critères de base sont ensuite agrégés, grâce à des règles de décision, en 22 critères d'ordre supérieur jusqu'à un critère unique reflétant la contribution du système de culture au développement durable. Sauf cas particulier, les règles de décision sont une expression intelligible des connaissances et préférences des évaluateurs ; une règle de décision prend la forme suivante : si le critère C_1 est *faible* et le critère C_2 est *élevé* alors le critère agrégé $C_1 \times C_2$ est *moyen* (dans cet exemple, cela revient à considérer que les critères C_1 et C_2 ont la même importance). Les cas particuliers sont les situations où les concepteurs de MASC 1.0 ont considéré que, quels que soient les évaluateurs et le contexte de mise en œuvre de l'évaluation, les connaissances scientifiques du moment rendaient immuables les règles de décision.

Sous forme d'un tableau ou de graphiques, les sorties de MASC 1.0 sont les appréciations portées sur chaque critère, de base comme agrégé. Pour chaque système de culture évalué, cela constitue un profil d'appréciation de ses performances vis-à-vis (i) d'attentes socio-économiques, (ii) de ses impacts sur l'environnement, et (iii) de la pression qu'il exerce sur les ressources non renouvelables. L'outil présente aussi l'intérêt de pouvoir comparer des systèmes de culture entre eux e.g., le système de culture actuel vs. le nouveau système imaginé.

2. Apports méthodologiques pour la conception et l'évaluation multicritère

Au cours des années passées, j'ai été impliqué dans huit projets portant sur la conception et l'évaluation multicritère, abordant des thématiques variées comme les systèmes de culture en agriculture biologique, l'efficacité azotée des systèmes de production ou bien encore, l'autonomie protéique des territoires. Si je me suis attaché à enrichir les connaissances scientifiques dans ces thématiques (ce dont je parlerai dans le chapitre 3), je me suis aussi questionné sur les outils méthodologiques, à disposition du chercheur et des autres acteurs de la recherche, pour répondre aux questions scientifiques de ces différentes thématiques. J'ai ainsi participé à l'amélioration et à la création de nouveaux outils : c'est cette expertise que je partage avec le lecteur dans ce chapitre.

2.1. Comment mieux évaluer les systèmes à bas niveaux d'intrants ?

Je me suis intéressé aux outils pour l'évaluation multicritère des systèmes agricoles à partir de 2008, dans le cadre du projet CASDAR RotAB dont l'un des objectifs était d'analyser les atouts et contraintes de systèmes de culture mis en œuvre dans des exploitations en agriculture biologique en évaluant leurs performances économiques et environnementales. Pour réaliser cette analyse, le recours à un outil d'évaluation multicritère était nécessaire et je me suis rendu compte, grâce à une étude bibliographique exhaustive, qu'il en existait un nombre conséquent et qu'il était difficile de savoir lequel utiliser : **sur quels principes s'appuyer pour retenir un outil d'évaluation multicritère plutôt qu'un autre ?** Répondre à cette question était d'autant plus crucial que les acteurs impliqués dans le projet RotAB exerçaient des métiers différents (chercheurs, conseillers, expérimentateurs) et avaient des attentes et des compréhensions différentes des outils potentiellement disponibles. Au-delà du cadre de ce projet, j'ai donc souhaité apporter une **aide aux évaluateurs dans le choix de l'outil qu'ils auraient à mobiliser pour réaliser une analyse multicritère**. J'ai réalisé une étude comparée des principaux outils pour l'évaluation multicritère qui a débouché sur la proposition d'un **guide permettant de choisir l'outil le plus adapté** aux attentes des utilisateurs (**Carof et al., 2013**).

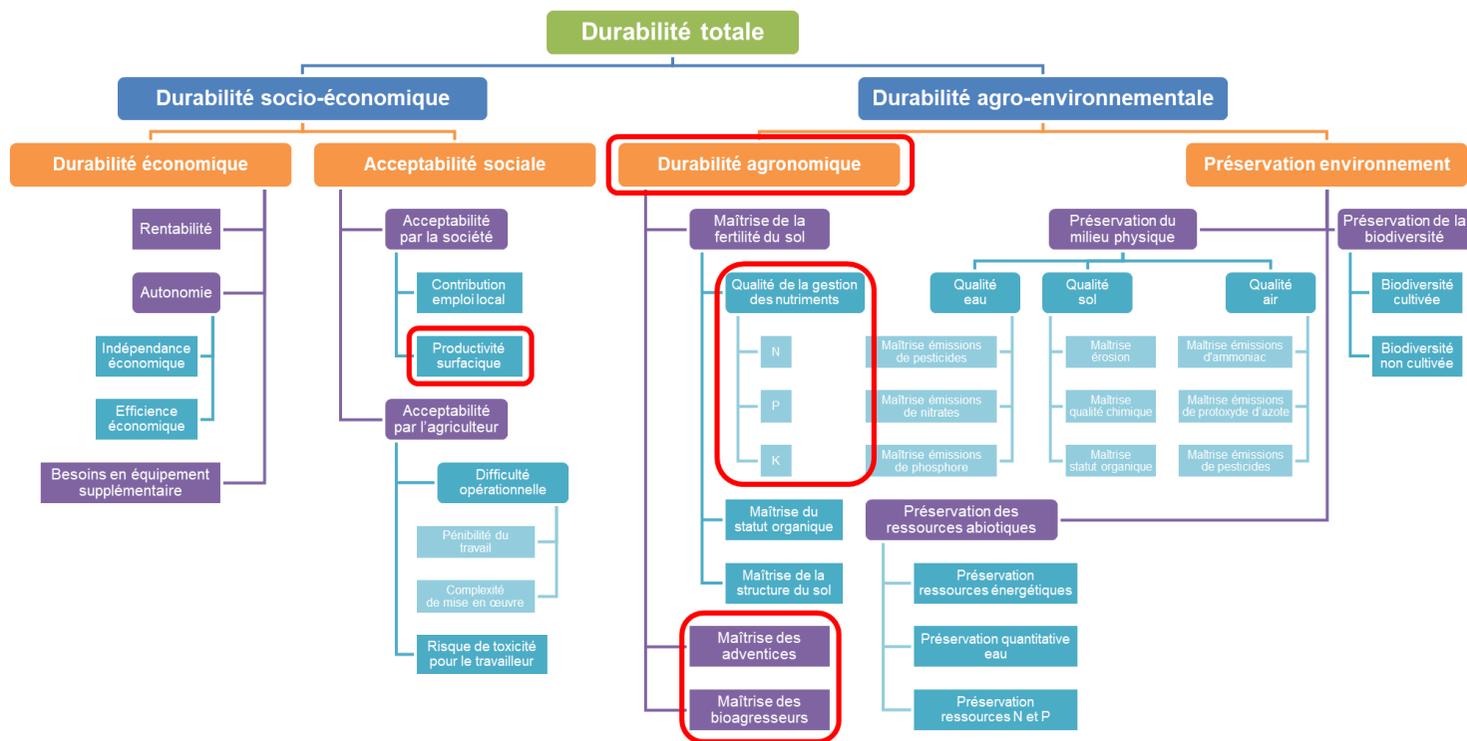
Je ne reviens pas dans ce mémoire sur les différents outils comparés. J'insiste, en revanche, sur notre proposition de considérer six critères pour distinguer les outils les uns des autres : (1) le type de système à évaluer, (2) les échelles spatiale et temporelle de l'évaluation, (3) les dimensions de la durabilité à évaluer (économique, environnementale, sociale), (4) les utilisateurs concernés par les résultats de l'évaluation, (5) la représentation graphique des résultats de l'évaluation, (6) la capacité de l'outil à générer numériquement des systèmes nouveaux. Ces six critères correspondent aux principes que j'évoquais plus haut.

Face à la diversité d'outils disponibles, toujours plus élevée (e.g., Chopin et al., 2021), le guide que j'ai proposé reste plus que jamais nécessaire. Son utilisation se complète ainsi d'initiatives comme MEANS³⁰ ou PLAGE³¹. MEANS est une ressource numérique en ligne de l'INRAE et du CIRAD³² mettant à disposition « des outils de calcul [...] nécessaires à la réalisation

³⁰ MEANS, MulticritEria AssessmeNt of Sustainability

³¹ PLAGE, PLate-forme d'évaluation AGri-Environnementale

³² CIRAD, Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement



N, azote ; P, phosphore ; K, potassium

Figure 5. Cette image est une représentation stylisée de l'outil d'évaluation multicritère MASC-OF (Colomb et al., 2013). Cet outil comporte 30 critères de base et 19 critères agrégés. Les principales différences avec MASC 1.0 sont entourées en rouge. Ainsi, MASC-OF en diffère en subdivisant la durabilité totale en quatre ensembles et non seulement trois (qui correspondaient aux trois dimensions de la durabilité). Le nouvel ensemble qu'est la durabilité agronomique permet d'apprécier la capacité du système de culture à maintenir productive la parcelle cultivée. Aussi, MASC-OF introduit un critère relatif à la productivité surfacique. J'ai créé cette figure pour le cours en ligne « Quelles connaissances scientifiques pour concevoir des systèmes de culture biologiques ? » cf. mon curriculum vitæ, page 20.

d'analyses multicritères » (Auberger *et al.*, 2013) ; le site est accessible à l'adresse <https://www6.inrae.fr/means>. PLAGE est une autre ressource numérique en ligne, multipartenaire, listant les outils d'évaluation multicritère disponibles (Surleau-Chambenoit *et al.*, 2013) ; à l'heure où j'écris ces lignes, le site ne semble malheureusement plus accessible. Le guide peut aussi s'enrichir des propositions d'Arulnathan *et al.* (2020) qui ajoutent des critères supplémentaires *e.g.*, l'objectif précis de l'outil, la disponibilité de l'outil. En revanche, contrairement au guide que j'ai construit, Arulnathan *et al.* (2020) ne retiennent pas l'idée d'un critère relatif aux échelles spatiale et temporelle. Pourtant, **ce critère me paraît indispensable** dès lors que l'on cherche à concevoir des systèmes **durables et résilients**, notamment face aux aléas climatiques : distinguer les outils sur leur capacité à évaluer les systèmes au-delà de leurs limites intrinsèques est nécessaire. J'entends par cette dernière expression, « au-delà de leurs limites intrinsèques », le fait que par définition, un système de culture est limité spatialement, par les parcelles cultivées et temporellement, par la durée de la rotation alors même que certains impacts se manifestent au-delà des parcelles cultivées (*e.g.*, les flux de polluants) et au-delà de la durée de la rotation *e.g.*, la dynamique des matières organiques du sol. En insistant sur le changement d'échelle spatiale et le temps long, je rejoins les considérations de nombreux chercheurs exprimées, par exemple, dans l'un des fronts de science du département AgroEcoSystem³³ de l'INRAE : « évaluer les impacts de la transition agroécologique sur le temps long (effets différés) et à l'échelle globale (effets délocalisés) » (INRAE, 2021b).

Dans le projet RotAB, **l'utilisation du guide avec des conseillers et expérimentateurs avait permis de retenir un outil d'évaluation multicritère, MASC 1.0** (Sadok *et al.*, 2009 ; Encadré 2, page 36). Les concepteurs de cet outil l'ont pensé pour qu'il soit générique *i.e.*, utilisable quels que soient le mode de production, le contexte (pédoclimatique, économique), *etc.* Cependant, au début du projet RotAB, des collègues et moi nous sommes rendus compte que **la généricité de MASC 1.0 limitait son aptitude à évaluer les systèmes de culture à bas niveaux d'intrants**, en particulier ceux de l'agriculture biologique. Nous avons donc repris MASC 1.0 pour l'adapter aux spécificités de ce mode de production, **créant ainsi l'outil MASC-OF³⁴** (Colomb *et al.*, 2013). Cette adaptation a porté sur (Figure 5) :

- La distinction de l'acceptation du système de culture par l'agriculteur de son acceptation par la société. Ce faisant, un **critère de productivité surfacique** a été introduit pour évaluer la capacité des systèmes de culture, en particulier ceux de l'agriculture biologique, à répondre à l'attente sociétale sur la fourniture de biens consommables. Évidemment, un tel critère interpelle et pourrait être mal utilisé, notamment appliqué à des systèmes de culture conventionnels, s'il était interprété comme vantant le « produire toujours plus ». Cela souligne l'importance de **définir rigoureusement et intelligiblement chaque critère** et la manière de l'évaluer. Cela interroge de nouveau sur la **capacité des outils génériques à s'adapter au contexte de l'évaluation**. Cela soulève, enfin, la question de la **pertinence de vouloir comparer des systèmes trop différents** dans leurs objectifs et leur constitution.

³³ AgroEcoSystem, Agronomie et science de l'environnement pour les agroécosystèmes

³⁴ Multi-attribute Assessment of the Sustainability of Cropping systems - Organic Farming

- L'ajout d'un ensemble de critères relatifs à la **durabilité agronomique** des systèmes de culture *i.e.*, la **capacité des systèmes de culture à conserver, au cours du temps, le potentiel productif des parcelles**. La durabilité agronomique se décompose en critères de maîtrise (i) de la qualité du sol, (ii) des adventices, et (iii) des autres bioagresseurs. La proposition de ces critères, entièrement nouveaux pour ceux relatifs aux adventices et autres bioagresseurs, fut l'occasion de mettre au point, avec les conseillers et expérimentateurs, des « **schémas d'expertise dirigée** » (**Colomb et al., 2011**). De quoi s'agit-il ? Lorsque des indicateurs simples ou validés scientifiquement n'ont pas été trouvés, nous avons construit des mini-outils d'évaluation sur le même principe que l'outil général. Par exemple, la maîtrise des adventices, critère de base de MASC-OF, s'évalue en renseignant, dans un outil similaire à ce dernier, « à dire d'expert », (i) l'état initial d'enherbement de la parcelle, et (ii) la pression exercée sur les adventices par le système de culture. Cette pression est elle-même évaluée en considérant (i) le respect du principe d'alternance entre cultures d'été, d'hiver et de printemps, et (ii) le « caractère nettoyant » des cultures et des intercultures. Je retiens un intérêt fort de ces schémas d'expertise dirigée : sur des aspects complexes de l'évaluation, ils permettent de **prendre en compte explicitement et de manière transparente les avis d'experts**.
- La proposition de **valeurs-seuils adaptées aux systèmes de culture de l'agriculture biologique**. Le lecteur comprendra aisément que pour un critère comme la rentabilité, renseignée par la marge brute, les valeurs-seuils sont sensiblement différentes, par exemple, entre des systèmes de culture conventionnels et des systèmes de culture de l'agriculture biologique.

J'ajoute que pour la construction de MASC-OF, nous avons mis en œuvre une **analyse de sensibilité** pour étudier la capacité de l'outil à distinguer les systèmes de culture sur le critère de durabilité totale (les premiers résultats de cette analyse nous ont d'ailleurs conduit à revoir un certain nombre de règles de décision insuffisamment discriminantes).

Ces nombreuses avancées ont participé à l'élaboration d'une version 2.0 de MASC (Craheix *et al.*, 2012), disponible en ligne gratuitement (<http://wiki.inra.fr/wiki/deximasc/Main/>). MASC 2.0 comprend un critère agrégé de « capacité productive à long terme » et un critère de base « fourniture de matières premières », hérités de nos réflexions.

2.2. Comment comparer plus justement des systèmes entre eux ?

Dans la partie précédente, j'interpelle le lecteur sur la pertinence de vouloir comparer des systèmes trop différents, dans leurs objectifs et leur constitution, tant cela est difficile à réaliser avec justesse : **comment tenir compte effectivement des spécificités des uns et des autres quand l'évaluation est mise en œuvre sur une base commune ?** J'entends par « base commune » le recours aux mêmes critères et indicateurs quel que soit le système évalué, l'utilisation de références obtenues selon le même protocole pour tous les systèmes évalués, *etc.* Cette base commune est le seul moyen rigoureux pour comparer les systèmes entre eux et, éventuellement, les trier les uns par rapport aux autres pour retenir les systèmes les mieux à même de satisfaire les objectifs assignés. Pourtant, **cette base commune est souvent mal adaptée pour évaluer les systèmes émergents et même, les systèmes**

existants mais profondément différents de ceux dominants : ceci s'explique soit parce que les indicateurs ont été conceptualisés et validés pour les systèmes dominants soit parce que les systèmes émergents sont, par essence, insuffisamment documentés. Aussi les critères retenus pour l'évaluation évoluent-ils avec les connaissances scientifiques, les préoccupations sociétales et donc les objectifs assignés aux systèmes : par exemple, jusqu'à un passé récent, évaluer l'autonomie ou la résilience des systèmes n'était pas aussi nécessaire que cela l'est aujourd'hui, du moins pour les systèmes présents dans les territoires d'élevage intensif³⁵.

Si j'avais déjà effleuré cette question de la comparaison de systèmes différents dans mon travail sur les systèmes de culture en agriculture biologique (cf. la partie précédente, 2.1), j'y ai particulièrement prêté attention lors de mon premier co-encadrement d'un étudiant en thèse, Olivier Godinot, sous la direction de Philippe Leterme. Pourtant, initialement, l'objectif que nous avons ambitionné pour cette thèse n'était pas de répondre à cette question. Il s'agissait de **concevoir des systèmes de production** potentiellement innovants, agroécologiques, **qui optimiseraient les flux d'azote en ayant recours à des légumineuses produites localement**. D'où venait cet objectif (toujours d'actualité) ? L'azote est l'un des principaux facteurs limitant la production agricole. Pour remédier à cette limitation, les agriculteurs usent de plusieurs leviers et ainsi, cet élément entre dans les systèmes de production par différentes voies (fixation symbiotique, engrais minéraux, aliments du bétail), en quantités importantes et croissantes ces dernières décennies. Cependant, son efficacité d'utilisation par les cultures et les animaux est faible, l'efficacité étant « le rapport entre un résultat et les ressources utilisées pour y parvenir » (Allwood *et al.*, 2013 cités par **Godinot *et al.*, 2020**). Une large part de l'azote apporté s'accumule donc dans divers compartiments environnementaux (cf. la notion de « cascade de l'azote »), entraînant de multiples problèmes écologiques et sanitaires (Peyraud *et al.*, 2012). Comme le suggèrent Sutton *et al.* (2011), **améliorer l'efficacité de l'azote en agriculture** est donc une piste prometteuse pour réduire ces problèmes. Une voie d'amélioration peut être de proposer des systèmes de production optimisant les flux d'azote grâce à des légumineuses produites localement. Ce qui rend les légumineuses particulièrement intéressantes, c'est la production jointe³⁶ de deux services écosystémiques, sans apport d'engrais azoté :

- Le service d'approvisionnement par la production de parties aériennes riches en protéines utilisables en alimentation animale en remplacement des aliments importés de pays tiers (Voisin *et al.*, 2014) ;
- Le service de régulation des stress abiotiques par la production de résidus riches en azote qui fournissent cet élément nutritif aux cultures implantées après les légumineuses (Watson & Stoddard, 2017).

C'est en réfléchissant à expérimenter virtuellement, grâce au modèle MELODIE (Faverdin *et al.*, 2011), des systèmes de production contrastés en termes de sources et flux d'azote que nous nous sommes interrogés sur la manière de les comparer du point de vue de

³⁵ J'en dis plus sur l'évaluation de l'autonomie (protéique) dans la partie 3.2 du bilan de mes activités de recherche (page 59) ; je parle de l'évaluation de la résilience dans mon projet scientifique (page 67).

³⁶ En micro-économie, la production jointe est la fourniture d'au-moins deux produits à partir d'un seul intrant. J'emploie volontairement ce terme dès à présent car il est au cœur de travaux que j'ai menés avec des économistes et que je présente plus loin dans ce mémoire.

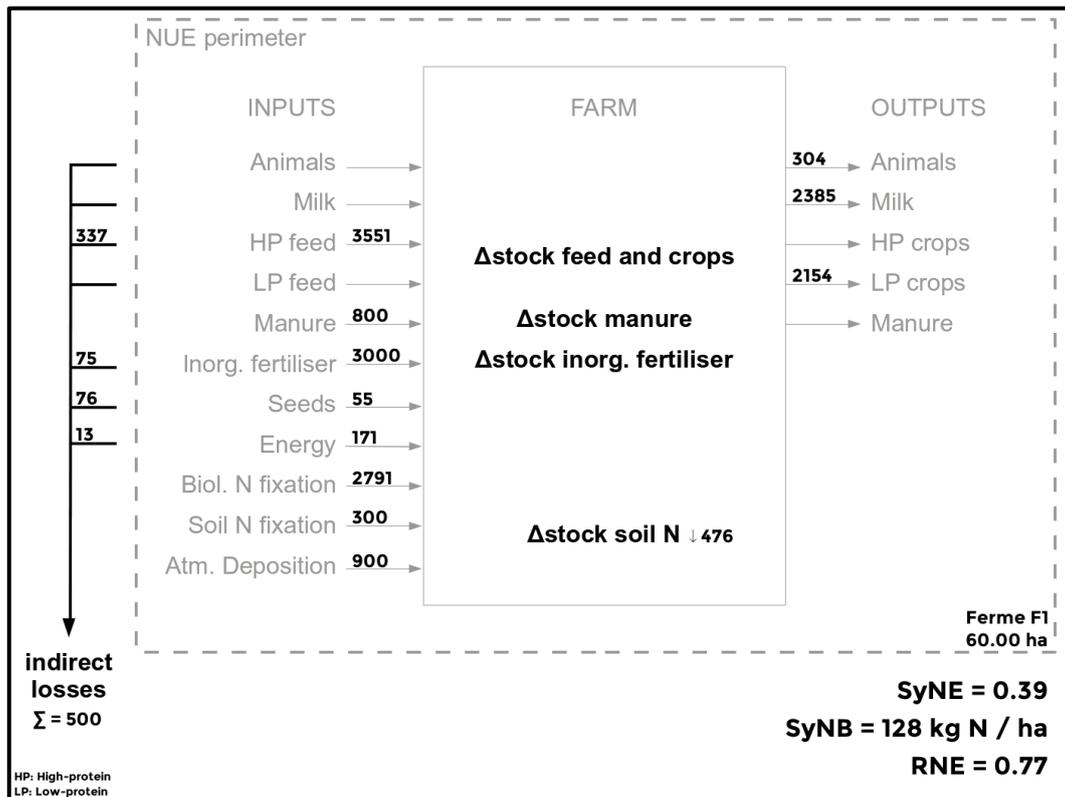


Figure 6. Trois nouveaux indicateurs relatifs aux flux d'azote ont été proposés dans **Godinot et al. (2015, 2014)** : SyNE, SyNB et RNE. Non décrit dans le corps du texte, SyNB, System Nitrogen Balance, est un indicateur de pression azotée améliorant le classique bilan apparent de l'azote (Coppenet, 1975 ; Simon & Le Corre, 1992) sur les mêmes aspects que ceux détaillés pour l'indicateur SyNE.

Le périmètre de l'indicateur NUE, classiquement utilisé pour étudier l'efficacité de l'azote, apparaît en traits gris pointillés alors que le périmètre des nouveaux indicateurs apparaît en trait continu noir. Cette image, fournie par le calculateur en ligne SyNE (<https://nefficiencycalculator.fr> ; **Carof & Godinot, 2018a**), illustre les flux et stocks d'azote et le calcul de ces trois indicateurs pour une exploitation, nommée « Ferme F1 », de 60 ha, produisant 450 000 L de lait avec 45 vaches laitières et leur suite. Sur 17 ha, l'exploitation produit et vend du blé tendre d'hiver ainsi que du miscanthus ; les autres surfaces de l'exploitation sont dédiées à l'alimentation des animaux (luzerne, maïs, prairies). Les principaux intrants sont (i) de l'engrais minéral et du lisier de porcs, pour la fertilisation des cultures, et (ii) du tourteau de colza, du tourteau de soja et de l'urée, pour l'alimentation des animaux. Tous les flux et stocks sont exprimés en kg N ha^{-1} .

leur efficacité. Nous nous sommes alors rendus compte que l'indicateur d'efficacité de l'azote classiquement utilisé (NUE³⁷) présentait plusieurs inconvénients ; pour pallier cela, **nous avons développé un nouvel indicateur, SyNE³⁸** (Figure 6) (Godinot *et al.*, 2014). Quelles sont les améliorations apportées³⁹ ; quels enseignements en tirer pour la comparaison de systèmes ?

- L'indicateur SyNE prend en compte **les pertes azotées liées à la fabrication et au transport des intrants** (grâce à des données d'analyse de cycle de vie) et les affecte à l'exploitation acheteuse. En considérant les transferts de pollution qui surviennent lors de l'externalisation de la production d'intrants, **la comparaison de systèmes de production qui nécessitent beaucoup d'intrants vs. ceux qui sont plus autonomes est beaucoup plus pertinente**. Cette amélioration méthodologique est loin d'être négligeable : classiquement (*i.e.*, avant le développement de l'indicateur SyNE), « les agriculteurs qui font le choix d'acheter des aliments du bétail [plutôt que de les produire] ne se voient pas attribuer les impacts associés à cette production : jusqu'à 40 % des pertes de nitrate et 50 % de celles de protoxyde d'azote sont ainsi ignorées car elles adviennent à l'extérieur de l'exploitation » (Godinot *et al.*, 2020).
- L'indicateur SyNE intègre **les variations du stock d'azote du sol** par modélisation, ce qui n'était jamais fait jusqu'à présent. Avec SyNE, nous nous affranchissons du postulat que la matière organique du sol est à l'équilibre, postulat qui « améliore artificiellement l'efficacité des systèmes qui appauvrissent les sols, diminue l'efficacité de ceux qui les enrichissent » (Godinot *et al.*, 2020). **La comparaison de systèmes de production ayant des stratégies d'amélioration de la qualité du sol différentes est maintenant possible**, ce qui est utile pour répondre à des préoccupations comme l'initiative « 4 pour 1000 » (Minasny *et al.*, 2017).
- L'indicateur SyNE est **exhaustif dans les flux d'azote considérés** alors que les auteurs mobilisant l'indicateur NUE négligent pour la plupart les flux dus à la fixation symbiotique, à la fixation libre et aux dépôts atmosphériques parce qu'ils sont difficiles à estimer. Quand on veut considérer, dans des démarches de conception, la multitude des manières de produire, **comptabiliser l'ensemble des flux est une nécessité à laquelle l'indicateur SyNE répond**.

Malgré tous ces apports méthodologiques, l'indicateur SyNE ne permet pas de comparer des systèmes ayant des productions très différentes *e.g.*, ceux orientés vers la production de lait vs. ceux orientés vers la production de végétaux. Ceci s'explique par l'efficacité de l'azote intrinsèquement plus faible des animaux par rapport aux végétaux ; et même au sein de chacun de ces groupes, des différences existent *e.g.*, les porcs sont plus efficaces que les bovins. Nous avons donc proposé **l'indicateur RNE⁴⁰ pour permettre la comparaison de l'efficacité de l'azote entre exploitations agricoles dont les proportions de productions animales et végétales diffèrent** (Godinot *et al.*, 2015). Pour chaque système de production, nous avons montré qu'il était possible de calculer une efficacité optimale d'utilisation de

³⁷ NUE, Nitrogen Use Efficiency

³⁸ SyNE, System Nitrogen Efficiency

³⁹ Je ne détaille pas, dans ce mémoire, toutes les améliorations *e.g.*, la correction d'un biais arithmétique par le calcul de flux nets et le statut des effluents d'élevage systématiquement considérés comme une entrée d'azote.

⁴⁰ RNE, Relative Nitrogen Efficiency

Encadré 3. Brève description du modèle bioéconomique SYNERGY

Un modèle bioéconomique maximise (ou minimise) une fonction objective sous un ensemble de contraintes techniques et structurelles. Pour le territoire Bretagne – Pays de la Loire, le modèle SYNERGY, pour cross-Scale model using complementarity between livestock and crop farms to enhance regional nitrogen self-sufficiency, maximise le profit en considérant, dans chacun des neuf départements, trois types d'exploitations possibles *i.e.*, des exploitations spécialisées en production de bovins laitiers, en production porcine, en grandes cultures. Chaque type représente la population totale des exploitations d'un département.

À partir d'un scénario de prix et/ou de montants d'aides publiques et/ou d'injonctions à produire telle ou telle espèce végétale, *etc.*, le modèle conçoit des évolutions possibles de ces exploitations, partant de la situation initiale *i.e.*, une représentation du territoire, fidèle à la réalité, avant la mise en œuvre du scénario. Par type et département, ces évolutions sont des modifications de surface, du nombre d'animaux produits, des masses de végétaux produits, *etc.* Les résultats obtenus sont ensuite agrégés au niveau territorial.

l'azote : l'indicateur RNE est alors le rapport entre l'indicateur SyNE et cette efficacité optimale. Au-delà de la comparaison entre systèmes, l'indicateur RNE renseigne aussi sur la « marge de progrès » du système de production évalué.

Une fois ces indicateurs validés, j'ai développé, avec Olivier Godinot, recruté comme maître de conférences à l'Institut Agro après sa diplomation, un **outil en ligne, accessible gratuitement**, permettant leur calcul (<https://nefficiencycalculator.fr> ; Carof & Godinot, 2018a). Sans doute aidés de nos implications en enseignement, l'idée à l'origine de cet outil est que **la conception d'un indicateur ne doit pas s'arrêter à la prise en compte de sa seule pertinence scientifique mais doit aussi considérer ses usages possibles**. Or, les usages que nous avons envisagés pour ces nouveaux indicateurs ne seront possibles que si les utilisateurs se les approprient : pour cela, un outil simple, calculant ces indicateurs et présentant les résultats sous forme claire et synthétique, est une réalisation justifiée. À l'heure où j'écris ce manuscrit, l'outil est utilisé par 127 personnes pour 103 systèmes de production renseignés ; les utilisateurs sont des scientifiques de divers organismes (e.g., INRAE, Grandes écoles, Universités étrangères), des agents de Chambres d'agriculture ou d'instituts techniques, des étudiants en stage. Dans quelques temps, je souhaiterais interroger tous ces utilisateurs pour comprendre ce que leur apporte l'outil et identifier des évolutions possibles. D'ores et déjà, je sais qu'il faudrait qu'il puisse prendre en compte les productions de porcs et de volailles (actuellement, il accepte seulement les productions de bovins, en plus des productions végétales) (Carof & Godinot, 2018a).

Pour ce premier co-encadrement de thèse, nous n'avons finalement pas pu pousser la réflexion jusqu'à la conception de systèmes de production parce que conceptualiser et valider de nouveaux indicateurs demandent du temps. Toutefois, le calcul de ces indicateurs sur quelques systèmes de production (Carof & Godinot, 2018b ; Godinot *et al.*, 2014) a produit des évaluations contrastées, depuis des systèmes peu efficaces et largement excédentaires en azote jusqu'à des systèmes efficaces et raisonnablement excédentaires en azote. Un tel contraste questionne la possibilité de concevoir des systèmes plus vertueux, ce à quoi j'ai réfléchi lors de la deuxième thèse que j'ai co-encadrée, comme le lecteur le lira ci-dessous.

2.3. Comment intégrer la diversité des systèmes dans un modèle bioéconomique ?

Agronomie et économie agricole sont deux disciplines scientifiques intimement liées, pas seulement parce qu'elles partagent les mêmes objets d'étude e.g., le système de culture et le système de production. À ce propos, il est amusant de relever que lors de travaux de la SFER⁴¹ datés de 1949 pour aboutir à une définition partagée de l'économie agricole⁴², une approche historique convoque les écrits d'Olivier de Serres pour définir l'économie agricole comme « l'étude des techniques qui assurent la prospérité de l'entreprise agricole » (Augé-Laribé, 1949) ! Au-delà de cette anecdote, ces deux disciplines se retrouvent particulièrement dans une démarche de conception de systèmes, dès que l'on aborde (i) **l'évaluation multicritère des systèmes dans les trois dimensions de la durabilité**, et (ii) **les effets économiques**

⁴¹ SFER, Société Française d'Économie Rurale

⁴² J'emploie l'expression « économie agricole » plutôt qu'« économie rurale », la seconde pouvant dépasser le strict cadre de l'agriculture.

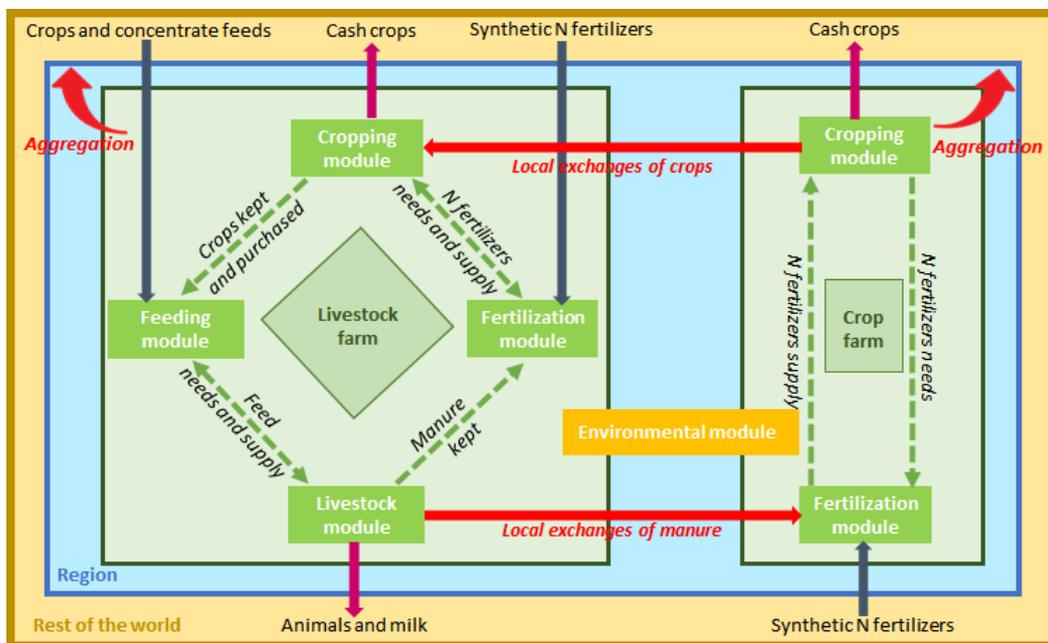


Figure 7. Dans chaque exploitation, le module « cultures » (cropping module) du modèle SYNERGY permet de produire jusqu'à 12 cultures différentes au sein de 60 rotations et, pour chaque culture, calcule la quantité produite, la quantité vendue localement, la quantité vendue sur le marché international. Le module « fertilisation » (fertilization module) détermine la quantité d'azote nécessaire à chaque culture ainsi que la source, pour compléter les besoins non satisfaits par le milieu : azote provenant des effluents de l'exploitation (le cas échéant), azote importé des effluents des exploitations spécialisées en productions animales, azote acheté sur le marché international. Ce module établit aussi la quantité d'effluents produits dans chaque exploitation spécialisée en productions animales. Le module « élevage » (livestock module), dans les exploitations concernées, calcule la quantité de lait produit ainsi que sa qualité (pour les exploitations spécialisées en bovins laitiers), le nombre d'animaux gardés, le nombre d'animaux et de produits animaux vendus sur le marché international. Dans le module « alimentation » (feeding module) des exploitations spécialisées en productions animales, les bovins peuvent être nourris grâce à 25 rations différentes (à base de maïs, à base d'herbe ; avec ou sans tourteau de soja, avec d'autres légumineuses, etc.) ; les porcs, eux, peuvent être nourris grâce à quatre rations (l'une avec du tourteau de soja, l'autre avec un mélange de féverole et de pois). Ce module détermine si les aliments proviennent de l'exploitation, s'ils sont achetés localement, s'ils sont achetés sur le marché international ; il calcule alors l'autonomie protéique de l'exploitation. Le module « environnement » (environmental module) calcule, pour chaque exploitation, deux indicateurs relatifs à l'azote : SyNB, pour estimer les pertes potentielles en azote ; SyNE, pour estimer l'efficacité azotée. Ce schéma est extrait de l'article de **Jouan et al. (2020c)**.

contraignant ou facilitant les changements de systèmes.

C'est d'abord par l'enseignement que je me suis rapproché de cette discipline en construisant avec Aude Ridier, Professeure en économie, un module sur le fonctionnement de l'exploitation agricole qui comporte, entre autres, un travail dirigé sur l'évaluation multicritère d'itinéraires techniques. De nos échanges est ensuite née l'idée de réunir, en recherche, nos compétences pour la conception de systèmes agricoles : Aude apportait les concepts et outils économiques pour construire des alternatives aux systèmes actuels ; j'apportais les concepts et connaissances agronomiques pour rendre ces alternatives crédibles, tout en intégrant une diversité de productions végétales, et qu'elles soient évaluées non seulement sur leurs impacts économiques mais également sur leurs impacts environnementaux. C'est ainsi que nous avons coordonné un *workpackage* du projet TERUnic, de 2016 à 2020. Dans l'optique d'améliorer l'autonomie protéique des élevages, ce *workpackage* portait sur la conception de systèmes agricoles (exploitation, territoire) favorables à l'insertion de légumineuses, en Bretagne et Pays de la Loire, et leur évaluation économique et environnementale. C'est dans ce cadre qu'a été financée la thèse interdisciplinaire, agronomie – économie, de Julia Jouan.

Si j'expose des résultats de cette thèse des pages 59 à 61 (Chapitre 3), je développe ici les apports méthodologiques qu'elle a permis. En effet, pour atteindre l'objectif fixé, nous avons été amené à **produire un modèle bioéconomique, SYNERGY** (Encadré 3, page 44 ; Figure 7) (**Jouan et al., 2020c, 2020b**). Ma contribution à ce modèle a d'abord été de répondre à la question suivante : **comment mieux prendre en compte la diversité des systèmes de culture dans la nécessaire évaluation économique de systèmes agricoles ?** Dans les contextes pédoclimatiques du modèle et dans la limite des cultures que nous souhaitons modéliser, j'y ai répondu **en construisant des rotations « agronomiquement faisables »**, pour reprendre l'expression de Bachinger & Zander (2007). La liste de rotations ainsi proposée va de rotations très peu diversifiées (deux espèces seulement) jusqu'à des rotations plus diversifiées (quatre espèces, dont deux légumineuses, sur huit années), en tenant compte des concepts agronomiques tels que la fréquence de retour des cultures. Pour chaque culture de chaque rotation, je me suis aussi attaché à ce que le modèle SYNERGY représente correctement la fertilisation azotée des cultures (le modèle devant être utilisé pour concevoir des systèmes de production et des territoires avec une meilleure autonomie protéique (cf. la partie 3.2, page 59), c'était une nécessité). Pour cela, j'ai estimé les besoins des cultures et les valeurs des différentes sources d'azote en mobilisant les références du COMIFER⁴³ et mon expertise ; cela a notamment permis de considérer les « effets précédents – sensibilités des suivants ». Finalement, avec les contraintes de chaque scénario simulé, le modèle choisit ensuite les rotations qui participeront, directement ou non, à la maximisation du profit.

Une autre forte implication de ma part dans la construction du modèle est l'**intégration d'un module environnemental** calculant, pour chaque exploitation et pour le territoire, les pertes potentielles en azote et l'efficacité azotée grâce aux indicateurs présentés dans la partie précédente. Ce modèle ne se contente donc pas d'évaluer les conséquences de scénarios sur l'aspect économique (profit) et sur l'aspect technique (autonomie protéique) mais aussi sur l'aspect environnemental (pertes potentielles en azote, efficacité azotée). Ceci est

⁴³ COMIFER, Comité Français d'Étude et de Développement de la Fertilisation Raisonnée

particulièrement intéressant lorsque l'on s'intéresse à des cultures de diversification comme les légumineuses.

2.4. Conclusion du chapitre

Qu'ils soient construits *ex nihilo* (le modèle SYNERGY) ou le fruit d'une amélioration (l'outil MASC-OF, l'indicateur SyNE et ses dérivés), j'ai participé à l'émergence d'outils utiles pour les démarches de conception. Une de leur force commune est de **considérer la complexité de systèmes à bas intrants et diversifiés lors de l'évaluation (l'outil MASC-OF, l'indicateur SyNE) ou de la conception (le modèle SYNERGY)**. En ce sens, je contribue bien à l'agronomie dont l'une des caractéristiques est de prendre en compte la complexité des systèmes agricoles (Doré *et al.*, 2006). Une autre de ses caractéristiques est sa capacité à « monter en généralité », ce qu'ont fait (et font) les grands auteurs de cette discipline. Cependant, ceci ne doit pas se faire au détriment des spécificités locales (techniques, pédoclimatiques, *etc.*) : je ne dis pas que ceci s'est produit dans les faits mais plusieurs échanges que j'ai eus avec des acteurs agricoles, dont des agriculteurs, me laissent penser qu'ils ont pu le percevoir ainsi. C'est une des raisons pour lesquelles j'ai souhaité que les outils auxquels j'ai contribué intègrent explicitement des spécificités techniques ; je rejoins en cela des préoccupations récemment mises en avant par la communauté agronomique qui souhaite « travailler sur des systèmes agricoles plus complexes, dépendant davantage de processus écologiques que d'intrants de synthèse, et donc caractérisés par des spécificités locales fortes (par ex. pédoclimat) » (INRAE, 2021b). Dans le chapitre suivant, je montre comment j'y concours, non plus sur l'aspect méthodologique, mais sur l'aspect cognitif.

Je souligne enfin que j'ai essayé, le plus possible, de rendre accessible à tous les acteurs agricoles les résultats de mes travaux : outils gratuits (certains en ligne), données produites accessibles dans des *data papers*, *etc.*

3. Connaissances nouvelles sur les systèmes de culture

Depuis mon implication dans la recherche agronomique, une part importante de mon temps a été consacrée à renforcer et partager les connaissances sur les systèmes de culture, particulièrement ceux d'exploitations avec élevage dans des territoires contraints dans leur gestion de l'azote (Bretagne, Pays de la Loire). Dans ce chapitre, je propose au lecteur quelques travaux marquants, à mon sens, sur les thématiques suivantes : la diversité⁴⁴ des cultures, l'autonomie protéique des élevages, les innovations techniques.

3.1. Des pistes techniques et économiques pour favoriser la diversité cultivée

Dans leur étude sur les freins et leviers à la diversification des cultures, Meynard *et al.* (2013b) détaillent les multiples facteurs ayant conduit, depuis les années 1950, à la spécialisation des exploitations et des territoires en France, par exemple : le soutien des prix de certaines cultures, l'usage facilité de produits de synthèse, la concentration des industries de transformation dans certaines régions, le souhait de réduire la pénibilité du travail. Cette spécialisation a entraîné une diminution de la diversité des cultures, responsable pour partie de dégradations environnementales telles que la réduction de la biodiversité, la simplification des paysages, la contamination des eaux, l'émission de gaz à effet de serre ou la baisse de la qualité des sols. À l'inverse, la diversification des cultures (*i.e.*, le choix d'augmenter le nombre d'espèces cultivées sur une surface donnée (Gaba *et al.*, 2015)) présente plusieurs atouts qui devraient favoriser l'émergence de nouvelles productions végétales : la méta-analyse de Beillouin *et al.* (2021) identifie comme avantages principaux l'augmentation de la biodiversité associée et la meilleure fourniture de services écosystémiques *e.g.*, la régulation de la qualité de l'eau et des bioagresseurs. Pourtant, Meynard *et al.* (2013a) citent les éléments suivants comme autant de freins au développement des cultures de diversification : « (i) un progrès génétique moins rapide que sur les « grandes espèces » ; (ii) un manque de solutions en protection des cultures ; (iii) un déficit de références techniques sur les espèces mineures ; (iv) la concurrence avec les « grandes espèces » sur le marché des matières premières, et (v) la diversité des modes de coordination entre les acteurs des filières ».

J'ai contribué à cette thématique en conduisant plusieurs **diagnostics sur la diversité des cultures et sur les leviers à mobiliser pour la favoriser**. Pour mener à bien ces diagnostics, présentés ci-dessous, j'ai choisi de faire des enquêtes auprès d'agriculteurs afin que ces derniers décrivent leurs systèmes de production et de culture et qu'ils expriment leurs opinions sur la diversification des cultures dans leurs systèmes.

3.1.1. Les oléagineux dans les systèmes de culture

Deux études en partenariat avec le CETIOM⁴⁵ (aujourd'hui, Terres Inovia) m'ont permis d'interroger plus particulièrement le rôle des oléagineux comme cultures de diversification. Un premier diagnostic a ainsi concerné l'état des lieux de la diversité des cultures et des perspectives de diversification en Vendée ; il a été réalisé grâce à 44 entretiens d'agriculteurs

⁴⁴ Je fais une distinction entre « diversité » et « diversification ». La diversité est un état (de ce qui est divers) alors que la diversification est l'action conduisant à une plus grande diversité *cf.* Hufnagel *et al.* (2020).

⁴⁵ CETIOM, Centre Technique Interprofessionnel des Oléagineux Métropolitains

Tableau 2. Les freins et atouts pour les cultures de diversification, selon 44 agriculteurs enquêtés en Vendée, diffèrent d'une culture à l'autre mais certains arguments reviennent plus fréquemment comme la méconnaissance des cultures par les agricultures eux-mêmes (frein associé à cinq des neuf cultures), les bénéfices de la culture de diversification pour la culture suivante (atout associé à quatre des neuf cultures) et l'existence d'un conseil disponible localement (atout associé à quatre des neuf cultures) (**adapté de Merrien et al., 2013**).

Culture	Freins	Atouts
Betterave (fourragère)	Conseil peu disponible Exigence en mécanisation Méconnaissance de la culture	Sécurité alimentaire de l'élevage
Chanvre	Méconnaissance de la culture	Contractualisation avec l'organisme stockeur Culture productive Pas d'exigence phytosanitaire Peu de travail
Colza	Culture complexe et exigeante en intrants Effet négatif sur les réseaux de drainage Peu d'intérêt en élevage Surcharge de travail	Effet précédent Étalement des travaux par rapport aux céréales
Légumes	Irrigation indispensable Surcharge de travail	
Lin	Chantier de récolte compliqué Méconnaissance de la culture	Conseil disponible Peu de travail
Lupin	Culture peu robuste Méconnaissance de la culture	Effet précédent Source de protéines pour l'élevage
Luzerne	Culture peu productive Surcharge de travail	Conseil disponible Effet précédent Peu de travail
Pois, Féverole	Méconnaissance de la culture	Conseil disponible Effet précédent Source de protéines pour l'élevage
Tournesol	Dégâts d'oiseaux	Conseil disponible Culture moins soumise aux bioagresseurs

et à l'aide d'un groupe d'étudiants, en 2011 (**Merrien et al., 2013**). L'analyse de ces entretiens a permis de mettre en évidence la **dominance d'un faible nombre d'espèces** (cinq espèces seulement représentaient plus de 80 % de la sole : le blé tendre, les prairies⁴⁶, le maïs, le tournesol et le colza). En conséquence, les rotations communiquées par les agriculteurs étaient des « **rotations courtes**⁴⁷ » (durée moyenne : 3,8 ans), construites pour la plupart avec du blé tendre. L'enquête réalisée par le SSP⁴⁸ au même moment, sur la France entière, insistait sur la place prééminente du blé tendre dans les rotations (Agreste, 2014).

Malgré la faible diversité cultivée, **peu d'agriculteurs enquêtés envisageaient de l'augmenter**. En nous basant sur les raisons expliquant le rejet des cultures de diversification (Tableau 2), nous avons conclu, à l'époque, que « *promouvoir une diversification des cultures ne pourra se faire que par une **information approfondie sur les avantages agronomiques et les résultats économiques de ces cultures** ; à ce titre, le rôle des partenaires techniques et économiques des producteurs est [...] déterminant* » (**Merrien et al., 2013**). Cette conclusion reste actuelle ; la question est de savoir comment acquérir, rapidement et rigoureusement, cette information approfondie, comment l'utiliser pour concevoir des systèmes de culture (très) diversifiés et comment communiquer efficacement aux agriculteurs les systèmes conçus. Le projet scientifique que je propose apporte des éléments de réponse à cette question *cf.* les pages 71 à 79.

L'autre diagnostic mené avec le CETIOM, en 2013, avait pour objectif d'identifier les leviers à actionner pour augmenter les surfaces en lin oléagineux en France, les besoins de la filière étant estimés à 30 000 ha vs. 20 000 ha assolés habituellement. L'enquête réalisée par un groupe d'étudiants auprès de 47 agriculteurs basés dans l'Ouest de la France (principalement en Loire-Atlantique et Vendée) aboutissait à des **observations similaires à celles présentées supra (Carof et al., 2015)** :

- La diversité des cultures est très faible.
- Une large majorité des rotations sont très courtes à courtes (durée moyenne : 3,3 ans).
- Le blé est présent dans toutes les rotations de deux ans et plus.
- Cinq espèces (blé, colza, lin, maïs, tournesol) suffisent pour décrire la quasi-totalité des rotations rencontrées.

Au-delà de ces observations qui complètent nos connaissances sur les systèmes de culture, j'insiste ici sur l'approche originale que nous avons mobilisée dans ce travail : **analyser les réactions d'agriculteurs face à des scénarios contextuels** *i.e.*, une situation hypothétique d'évolution du contexte technique, économique, *etc.* décrite en détail aux répondants. Dans notre cas, les scénarios concernaient l'introduction (ou l'expansion) du lin dans les exploitations françaises. À titre d'illustration, l'un des trois scénarios proposés dans l'enquête, le scénario dit « agronomique », est présenté. Ce scénario permet de tester si la connaissance des avantages agronomiques du lin et la solution des problèmes techniques liés à la culture (innovations et diffusion) seraient des conditions suffisantes au développement de la culture.

⁴⁶ Bien évidemment, une prairie n'est pas une espèce *stricto sensu* mais nous avons fait cette simplification compte-tenu de l'étude qui portait sur la diversification des cultures annuelles.

⁴⁷ Dans la séance publique de l'Académie d'Agriculture du 15 mai 2019, une rotation est dite (i) « très courte » lorsqu'elle dure moins de trois ans, (ii) « longue », lorsqu'elle dure quatre à huit ans et (iii) « très longue », lorsqu'elle dure plus de huit ans (Viaux, 2019).

⁴⁸ SSP, Service de la Statistique et de la Prospective du ministère en charge de l'Agriculture

Tableau 3. 46 des 47 agriculteurs enquêtés ont classé les trois scénarios proposés du plus (Rank 1) au moins (Rank 3) favorable à l'introduction du lin oléagineux dans les exploitations (ou à son augmentation surfacique dans celles en cultivant déjà). Ce tableau est repris de Carof et al. (2015).

Scenario	Short description	Rank 1	Rank 2	Rank 3
Economic	<ul style="list-style-type: none"> • Payment of gross margin compensation by authorities • Conditions for payment: <ul style="list-style-type: none"> - at least four different crops on the farm - lower use of pesticides and nitrogen fertilisers on oilseed flax 	37%	30%	33%
Agronomic	<ul style="list-style-type: none"> • Better information about agronomic advantages of oilseed flax ("rotation effects", "break-crop benefits") • Highlighting solutions to overcome crop management difficulties e.g., wide range of cultivars, new pesticides, new harvest equipment, relevant technical advice 	43%	28%	28%
Alternative	<ul style="list-style-type: none"> • Oilseed flax as a valuable alternative to conventional crops if they become difficult to grow 	20%	41%	39%

Il est formulé comme suit :

« Les progrès de la R&D vous assurent des variétés adaptées à votre contexte, des molécules permettant de contrôler verse et bioagresseurs et des matériels assurant des récoltes sans problèmes majeurs. Les effets précédents de la culture du lin sur la céréale qui suit sont bien démontrés et incitatifs. Par ailleurs, la filière et les partenaires économiques (organismes stockeurs, négociés) ont mis en place un appui personnalisé et immédiat pour répondre efficacement à vos problèmes. »

L'analyse des réactions des enquêtés aux scénarios a d'abord montré que le scénario « agronomique » est préféré au scénario « économique » (Tableau 3). Surtout, **en recueillant les forces et faiblesses de chaque scénario**, nous avons pu faire ressortir les éléments qui faciliteraient l'expansion du lin ; à savoir :

- L'amélioration des variétés (pour qu'elles soient plus productives et plus résistantes) ;
- Le progrès technique (pour que, par exemple, de nouveaux produits phytosanitaires soient proposés et que des solutions aux problèmes de récolte soient inventées) ;
- Une implication économique (pour garantir un prix (ou marge) minimal(e) aux producteurs ou fournir une aide incitative).

Les deux premiers éléments rejoignent ceux avancés par Meynard *et al.* (2013a), rapportés au début de ce chapitre (page 49). Le troisième élément qui **met en avant l'importance de ne pas penser l'agronomie sans l'économie** a été un des déclencheurs des collaborations que j'ai, depuis, avec ma collègue économiste, Aude Ridier : j'ai déjà évoqué l'une de ces collaborations pour parler du modèle SYNERGY (et le co-encadrement de la thèse de Julia Jouan) ; je vais en parler d'une autre dans la partie suivante.

3.1.2. Les protéagineux dans les systèmes de culture

Après avoir étudié la place des oléagineux dans les systèmes de culture, je me suis intéressé à celle des légumineuses, autres cultures de diversification potentiellement avantageuses (Murphy-Bokern *et al.*, 2017). M'intéresser à ces cultures m'a été particulièrement utile, scientifiquement, pour appréhender les liens entre productions végétales et productions animales et réfléchir la conception et l'évaluation multicritère de systèmes de culture dans les systèmes de production avec élevage, ceci au travers de questions comme : (1) les restrictions d'épandage d'effluents sur légumineuses compromettent-elles leur implantation ? (2) l'utilisation, pour l'alimentation des animaux d'élevage, de légumineuses produites sur l'exploitation permet-elle de diversifier efficacement les systèmes de culture ? *etc.* Ces questions, j'ai commencé à y répondre au sein du projet SecuriProt dont l'objectif était d'apporter des solutions techniques pour sécuriser et augmenter la production de trois légumineuses à graines destinées à l'alimentation animale dans l'Ouest de la France (pois, lupin, féverole). Ces trois cultures (ci-après, les protéagineux) représentent, en effet, très peu de surfaces dans l'Union Européenne *i.e.*, seulement 0,8 % de la sole en 2014 (FAO, 2018). Dans ce mémoire, je ne détaille pas les raisons expliquant leur faible part dans la sole européenne alors même que les besoins en aliments riches en protéines, dont les protéagineux font partie, ont considérablement augmenté, surtout pour nourrir les animaux d'élevage. Pour cela, je renvoie le lecteur à l'introduction de l'article de **Carof *et al.* (2019)**.

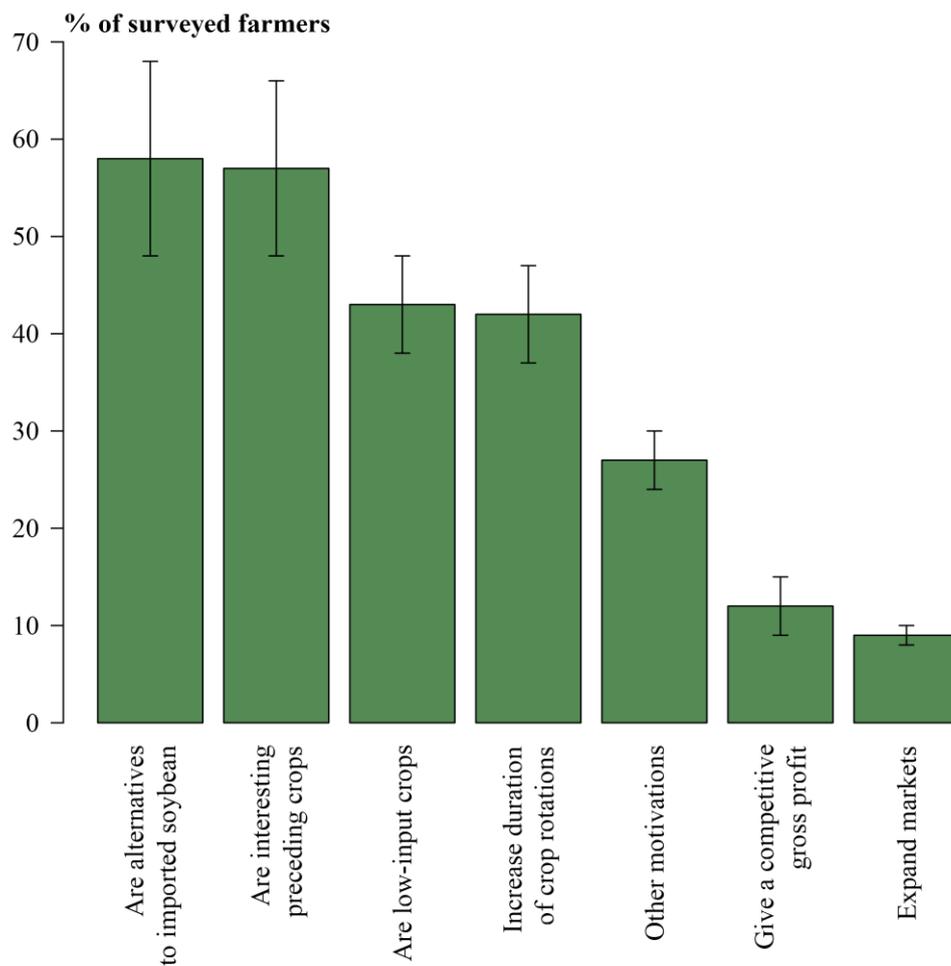


Figure 8. Ce diagramme en barres, repris de **Carof et al. (2019)**, illustre les motivations des 127 agriculteurs enquêtés, en large majorité des éleveurs, pour la production de protéagineux dans leur exploitation. Ces motivations sont des propositions faites aux enquêtés et plusieurs réponses étaient possibles. Chaque barre représente la moyenne des réponses toutes espèces confondues, pondérée par la fréquence de chaque espèce. Le segment sur chaque barre est l'écart-type de la moyenne pondérée.

Par contre, je rappelle que les protéagineux sont des cultures de diversification aux nombreux atouts *e.g.*, Bedoussac *et al.* (2015), Preissel *et al.* (2015) et Watson *et al.* (2017). Un premier atout bien connu est que, fixant l'azote présent naturellement dans l'air, ils n'ont pas besoin d'être fertilisés (en azote) et leurs résidus peuvent être une source d'azote importante pour la culture suivante. De ceci, il en résulte que les agriculteurs, grâce aux protéagineux, peuvent réduire leur utilisation d'intrants azotés. Autre atout des protéagineux : dans des rotations dominées par la présence de céréales, l'insertion de protéagineux rompt les cycles des maladies et des ravageurs des céréales, permettant aux agriculteurs de diminuer, sur ces cultures, leur utilisation de pesticides. À l'échelle du système de production, enfin, un atout des protéagineux est qu'ils sont des aliments riches en protéines pouvant servir à l'alimentation des animaux d'élevage en remplacement du soja (et du tourteau de soja) importé, participant ainsi à l'augmentation de l'autonomie protéique des élevages.

Partant du constat que malgré ces atouts les protéagineux sont très peu présents dans les systèmes de culture de l'Ouest de la France (Bretagne, Pays de la Loire), il nous a semblé intéressant d'enquêter auprès d'agriculteurs pour (1) comprendre les motivations de ceux qui choisissaient de cultiver des protéagineux (leurs arguments pouvant être sources d'information pour d'autres agriculteurs et pouvant enrichir les résultats d'expérimentation), et (2) analyser leurs itinéraires techniques afin de mettre en évidence les plus prometteurs. Comme on le voit, l'approche est, ici, un peu différente des précédents diagnostics que j'ai réalisés : il ne s'agit pas seulement de faire un état des lieux de la diversité des cultures mais aussi d'**identifier, chez les agriculteurs eux-mêmes, des itinéraires techniques qu'ils jugent efficaces** pour la conduite des protéagineux et de **les évaluer** objectivement sur des critères agronomiques, environnementaux et économiques.

De l'enquête, il est d'abord ressorti que si la diversité cultivée est faible, comme dans les diagnostics précédents, en revanche, les rotations mises en place avec protéagineux sont « longues » (durée moyenne : 4,5 ans), que les agriculteurs soient ou pas dans une démarche d'agriculture biologique. Ensuite, il est ressorti que les agriculteurs de l'échantillon cultivaient des protéagineux surtout pour (i) **les utiliser comme matières premières produites localement** en remplacement du soja (et du tourteau de soja) importé, et (ii) **réduire leur utilisation d'engrais azotés** (Figure 8). Les choix des agriculteurs sont, sur ces aspects, cohérents avec les connaissances scientifiques sur les protéagineux. Partant de ces motivations à la culture des protéagineux, les enquêtés ont suggéré un ensemble de leviers pour accroître les surfaces en protéagineux dans les exploitations : ils ont particulièrement mis en avant des **incitations économiques qui agiraient sur la marge brute de ces cultures** *e.g.*, une diminution des charges opérationnelles grâce à une amélioration des itinéraires techniques ou une augmentation du produit brut grâce à une aide spécifique. Une augmentation du prix d'achat du soja inciterait aussi les éleveurs à assoler davantage de protéagineux. Par contre, contrairement à ce que le collectif impliqué dans SecuriProt supposait, la **levée des restrictions d'épandage d'effluents sur légumineuses ne serait pas un levier décisif**, sauf cas particulier de certaines exploitations excédentaires en azote, notamment celles spécialisées en production de porcs ou de volailles.

L'originalité forte de cette enquête est surtout d'avoir permis de mettre en évidence une **très grande diversité d'itinéraires techniques**, aussi bien chez les agriculteurs conventionnels que chez ceux respectant le cahier des charges de l'agriculture biologique (Figure 9). Des itinéraires techniques se différenciant particulièrement des autres ont été mis en évidence : ils sont présentés dans l'article de **Carof et al. (2019)**.

Pour évaluer tous ces itinéraires techniques, j'ai choisi d'utiliser ou de calculer, à partir des données recueillies, plusieurs indicateurs de performance comme la productivité, l'IFT⁴⁹, le temps de travail et la marge brute. Cette évaluation⁵⁰ nous a permis de conclure que **les agriculteurs conventionnels pouvaient s'inspirer des pratiques les plus intéressantes des agriculteurs « biologiques »** (par exemple, celles relatives aux associations de cultures) pour réduire l'utilisation d'intrants, et donc les charges opérationnelles, tout en maintenant les quantités produites, et donc en améliorant la rentabilité à court terme des protéagineux. De plus, en analysant le jeu de données avec ma collègue économiste, sachant la moins bonne rentabilité des protéagineux à court terme par rapport au blé, nous avons souhaité calculer la **réelle valeur économique des protéagineux** en tenant compte de la réduction d'intrants et du gain de rendement permis sur la culture suivante. Dans ce travail, la prise en compte de cette valeur économique accroît la rentabilité des protéagineux (chez les agriculteurs conventionnels, nous avons estimé cette valeur économique à 118 € ha⁻¹, à ajouter à la marge brute annuelle). Cette **monétarisation de l'effet précédent des cultures de diversification** (mais aussi de leurs effets sur le long terme) me paraît **nécessaire pour les favoriser auprès des agriculteurs**, en ne limitant pas leur intérêt économique au calcul de la marge brute annuelle (qui leur est très souvent défavorable). Cela revient à préférer l'évaluation de la marge brute à l'échelle de la rotation plutôt qu'à l'échelle de la culture.

La conclusion que nous avons établie dans ce travail est à rapprocher d'une étude que nous avons menée sur les contrats de légumineuses pour l'alimentation animale chez quatre collecteurs de l'Ouest de la France (**Jouan et al., 2019**). Nos résultats indiquent que **produire des légumineuses est économiquement intéressant à l'échelle de la rotation** en raison de coûts d'opportunité⁵¹ nuls ou positifs ; cependant, les **coûts de transaction sont élevés** et les contrats étudiés ne les diminuent pas suffisamment pour faciliter le développement de ces espèces. L'importante augmentation du prix des engrais azotés actuellement renforcerait sans doute notre conclusion sur les coûts d'opportunité des légumineuses.

Cette étude, qui enrichit les connaissances sur les protéagineux dans les systèmes de culture, relève, selon moi, des travaux de « **traques aux innovations** » que Salembier *et al.* (2015) définissent comme les initiatives de chercheurs qui mettent en partage des pratiques « originales⁵² » découvertes chez des agriculteurs et qu'ils valorisent pour donner des idées

⁴⁹ IFT, Indice de Fréquence de Traitement

⁵⁰ Comme indiqué dans l'introduction du mémoire à propos des démarches de conception (page 27), l'étape de *diagnostic* peut mobiliser les outils de l'évaluation multicritère ; c'est pour cela que j'emploie le terme *évaluation* ici. Il ne s'agit pas pour autant d'une *évaluation ex post* à proprement parler puisque (i) à de rares exceptions près, les itinéraires techniques évalués sont ceux habituellement mis en œuvre par les enquêtés, et (ii) nous n'avons pas eu les moyens de confronter les résultats de l'évaluation aux objectifs attendus des enquêtés.

⁵¹ Théoriquement, le coût d'opportunité d'un bien x est « la quantité du bien y à laquelle il faut renoncer pour obtenir une unité supplémentaire de x » (Andréani, 1967). Dans notre étude, les coûts d'opportunité des légumineuses en rotation sont la marge (brute) d'une rotation avec légumineuse(s) minorée de la marge (brute) de la rotation sans légumineuse qu'elle remplace.

⁵² Dans le sens, « qui se distingue du commun, qui sort de l'ordinaire » (Larousse, 2022).

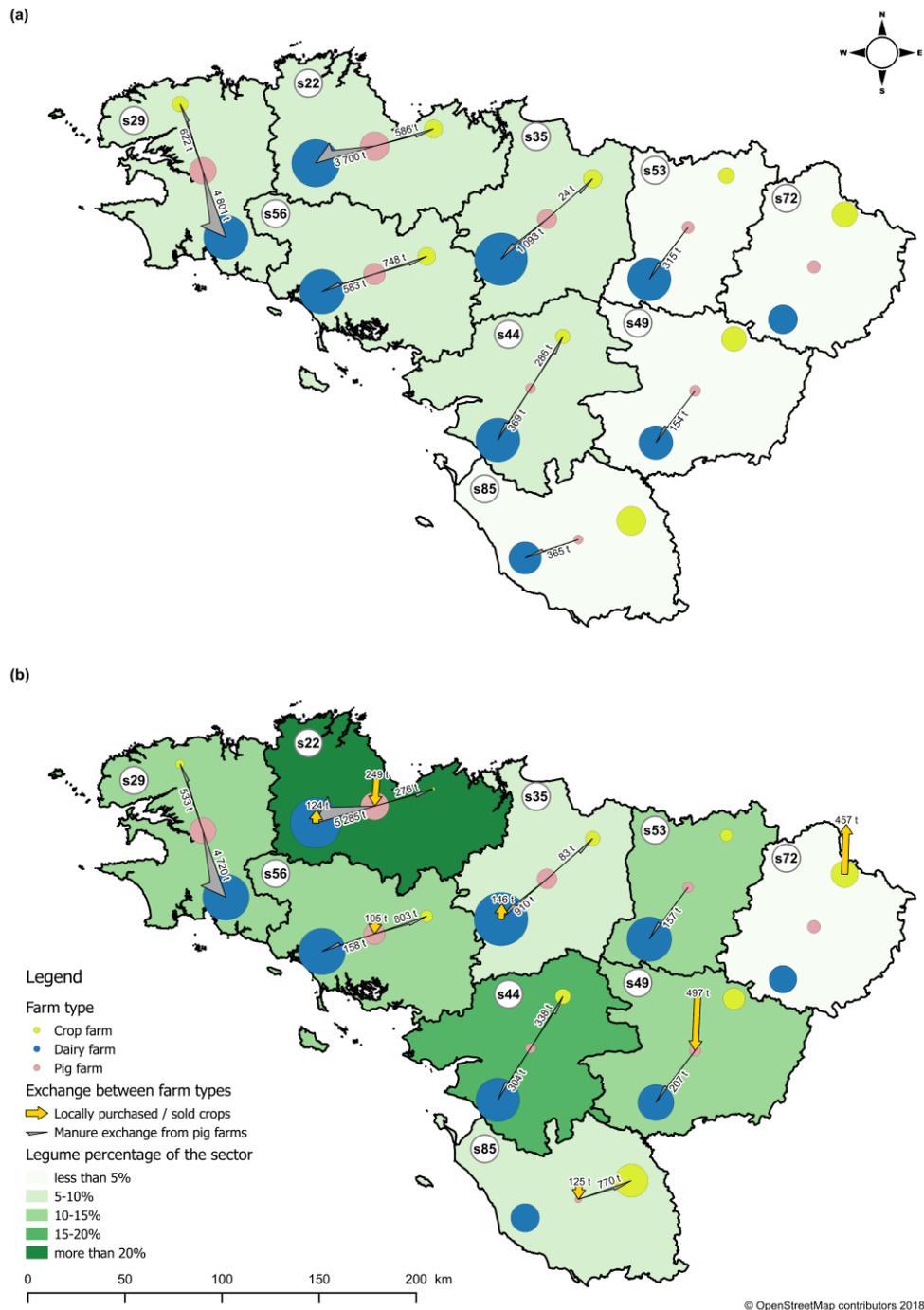


Figure 10. Le modèle SYNERGY simule le pourcentage de la surface agricole utile consacrée à la production de légumineuses, par département. Les légumineuses concernées sont la féverole, la luzerne et le pois ainsi que les légumineuses des prairies d'association. La situation actuelle est représentée sur la carte (a) ; la conséquence de l'émergence de filières de produits animaux certifiés « sans OGM » est représentée sur la carte (b). L'augmentation des surfaces consacrées aux légumineuses entre les deux cartes est principalement due aux prairies d'association pour l'alimentation des bovins laitiers. Les flèches représentent les échanges d'effluents entre types d'exploitations (seuls les échanges de plus de 80 t d'azote sont représentés) ; les cercles représentant les types d'exploitations sont proportionnels à la surface occupée par chaque type d'exploitation, dans chaque département. Cette figure est extraite de **Jouan et al. (2020b)**.

à d'autres ou stimuler la conception.

3.2. La complémentarité des productions, une solution imparfaite pour accroître l'autonomie protéique du Grand Ouest

Les diagnostics que j'ai réalisés ont augmenté mon expertise sur les systèmes de culture, particulièrement ceux des exploitations avec élevage, et je l'ai mise à profit pour construire le modèle SYNERGY, dans le cadre de la thèse de Julia Jouan *cf.* la partie 2.3, pages 45 à 48. Ce modèle a ensuite été utilisé dans une démarche de conception, ce dont je parle ici, en **réfléchissant la complémentarité des productions végétales et animales en lien avec l'autonomie protéique et la gestion de l'azote**⁵³.

Dans ce cadre, l'introduction de légumineuses dans les systèmes de culture est un levier à mobiliser *cf.* leur production jointe expliquée dans la partie 2.2, page 40. Cependant, des contraintes réglementaires peuvent nuire à leur insertion dans certaines exploitations avec élevage *cf.* la partie précédente, page 55. Comme les exploitations spécialisées en grandes cultures présentent un déficit en azote, corrigé par l'achat d'engrais de synthèse, et que, d'autre part, les exploitations spécialisées en élevage présentent un excès d'azote issu pour partie des effluents, une solution serait de **valoriser les complémentarités non pas seulement dans une exploitation mais aussi à l'échelle d'un territoire** où (i) les exploitations spécialisées en productions végétales produiraient des légumineuses vendues aux exploitations spécialisées en productions animales, et (ii) les exploitations spécialisées en productions animales exporteraient des effluents vers des exploitations spécialisées en productions végétales en lieu et place des engrais de synthèse.

Le modèle SYNERGY permet de simuler ces échanges locaux de matières et nous l'avons donc utilisé pour concevoir, virtuellement, en Bretagne et Pays de la Loire, des systèmes de production et des territoires produisant localement des légumineuses ; l'objectif étant d'améliorer l'autonomie protéique des élevages sans dégrader l'environnement. Pour identifier les leviers qui favorisaient cette production locale de légumineuses, nous avons conduit un **travail prospectif** avec 30 acteurs agricoles des régions Bretagne et Pays de la Loire (Caraes *et al.*, 2018 ; Jouan *et al.*, 2020b). Deux leviers ont ainsi été proposés :

- La mise en place d'une aide couplée aux légumineuses supérieure à celle existant déjà, de l'ordre de 200 € ha⁻¹ pour la féverole et le pois et de 182 € ha⁻¹ pour la luzerne ;
- La création de filières de produits animaux (lait de vache, viande bovine, viande porcine) certifiés « sans OGM » (et donc, sans tourteau de soja importé, très majoritairement OGM). Les consommateurs distingueraient de tels produits animaux et accepteraient de les payer à un prix plus élevé, ce qui réduirait le coût d'opportunité des légumineuses en alimentation animale et encouragerait leur production.

Les conséquences de ces leviers ont été simulées grâce au couplage d'un modèle d'équilibre général calculable (Gohin *et al.*, 2016) avec le modèle SYNERGY. En particulier, la création de filières de produits animaux certifiés « sans OGM » serait bénéfique pour accroître, très fortement, l'incorporation de légumineuses dans les rations animales sans pour autant que

⁵³ Les résultats de ce travail ont été retenus par l'INRAE pour publication sur leur site internet ([ici](#)) sous le titre « Produire des légumineuses dans des territoires d'élevage : un levier pour accroître leur durabilité et leur autonomie ? »



Figure 11. Cette photographie, extraite de ma thèse (Carof, 2006), est une illustration d'un SCV avec cultures associées. Elle montre l'association d'une culture de rente (du blé tendre d'hiver, quelques temps après l'épiaison) avec une plante de service (du lotier corniculé, en fleurs). Les deux cultures ont été semées sans qu'aucun travail du sol n'ait été réalisé : le blé, sept mois avant la prise de la photographie et le lotier, plus de deux ans avant la prise de la photographie.

ces cultures soient produites dans les régions concernées, hors prairies d'association. De ce fait, la diversité des assolements évoluerait peu (Figure 10, page 58). **L'autonomie protéique du territoire n'évoluerait pas** parce que (i) la féverole, la luzerne et le pois seraient majoritairement produits ailleurs dans l'Union Européenne et (ii) la production animale augmenterait aussi bien en production porcine qu'en productions de bovins laitiers⁵⁴. Une conséquence néfaste sur l'environnement de cette augmentation de la production serait que **les valeurs des indicateurs environnementaux seraient moins bonnes** (à l'échelle du territoire, légère augmentation des pertes potentielles en azote et légère diminution de l'efficacité azotée). Point positif, mais insuffisant, le profit territorial augmenterait. Tout de même, même si nous ne l'avons pas calculé, on peut penser que l'autonomie protéique de la France et/ou de l'Union Européenne serait améliorée.

3.3. Des systèmes avec cultures associées prometteurs, mais à améliorer

Je ne peux clore ce chapitre sans dire un mot, rapide, sur le travail que j'ai conduit pendant ma thèse et ce, pour deux raisons : (1) parce que tester *in situ* une potentielle innovation agronomique est une activité de recherche passionnante, et (2) parce qu'en en parlant ici, j'é mets le vœu que la recherche s'intéresse de nouveau plus à cette potentielle innovation, les SCV⁵⁵ avec cultures associées (Figure 11).

Systèmes de culture en rupture avec les plus répandus, les SCV avec cultures associées sont conçus en combinant deux techniques culturales : (i) le non travail du sol, et (ii) l'association d'une culture de rente à une plante de service laissée vivante en permanence sur la parcelle⁵⁶. Si les SCV avec cultures associées sont (un peu) mis en œuvre en zones tropicales, là où ils ont été initialement conçus (Capillon & Ségué, 2002), ils sont quasi-inexistants dans une zone tempérée comme la France (Labreuche *et al.*, 2014).

L'idée initiale de mon travail de thèse était alors de **comparer *in situ* différents SCV avec cultures associées** et de **les évaluer *ex post*** pour mettre en évidence leurs atouts et faiblesses (du point de vue des performances agronomiques et environnementales essentiellement) ; la conception consistant ici en la définition de caractéristiques phénotypiques souhaitées pour la plante de service et l'énoncé de principes pour la conduite technique des cultures de rente. Cependant, nous nous sommes vite rendu compte que, travaillant sur des systèmes en rupture par rapport à l'existant, nous manquions de connaissances sur le fonctionnement d'un agrosystème combinant non travail du sol et association de cultures, en climat tempéré. Mon travail de thèse s'est donc finalement déporté sur les principaux objectifs suivants :

- Comprendre les interactions d'espèces associées lorsque celles-ci sont implantées sur un sol non travaillé ;
- Identifier les conséquences de ces interactions sur la production de la culture de rente.

⁵⁴ Ce résultat est à relier avec le travail de Regan *et al.* (2016) qui montre que repenser la complémentarité des productions dans un territoire peut conduire à un « effet rebond », non intuitif, qui annule les avantages supposés sur l'environnement de la complémentarité.

⁵⁵ SCV, Systèmes de culture en semis direct sous Couvert Végétal.

⁵⁶ L'expression « plante de couverture » est couramment employée également.

Pour répondre à ces objectifs, j'ai **mis en place et suivi un dispositif expérimental** consistant à semer une culture de blé tendre d'hiver : seule, dans un sol labouré ; seule, directement dans un sol non travaillé ; directement dans un sol non travaillé en présence d'une plante de service. Au total, six plantes de service différentes ont été testées.

Le lecteur retiendra que ce travail exploratoire sur les SCV avec cultures associées a démontré que **le couplage des techniques du semis direct et de l'association de cultures est possible sans perte de rendement**, mais cela implique une gestion stricte de la plante de service pour empêcher une compétition excessive entre celle-ci et la culture de rente *i.e.*, son contrôle par un moyen chimique ou mécanique (**Carof *et al.*, 2007b, 2007c**). Malgré ces résultats prometteurs, les études scientifiques sur les SCV avec cultures associées sont toujours peu nombreuses (Gardarin *et al.*, 2022) et à ma connaissance, ces systèmes sont peu mis en place dans les exploitations françaises. La recherche agronomique française devrait continuer à s'intéresser à ces systèmes reposant sur une diversité des cultures accrue ; le projet scientifique que je propose plus loin va dans ce sens.

3.4. Conclusion du chapitre

Mes travaux ont permis (i) de constater, aujourd'hui, la faible diversité des cultures dans l'Ouest de la France, et (ii) d'identifier des leviers pour la diversification dont la prise en compte économique des effets précédents des légumineuses. Le recours à des indicateurs agronomiques et économiques a facilité la comparaison objective entre situations de production. Régulièrement, de nouveaux indicateurs sont mis au point pour améliorer ces comparaisons ; je pense par exemple à l'indicateur de diversité globale des rotations de Keichinger *et al.* (2021) et à l'indicateur de « fonctionnement biotechnique » de Pépin *et al.* (2021) que je pourrais mobiliser, parmi d'autres, dans de futurs travaux sur la **conception de systèmes**, sujet abordé de front dans le projet TERUnic et **que j'aimerais développer dans l'avenir** cf. mon projet scientifique à partir de la page 71.

Au cours de ces dernières années, travailler à l'interface entre deux disciplines, l'agronomie et l'économie, a été très stimulant. À titre personnel, cela m'a donné l'occasion de me confronter à des concepts nouveaux *e.g.*, les notions de prix d'équilibre, de coûts d'opportunité, de coûts de transaction. Plus largement, je considère qu'établir un lien solide entre agronomie et économie pour la conception et l'évaluation de systèmes a permis (i) de s'assurer de leur crédibilité technique tout en ne fuyant pas *a priori* la complexité des systèmes à inventer, (ii) de les évaluer conjointement sur des critères environnementaux et économiques en mobilisant des indicateurs à jour, et (iii) d'éviter les écueils de la conception de systèmes intéressants techniquement et environnementalement mais peu économiquement... et inversement. Ce lien peut encore être renforcé et c'est pourquoi j'ai plaisir à **encadrer une nouvelle thèse avec Aude Ridier sur l'organisation du travail et ses conséquences sur la mise en œuvre de techniques alternatives aux pesticides** dans les exploitations avec élevage. Dans cette thèse menée par Julia Denantes depuis fin 2021 au sein du projet ANR FAST, nous supposons que mettre en œuvre des techniques alternatives aux pesticides est intensif en travail et en capital humain, surtout lorsque ces

nouvelles techniques conduisent à la re-conception des systèmes de culture. Or, dans les exploitations avec élevage, une part importante du travail est allouée à l'atelier animal, ce qui réduit les possibilités de réallocation du travail à l'atelier végétal. Considérant cette contrainte majeure, nous souhaitons (i) identifier les leviers techniques et organisationnels mobilisables pour réduire fortement l'utilisation des pesticides dans les exploitations avec élevage, (ii) hiérarchiser ces leviers entre eux, en s'appuyant sur les préférences exprimées par des agriculteurs au cours d'une expérience de choix, et (iii) simuler le comportement de différents profils d'agriculteurs selon l'évolution des marchés et de la réglementation. L'ensemble devrait renseigner les décideurs, publics et privés, sur des solutions concrètes à la sortie des pesticides et sur leurs impacts économiques.

4. La formation, l'autre moitié de mon temps de travail

Dans les chapitres précédents, j'ai longuement développé le bilan de mes apports à la recherche en agronomie. Je veux ici présenter, succinctement, mon implication dans la formation d'étudiants-ingénieurs et d'étudiants en master à l'Institut Agro. Comme indiqué dans mon *curriculum vitae* (cf. la page 20), cela occupe tout de même plus de la moitié de mon temps de travail – sans compter les échanges avec les étudiants sur leur choix de stages et leur avenir professionnel, la préparation des emplois du temps, les réflexions sur les évolutions des cursus, etc. Ce document étant rédigé en vue de l'obtention du diplôme d'Habilitation à Diriger les Recherches, je m'attarde sur le lien entre mes enseignements et mes activités de recherche, bien que cela ne représente qu'une part réduite des différentes facettes du passionnant métier d'enseignant.

Ainsi, grâce à des cours magistraux et visites de sites expérimentaux, je **présente et illustre aux étudiants les démarches de conception de systèmes** tout en détaillant des outils mobilisables par l'agronome dans ces démarches. M'appuyant sur des travaux dirigés, je permets aux étudiants de maîtriser certains de ces outils. Cet enseignement concerne essentiellement des étudiants de niveau deuxième année de Master même si depuis cette année, je réalise une conférence à deux voix, avec une collègue écologue, Edith Le Cadre, pour initier les étudiants-ingénieurs agronomes de première année à la conception de systèmes innovants. Grâce aux résultats de mes travaux sur l'évaluation multicritère, j'ai aussi participé à :

- **La création d'un jeu sérieux sur la mise en œuvre de techniques agroécologiques dans une exploitation avec élevage (projet européen SEGAE)**
Dans ce jeu multi-langue en ligne (<https://www.segae.org>), l'étudiant (*i.e.*, le joueur) tient le rôle de l'exploitant agricole et a pour mission de gérer convenablement son exploitation, en choisissant de mettre en œuvre (ou pas) un ensemble de techniques agricoles prédéfinies par les concepteurs du jeu. L'objectif pédagogique est que les utilisateurs comprennent les effets de l'adoption de techniques agroécologiques sur le fonctionnement du système de production et sur sa multiperformance.
Ce travail s'est concrétisé, outre le jeu sérieux en lui-même, par la publication de trois articles dans des périodiques à comité de lecture (**Jouan *et al.*, 2021a, 2021b, 2020a**).
- **La création d'un module sur les connaissances à mobiliser pour concevoir des systèmes de culture biologiques**
Ce module en ligne apporte des connaissances mobilisables pour la conception de systèmes de culture en agriculture biologique (<https://rebrand.ly/Oh63re>). Le module est organisé autour des principaux problèmes rencontrés en agriculture biologique aujourd'hui et comporte sept chapitres : dans l'un des chapitres, je présente l'outil MASC-OF (cf. la partie 2.1, page 37) et insiste sur la nécessité de vérifier la cohérence de la combinaison de diverses solutions techniques pour remédier à un (ou plusieurs) problème préalablement identifié.

Avec des étudiants de niveau deuxième année de Master, j'ai très régulièrement la responsabilité de **projets professionnalisants**. Ces projets, commandités et financés par des

professionnels du monde agricole (e.g., Chambre d'Agriculture, institut technique, coopérative), mettent les étudiants en situation professionnelle réelle, donnent un sens encore plus fort aux enseignements délivrés et contribuent à préciser le projet professionnel des étudiants. Il s'agit souvent de réaliser des enquêtes auprès d'exploitants agricoles et/ou de responsables de coopératives agricoles puis de les analyser en mobilisant des compétences agronomiques, économiques et statistiques. **Un des intérêts de ces projets est de pouvoir s'insérer dans mes activités de recherche** cf. les travaux présentés dans les parties 3.1.1 et 3.1.2, pages 49 à 59.

Les soutenances de stage de fin d'études (j'en organise une vingtaine chaque année), les journées d'échanges entre étudiants et *alumni* (j'anime, chaque année, un forum à notre journée « témoignages sur les métiers des ingénieurs agronomes ») et les interventions d'extérieurs dans les formations sont aussi des temps privilégiés, avec des acteurs non académiques, pour discuter des questions émergentes dans les filières agricoles et des sorties de mes activités de recherche.

L'enseignement est une activité que j'aime. C'est elle qui a guidé mes choix de formation et de stages pour pouvoir devenir enseignant-chercheur. Si je candidate aujourd'hui au diplôme d'Habilitation à Diriger les Recherches, c'est bien sûr pour diriger des thèses de doctorat, conduire librement, collectivement, mes propres projets de recherche, mais aussi pour participer à la renommée de l'établissement au service des étudiants.

Projet scientifique

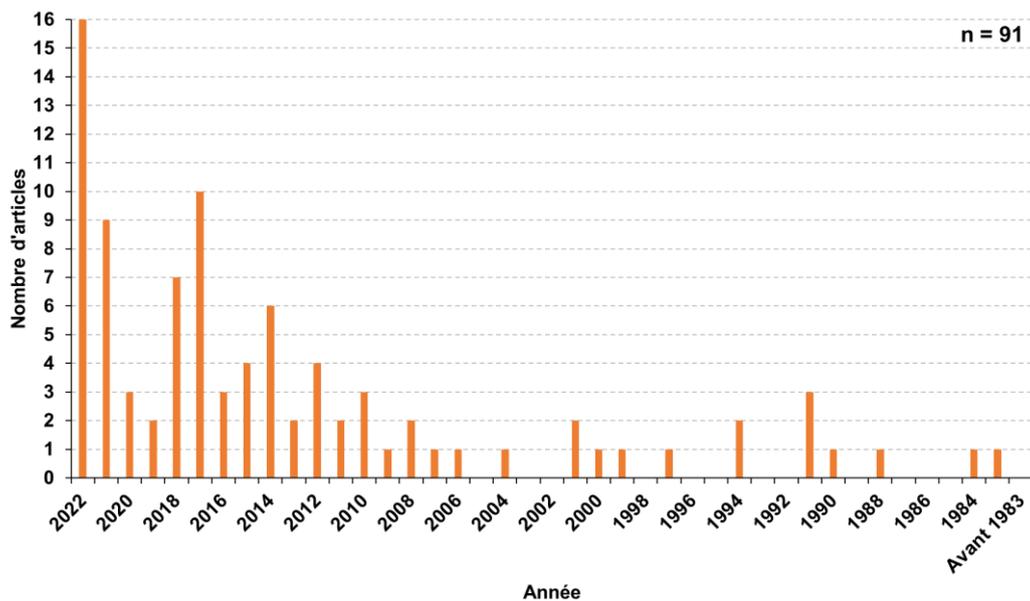


Figure 12. Ce diagramme en barres illustre, année après année, le nombre d'articles scientifiques ayant pour thème la conception de systèmes agricoles sur la période 1955-2022. Pour l'obtenir, j'ai réalisé une analyse bibliométrique d'articles en langue anglaise, publiés dans des périodiques à comité de lecture, en mobilisant la plateforme d'information scientifique et technique Web of Science™ (édition Science Citation Index Expanded). La requête que j'ai construite est la suivante (disponible en ligne, [ici](#)),

$(TI=((crop* OR farm* OR agricultur* OR agro*) + system + design*) OR AK=((crop* OR farm* OR agricultur* OR agro*) + system + design*) AND LA=(English)) AND (DT=("ARTICLE"))$

avec : TI, termes du titre (Title) de l'article ; AK, termes des mots-clés (Author Keywords) de l'article ; LA, langue (LAnguage) de l'article ; DT, type de document (Document Type). Cette requête a permis de sélectionner 456 articles. J'ai ensuite retiré les articles dont l'objet d'étude était trop éloigné de ceux auxquels je m'intéresse : j'ai donc éliminé les articles relatifs aux fermes éoliennes, aux systèmes aquacoles, aux systèmes hydroponiques, aux systèmes agrivoltaïques. J'ai aussi éliminé les articles centrés sur une technologie particulière comme l'utilisation de capteurs en agriculture. De même, je n'ai pas conservé les articles présentant des logiciels d'aide à la décision (« decision support system ») ou des modèles (sauf si, bien sûr, l'article présentait également une phase de conception mobilisant le modèle en question). Enfin, j'ai enlevé les articles traitant uniquement d'évaluation.

1. Faciliter les réflexions scientifiques sur la conception de systèmes agricoles

Avant de détailler mon projet scientifique proprement dit, je précise au lecteur que dans mon unité de recherche, j'ai pris la responsabilité, pour la période allant de 2022 à 2026, de l'axe thématique Conception⁵⁷ qui réunit une quinzaine de scientifiques s'intéressant à la conception de systèmes, en rupture, dans des territoires d'élevage. Ces scientifiques – agroécologues, agronomes, géographe, sociologue, zootechniciens – se retrouvent une fois tous les deux mois.

J'anime des **réflexions collectives sur les démarches, méthodes et outils pour la conception** avec une attention particulière sur les leviers – techniques, organisationnels, de politiques publiques, *etc.* – (i) relatifs à la diversité des productions végétales, (ii) relatifs à la diversité des productions animales, (iii) relatifs à la complémentarité entre ces productions, et (iv) mobilisables à différentes échelles, de la parcelle (ou du groupe d'animaux) au territoire.

Dans ce manuscrit, j'ai déjà expliqué les intérêts et contraintes de la diversité et de la complémentarité des productions pour la conception, en particulier pour les exploitations élevant des bovins laitiers ; dans l'axe, nous élargissons ce questionnement grâce notamment au partage, par les collègues, de leurs travaux sur des exploitations avec d'autres élevages terrestres (*e.g.*, l'élevage de porcs, l'élevage de volailles) mais aussi des élevages en milieu aquatique *e.g.*, l'élevage de truites.

Nos réflexions à l'échelle du territoire nous amènent à considérer celui-ci comme un cadre où se définissent des enjeux et critères pour la conception de systèmes d'intérêt, cadre pouvant être dans la continuité, complémentaire ou antagoniste de celui défini à l'échelle de la parcelle, du groupe d'animaux ou de l'exploitation. À l'échelle du territoire, les leviers qui nous intéressent sont (1) l'agencement des systèmes de culture dans l'espace en tenant compte de l'hétérogénéité spatiale des ressources en eau et en sol, des potentialités agronomiques qui en découlent et des sensibilités environnementales, et (2) l'organisation des complémentarités fonctionnelles au travers d'échanges de produits (cultures, animaux, effluents), d'énergie, de terres agricoles. C'est, par exemple, ce à quoi j'ai contribué lorsque je me suis intéressé à l'autonomie protéique dans le Grand Ouest *cf.* la partie 3.2, page 59.

Si j'ai souhaité animer cet axe, ce n'est pas seulement par souci du collectif mais aussi pour recentrer mon activité de recherche sur la conception de systèmes et pouvoir, conforté par mon diplôme d'Habilitation à Diriger les Recherches, monter un projet d'envergure unissant les activités de plusieurs scientifiques de mon unité, sur les éléments que je développe par la suite.

⁵⁷ De fin 2016 à fin 2021, avec Michael Corson et Valérie Viaud, j'ai assuré l'animation de l'axe AGILE (Accompagner la transition agroécologique des systèmes et territoires d'élevage) qui rassemblait les différents agents de l'unité dont les recherches visaient à produire des ressources (*i.e.*, des connaissances, références, outils) pour accompagner la transition agroécologique des systèmes agricoles et des territoires ruraux avec élevage. Pour le nouveau projet d'unité, l'axe AGILE a évolué en deux axes, l'un nommé Évaluation et l'autre, Conception. Ceci est la conséquence de nombreuses animations sur la conception que j'ai construites dans l'axe AGILE, aidé de Michael Corson et Valérie Viaud *e.g.*, le montage d'une formation collective intitulée « La conception de systèmes agricoles et la modélisation comme outil d'accompagnement de démarches de conception », la rédaction d'un profil de poste de chargé de recherche à l'INRAE ouvert au concours en 2021.

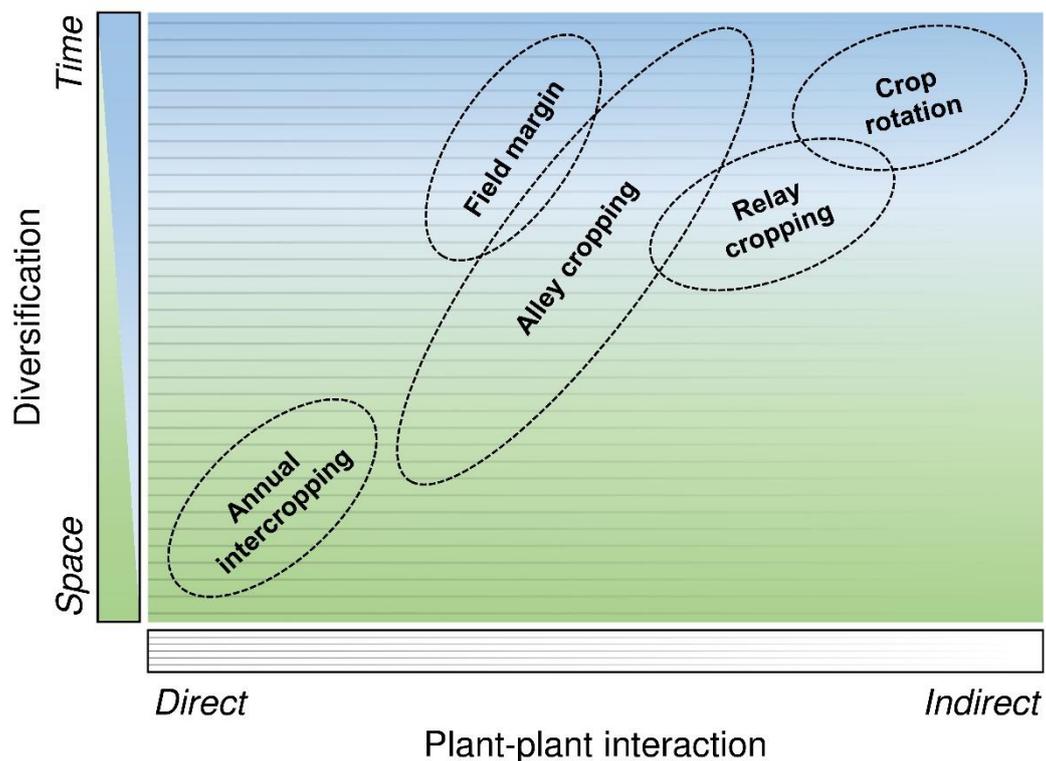


Figure 13. Diverses techniques permettent de diversifier les cultures : toutes reposent sur des interactions biologiques complexes. Cette figure, extraite de **Carof et al. (2022)**, cite les techniques suivantes : association de cultures (annual intercropping), agroforesterie intraparcellaire (alley cropping), gestion des bords de champ (field margin), implantation de cultures en relais (relay cropping), rotation de cultures (crop rotation). Ces techniques se distinguent par la manière dont la diversification s'exprime, dans le temps et dans l'espace (axe des ordonnées), et par la nature des interactions qui dominent entre plantes, directes ou indirectes (axe des abscisses).

2. Prendre en compte le temps long pour concevoir des systèmes de culture diversifiés, durables et résilients

Au cours de la dernière décennie, les travaux de recherche sur la conception de systèmes agricoles ont connu une montée en puissance : je l'illustre sur la Figure 12, page 68. Ces nombreux travaux ont contribué (i) à la proposition de nouveaux cadres méthodologiques et outils (voir par exemple, Della Rossa *et al.*, 2022 ; Notaro *et al.*, 2022a ; Ryschawy *et al.*, 2022), (ii) au partage de connaissances scientifiques et techniques sur les systèmes nouvellement conçus (voir par exemple, Puech *et al.*, 2021 ; Selbonne *et al.*, 2022), et (iii) à une approche réflexive vis-à-vis de certaines démarches de conception (voir par exemple, Jeuffroy *et al.*, 2022 ; Prost *et al.*, 2018). Si d'importantes avancées méthodologiques et cognitives ont été faites, j'identifie, à la lecture de ces articles et en m'appuyant sur mes connaissances du terrain, au-moins une méconnaissance à pallier : la **prise en compte du temps long** dans la conception et l'évaluation multicritère de systèmes de culture diversifiés. **C'est sur cet aspect principal que je bâtis mon projet scientifique** pour les années à venir.

Pourquoi cette prise en compte du temps long me paraît essentielle pour la conception et l'évaluation multicritère de systèmes de culture diversifiés ? La diversification des cultures est un ensemble de leviers techniques (Figure 13) reconnus pour rendre non seulement des services écosystémiques d'approvisionnement mais également des services écosystémiques de régulation (Beillouin *et al.*, 2021 ; Lavergne *et al.*, 2021 ; Notaro *et al.*, 2022b ; Tamburini *et al.*, 2020 ; Tibi *et al.*, 2022). Cet accroissement intentionnel de biodiversité dans les systèmes de culture peut conduire à concevoir des systèmes très différents de ceux dominants, souvent techniquement difficiles à mettre en œuvre et sociologiquement difficiles à accepter. De plus, **leurs avantages peuvent ne pas être visibles à court terme**, ce qui décourage les agriculteurs de les mettre en œuvre. Pire encore, la production et les revenus peuvent être réduits pendant la transition d'un système de culture conventionnel vers un système de culture plus diversifié (Wang *et al.*, 2021). Pour partie, cela s'explique par le fait que les atouts d'une biodiversité accrue mettent du temps à s'exprimer pleinement : de nombreuses études en écologie démontrent, dans des écosystèmes naturels ou peu perturbés par l'Homme, **qu'il existe une relation, le plus souvent positive, entre la diversité végétale et la productivité et que cette relation s'amplifie au cours du temps** (Thakur *et al.*, 2021 ; van Ruijven & Berendse, 2005). Partant de là, cet aspect temporel devrait être explicitement pris en compte pour la conception de systèmes de culture basés sur une diversité végétale accrue. Il conviendrait concomitamment de **raisonner le niveau de diversité végétale à atteindre**, celui-ci résultant d'un compromis, pouvant évoluer au cours du temps, entre :

- l'efficacité attendue des processus d'intérêt permis par cette diversité végétale (et donc, l'intensité de la fourniture des services écosystémiques qui en dépendent) et,
- les possibilités de diversification e.g., la faisabilité sociotechnique de la diversification, l'existence de filières appropriées pour la collecte et la mise en marché des cultures de diversification.

À mon sens, l'enjeu scientifique pour la conception de systèmes de culture diversifiés est de considérer ensemble, et à différents pas de temps, ces deux points, ceci en mobilisant si

possible l'existant, à savoir pour le premier point, des acquis récents que je présente juste après et pour le second point, les nombreux travaux que j'ai cités dans les parties précédentes et auxquels, pour certains, j'ai contribué. Ainsi, concernant le premier point, un exemple d'acquis récent mobilisable est l'expertise collective de l'INRAE « Protéger les cultures en augmentant la diversité végétale des espaces agricoles » où Tibi *et al.* (2022) rapportent des préconisations sur le niveau de diversité végétale souhaitable pour améliorer le service écosystémique de protection des cultures. Un autre exemple est l'étude de Merlos et Hijmans (2022) qui quantifie l'accroissement possible de la diversité végétale sur l'ensemble du globe, avec un maillage de 86 km². Ce résultat est une indication sur la marge de manœuvre pour augmenter la diversité végétale dans les systèmes de culture.

Mon ambition pour les années à venir est donc de prolonger les travaux rapportés dans ce manuscrit en apportant des éléments de réponse aux questions scientifiques suivantes :

- Comment le **temps long peut-il être intégré dans les démarches de conception** de systèmes de culture diversifiés ?
- Quel **niveau de diversité des cultures est souhaitable en un lieu donné**, pour fournir quels services écosystémiques, avec quelle intensité et **à quelle échéance** ?

Ces deux questions invitent en fait à aborder sous deux angles la place du temps dans les démarches de conception : le temps long⁵⁸ pour la conception ; les temps court, moyen et long pour l'évaluation.

Bien évidemment, cela ne se fera pas seul et outre mes collègues proches, je m'appuierai sur différents réseaux et communautés. À titre d'exemple, depuis quelques mois, je participe aux événements organisés par le réseau IDEAS⁵⁹ qui fédère des scientifiques souhaitant partager leurs expériences sur la conception de systèmes ; également, je suis membre du réseau des agronomes « système » du département AgroEcoSystem de l'INRAE où des échanges en lien avec mon projet pourront avoir lieu. En dehors du monde académique, j'ai créé des liens avec la Chambre régionale d'agriculture de Bretagne, des coopératives (e.g., Eureden), des instituts techniques (e.g., Arvalis-Institut du végétal, Terres Inovia) et des organismes de conseil (e.g., CEDAPA⁶⁰) que j'activerai pour la mise en œuvre de mon projet.

Avant de poursuivre, le lecteur notera que le projet que j'expose ici s'appuie pour partie sur un article d'opinion publié dans *Science of the Total Environment* avec mes collègues Olivier Godinot et Edith Le Cadre (**Carof *et al.*, 2022**).

2.1. Le temps long pour la conception

Bien plus que cela n'est fait aujourd'hui, la conception de systèmes de culture basés sur une biodiversité accrue devrait tenir compte du fait que les services écosystémiques qu'ils fournissent ont besoin **d'un temps souvent long pour s'exprimer pleinement**, cette durée

⁵⁸ Dans l'article de **Carof *et al.* (2022)**, mes collègues et moi considérons que le court terme est la période allant de la journée jusqu'à la campagne culturale (environ 0-1 an), le moyen terme est la période allant de la campagne culturale jusqu'à la durée d'une rotation (environ 1-10 ans) et le long terme est la période allant d'une rotation jusqu'à la fin de vie professionnelle d'un agriculteur sur une même exploitation (environ 10-50 ans).

⁵⁹ IDEAS, Initiative for Design in Agrifood Systems

⁶⁰ CEDAPA, Centre d'Etudes pour un Développement Agricole Plus Autonome

variant en fonction des processus dont relèvent les services écosystémiques, des techniques culturales agissant sur ces processus et des conditions pédoclimatiques aux moments-clefs de la dynamique de ces processus. De la même manière, les **compromis entre services écosystémiques évoluent au cours du temps** : ceci est important à anticiper, et à intégrer dans la conception, pour éviter qu'au fil du temps, un service écosystémique ne s'exprime au détriment d'un autre et pour préserver, au cours du temps, la fourniture d'une pluralité de services écosystémiques, en considérant particulièrement l'équilibre entre ceux d'approvisionnement et ceux de régulation.

Les réflexions précédentes amènent alors à s'interroger non seulement sur la capacité des systèmes diversifiés à produire simultanément plusieurs services écosystémiques, ce que des auteurs cités *supra* ont déjà rapportés (e.g., Notaro *et al.*, 2022b ; Tamburini *et al.*, 2020), mais aussi à **les maintenir à des niveaux acceptables au cours du temps** ; corollairement, cela conduit à réfléchir aux services écosystémiques les plus essentiels à fournir dans un contexte pédoclimatique et socioéconomique donné.

Il me paraît donc intéressant de contribuer à la conception de systèmes de culture s'appuyant, selon le contexte pédoclimatique et socioéconomique (y compris le système de production), sur la « **stratégie de diversification** » la plus favorable à la fourniture et au maintien dans le temps de services écosystémiques, eux-mêmes choisis en fonction dudit contexte. J'appelle « stratégie de diversification » la combinaison du choix (i) des techniques de diversification (par exemple, celles de la Figure 13, page 70), et (ii) des cultures impliquées (définies, par exemple, grâce à leurs traits fonctionnels). Dans le paragraphe qui suit, je développe mes premières réflexions sur la manière de concevoir de tels systèmes de culture s'appuyant sur ces stratégies de diversification. Avant cela, même si ces réflexions ne se concrétiseront sans doute pas avant quelques années, je tiens à préciser au lecteur que je me questionne aussi sur le déploiement de ces systèmes à l'échelle d'un territoire ; il pourrait être intéressant, par exemple, de travailler de nouveau avec des économistes dans l'esprit de ce que j'ai pu faire avec eux sur la complémentarité des productions et l'autonomie protéique *cf.* la partie 3.2, page 59. Ceci permettrait, dans un territoire donné, de répartir les systèmes de culture aux stratégies de diversification variées selon le contexte pédoclimatique et le système de production mais aussi en tenant compte des liens entre systèmes de production pour mieux fournir, collectivement, une pluralité de services écosystémiques et réduire les impacts sur l'environnement, l'économie et le social.

Proposer de tels systèmes de culture en intégrant, dès leur conception, leur capacité à fournir, à court terme et sur le temps long, plusieurs services écosystémiques – d'approvisionnement et de régulation – nécessite une démarche complexe et rigoureuse. Dans l'article de **Carof *et al.* (2022)**, en s'inspirant de travaux comme ceux de Ballot *et al.* (2018), Meunier *et al.* (2022) et Reckling *et al.* (2016), nous avons proposé une telle démarche, visant à mieux prendre en compte les objectifs et les conséquences à long terme des systèmes de culture ; **cette démarche mobilise plusieurs outils dans l'idée d'équilibrer les faiblesses des uns avec les forces des autres (Figure 14, page suivante)** : les modèles conceptuels, les modèles mathématiques, les modèles statistiques, les ateliers participatifs, *etc.*

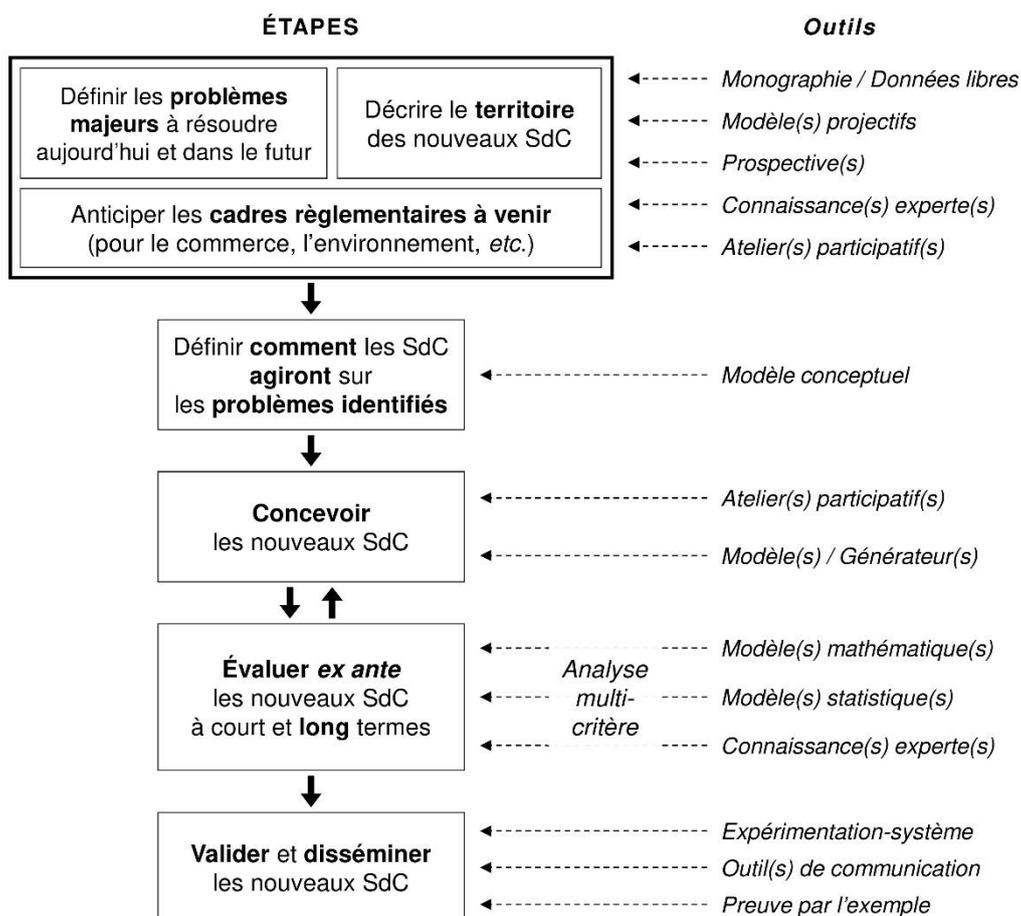


Figure 14. Cette figure, traduite de **Carof et al. (2022)**, est une proposition de démarche pour concevoir des systèmes de culture (SdC) en considérant le temps court et le temps long. La partie gauche définit les étapes, reprenant et complétant les étapes d'autres démarches de conception (cf. la partie 1.1, page 25) ; la partie droite liste les outils mobilisables pour mener à bien ces différentes étapes. À la réflexion, par rapport à la figure originale, j'ai ajouté un nouvel outil à l'étape de conception : les modèles développés pour générer les possibles e.g., Bachinger & Zander (2007) et Reckling et al. (2016).

Ce projet est, par ailleurs, déjà initié grâce à un financement de thèse que j'ai obtenu auprès de l'Institut Agro Rennes-Angers et d'Arvalis-Institut du végétal : il s'agit de la thèse⁶¹ d'Arnaud Delbaere débutée en septembre 2022. Dans celle-ci, nous prévoyons, à ce jour, de nous intéresser au service écosystémique d'approvisionnement par les cultures et à quatre services écosystémiques de régulation *i.e.*, la régulation des flux d'azote et de phosphore, le contrôle des principaux ravageurs et maladies, la préservation de la qualité chimique des sols et la régulation du climat. La période de temps considérée est de 2020 à 2050, en incluant dans le climat à venir l'apparition d'événements climatiques extrêmes.

Les premières difficultés qu'il conviendra de résoudre, dans la démarche proposée et sa mise en œuvre dans la thèse d'Arnaud Delbaere, sont les suivantes :

- L'utilisation de modèles de culture (*e.g.*, APSIM, DSSAT, STICS⁶²) est particulièrement utile pour prédire les effets à long terme de systèmes de culture diversifiés mais la plupart ignorent les processus d'importance liés aux nuisibles et auxiliaires de culture, à la vie du sol, *etc.* D'autres, en revanche, sont dédiés à des processus particuliers : FlorSys, par exemple, prédit « uniquement » la dynamique de la flore adventice et les impacts de celle-ci sur le rendement des cultures (Colbach *et al.*, 2014). Par ailleurs, ces différents modèles ne sont généralement pas (suffisamment) paramétrés pour beaucoup de cultures de diversification. **La combinaison de modèles entre eux et avec d'autres outils est donc cruciale pour la réussite de la démarche** : quels modèles utiliser ? comment les faire communiquer entre eux ? quels outils complémentaires mobilisés et comment ? *etc.*
- Simuler, grâce à des modèles, les effets à long terme de systèmes de culture diversifiés sur une variable d'intérêt devrait inciter le concepteur à privilégier, dans sa réflexion, la trajectoire probable d'évolution de ladite variable plutôt que la valeur exacte atteinte au bout de x années. Par exemple, s'agissant du service écosystémique relatif à la séquestration du carbone, il est plus important de savoir si la conception d'un système de culture diversifié a pour conséquence probable une augmentation (ou une diminution) du stock de matières organiques du sol, et à quel rythme, plutôt que de prévoir la quantité qui serait stockée après 50 ans (O'Leary *et al.*, 2016). Ceci ne signifie pas que l'on puisse faire abstraction d'un calibrage et d'une validation des modèles sur le temps long, notamment pour éviter qu'une erreur de prédiction à un pas de temps court ne se cumule d'année en année. Pour cela, des données issues d'expérimentations à long terme sont nécessaires (Johnston & Poulton, 2018) mais leur disponibilité peut être réduite. Il convient donc d'**identifier les structures qui disposent de telles données** et éventuellement, lorsque celles-ci ne sont pas en accès libre, de **formaliser des partenariats pour les récupérer**.

⁶¹ Le titre de cette thèse est, pour l'instant : « Co-conception de systèmes de culture résilients face au changement climatique et fournissant, sur le temps long, une pluralité de services écosystémiques grâce à la diversification des cultures ». Cette thèse est dirigée par Edith Le Cadre mais il est d'ores et déjà prévu qu'à l'obtention de mon diplôme d'Habilitation à Diriger les Recherches, je la co-dirigerai.

⁶² APSIM, Agricultural Production Systems sIMulator (Holzworth *et al.*, 2014) ; DSSAT, Decision Support System for Agrotechnology Transfer (Porter *et al.*, 2019) ; STICS, Simulateur mulTIdisciplinaire pour les Cultures Standard (Brisson *et al.*, 2003)

Encadré 4. Un atelier participatif pour la co-conception de systèmes de culture diversifiés

La première phase de l'atelier a consisté en une séance de remue-méninges pendant laquelle chaque expert a répondu à la question suivante : « *Quelles sont les espèces végétales (i) que vous avez déjà cultivées sur votre exploitation, ou (ii) sur lesquelles vous avez déjà travaillées, ou (iii) que vous connaissez pour d'autres raisons (vous avez lu des articles à leurs sujets, vous en avez entendues parler par des confrères, etc.) ? Listez-les en précisant, pour chacune, au-moins un atout agronomique / environnemental.* ». Après un temps de réflexion individuelle, les réponses ont été mises en commun.

L'idée de cette première phase était d'aboutir à une **liste non contrainte et conséquente de cultures de diversification**, mobilisables dans la suite de l'atelier (33 espèces différentes, avec au-moins un atout explicité ont été mentionnées par les experts).

La deuxième phase de l'atelier a mis les experts en situation, grâce au scénario suivant : « *Suite à une catastrophe environnementale majeure, nous sommes exilés vers une île, isolée du reste du monde, où toutes les espèces que nous avons listées précédemment peuvent être cultivées. Dans les cales du bateau qui nous conduit vers cette île, nous avons toutes les semences et plants de ces différentes espèces. Pendant le trajet, nous nous mettons d'accord pour décider que le plus important est de définir une succession diversifiée de cultures, qui fournit le service écosystémique d'approvisionnement, mais aussi de nombreux autres services [...]. La succession devra favoriser les processus écologiques, et nécessiter peu ou pas d'intrants (en quantité limitée, il reste des bidons de produits phytosanitaires et des sacs d'engrais dans les cales du bateau). Nous n'avons pas à nous soucier de la viabilité économique de cette succession, ni de contraintes techniques, réglementaires, de filières, etc. Quelques animaux – dont des herbivores – sont présents sur l'île et pourraient utiliser certaines de nos cultures mais ils sont capables de trouver seuls d'autres sources de nourriture.* ». Des informations sur le pédoclimat de l'île ont été communiquées au fur et à mesure des échanges. L'idée de cette deuxième phase était d'**amener les experts à réfléchir dans un contexte le moins contraint possible** pour notamment s'affranchir des contraintes socio-économiques à court terme, souvent obstacles à la diversification. La discussion a fait émerger plusieurs règles de conception et une succession de cultures a été proposée : Maïs grain + Haricot sec – Seigle – Colza + Trèfle d'Alexandrie + Vesce – *Épinard* – Lupin + Céréale – *Raygrass d'Italie* + *Trèfle incarnat* – Sarrasin – Épeautre – *Phacélie* – Féverole + Triticale – *Raygrass d'Italie* + *Trèfle* + *Radis fourrager* – Tournesol – Orge + Luzerne – Luzerne – Luzerne – Luzerne (en italique, les cultures intermédiaires). Selon une approche similaire à celle mise en œuvre dans le projet CANTOGETHER (**Moraine et al., 2013**), j'ai demandé aux experts de réaliser une évaluation *ex ante* de la capacité de cette succession à fournir certains services écosystémiques préalablement identifiés.

La troisième phase n'a été abordée que très partiellement : elle devait permettre de faire évoluer, grâce à un scénario en continuité du précédent, la succession de cultures conçue en tenant compte conjointement de la fourniture de services écosystémiques et de la viabilité socio-économique.

- Les ateliers participatifs – impliquant des agriculteurs, des conseillers, des scientifiques, *etc.* – sont au cœur de la plupart des démarches de conception du fait de leurs nombreux atouts. Cependant, **une difficulté dans ces ateliers participatifs peut être de s'abstraire du court terme**. Ceci est difficile car les enjeux à court terme (par exemple, la nécessité de produire des aliments en quantité, de gagner suffisamment d'argent) ont généralement la priorité sur les enjeux à long terme, en particulier pour les agriculteurs. Utiliser, en ateliers, des outils pour « penser à long terme » (*e.g.*, les résultats d'études prospectives, les simulations de modèles de culture) est une voie prometteuse. Il s'agit à la fois d'**amener les participants à penser aux bénéfices à long terme** des systèmes de culture diversifiés, mais aussi à **penser aux changements en cours et à venir qui pourraient modifier les atouts et faiblesses** des systèmes de culture conçus.

Concernant ce dernier point, j'ai eu l'occasion de construire et de co-animer, récemment, un atelier participatif de conception d'une succession de cultures où le temps long était explicitement à prendre en considération ainsi que la fourniture d'une pluralité de services écosystémiques. Cet atelier regroupait huit experts dont deux agriculteurs. Je livre au lecteur un bref descriptif de cet atelier dans l'encadré 4. La réalisation de cet atelier me fournit quelques enseignements pour la suite. Par exemple, il a manqué une réflexion collective sur les services écosystémiques les plus essentiels à fournir. Aussi, il faut mieux aider les experts, en cours d'atelier, à se rendre compte (i) des conséquences sur le temps long de ce qu'ils conçoivent, et (ii) de l'évolution des compromis entre services écosystémiques au cours du temps. De ce point de vue, je m'interroge sur la possibilité d'**utiliser le jeu sérieux SEGAE** (*cf.* la page 64) dans des ateliers de co-conception de systèmes de culture diversifiés ; en effet, de nombreux auteurs ont déjà mobilisé des jeux sérieux pour la conception *e.g.*, Martin *et al.* (2011) et Ryschawy *et al.* (2022). Comme j'ai pu le constater en formation, SEGAE est un outil puissant pour échanger et réfléchir en collectif mais n'ayant pas été créé pour la co-conception, des évolutions seraient nécessaires : par exemple, la possibilité d'introduire simplement de nouvelles successions de culture, une prise en compte de davantage de cultures, la création de critères relatifs à la résilience des systèmes. Ceci pourrait faire l'objet d'une thèse, co-encadrée avec Olivier Godinot, avec deux objectifs principaux : l'un portant sur les évolutions du jeu sérieux actuel pour pouvoir l'utiliser dans des ateliers de co-conception et l'autre portant sur la réalisation de quelques ateliers avec le nouveau jeu sérieux.

2.2. Les différents pas de temps pour l'évaluation

Évaluer à long terme des systèmes de culture devrait réduire les limites des évaluations généralement réalisées (quasi-)exclusivement à court terme *e.g.*, John & Babu (2021). Pour des raisons évidentes, le temps court ne peut être toutefois négligé : **les temps court, moyen et long devraient être considérés dans l'évaluation des systèmes de culture diversifiés**. Pour réussir cette intégration de différents pas de temps, il semble nécessaire de renouveler certains critères et indicateurs de l'évaluation. Dans l'article de **Carof *et al.* (2022)**, nous posons un premier principe pour ceux-ci : ils doivent permettre d'examiner non seulement les performances moyennes des systèmes de culture mais aussi leur variabilité au cours du temps. Autrement dit, les systèmes de culture diversifiés sont à évaluer du point de

Tableau 4. Les indicateurs généralement pris en compte ne suffisent pas pour évaluer à différents pas de temps les systèmes de culture diversifiés : il faut donc en proposer de nouveaux, comme ceux listés ici.

Dimension	Indicateur « classique »	Nouvel indicateur
Économique	Rendement par culture	Stabilité du rendement
	Marge brute par culture	Marge brute de la rotation
Environnement	Bilan azoté	Bilan du phosphore
	Teneur en matières organiques	Dynamique des matières organiques
	Émission de gaz à effet de serre	Résilience de l'activité microbienne
		Indice de diversité (Shannon)
Social	Temps de travail annuel	Période de surcharge de travail

vue de leur durabilité comme de leur résilience (face au changement climatique ou aux fluctuations économiques).

À ce propos, je viens d'encadrer un stage ayant permis de co-construire un prototype d'outil évaluant, conjointement et sur plusieurs critères, la durabilité et la résilience d'exploitations agricoles (**Babin et al., 2022**). Si ce prototype concerne l'évaluation de systèmes de production, certaines réflexions initiées s'adaptent à l'évaluation de systèmes de culture. Par exemple, nous avons interrogé la **notion d'optimum de production** : la résilience d'un système peut venir du fait que volontairement, l'agriculteur produit en deçà de l'optimum, établi au regard d'une situation moyenne, afin de préserver une flexibilité opérationnelle lorsque des aléas climatiques ou économiques dommageables surviennent. Le système est donc conçu en intégrant des « marges de manœuvre » *i.e.*, des composantes pas toujours utiles mais mobilisables si besoin. Un tel système, s'il est peut-être moins efficace qu'un autre conçu sans ces marges de manœuvre, est sans doute plus résilient, en revanche. En complément de ce travail, dans l'article de **Carof et al. (2022)**, nous proposons aussi quelques indicateurs nouveaux (Tableau 4) qu'il conviendra de mettre à l'épreuve du terrain et de compléter dans le cadre de ce projet scientifique.

2.3. Conclusion

Avant de mettre un point final à ce document, j'assure le lecteur de l'enthousiasme que j'ai eu à rédiger le bilan de mes activités pour synthétiser les résultats obtenus grâce à mes travaux. J'ai aussi apprécié cette projection dans l'avenir permise par la rédaction de mon projet scientifique : les questions que j'y soulève occuperont certainement mes activités de recherche dans les prochaines années. Je souhaite qu'elles intéressent également mes collègues proches, cités à plusieurs reprises dans ce document, car le travail en équipe est pour moi primordiale. Enfin, j'aimerais renforcer le lien entre mes activités de recherche et la formation supérieure agronomique pour donner aux cadres de demain les éléments de réflexion les plus actuels pour poursuivre la transition agroécologique de l'agriculture.

Références bibliographiques

- Abiven, S., Menasseri, S., Chenu, C., 2009. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability – A literature analysis. *Soil Biology and Biochemistry* 41, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.09.015>
- Agreste, 2014. Enquête Pratiques culturales 2011. Principaux résultats, Agreste Les Dossiers.
- Allwood, J.M., Ashby, M.F., Gutowski, T.G., Worrell, E., 2013. Material efficiency: providing material services with less material production. *Philosophical Transactions A* 371, 20120496. <https://doi.org/10.1098/rsta.2012.0496>
- Andréani, E., 1967. Le coût d'opportunité. *Revue économique* 18, 840–858. <https://doi.org/10.3406/reco.1967.407791>
- Arulnathan, V., Heidari, M.D., Doyon, M., Li, E., Pelletier, N., 2020. Farm-level decision support tools: A review of methodological choices and their consistency with principles of sustainability assessment. *Journal of Cleaner Production* 256, 120410. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120410>
- Auberger, J., van der Werf, H., Haese, C., Gésan-Guiziou, G., Aubin, J., 2013. MEANS : une plateforme informatique INRA pour l'analyse multicritère de la durabilité des systèmes agricoles et agro-alimentaires. *Innovations Agronomiques* 31, 169–181.
- Augé-Laribé, M., 1949. Essai de définition des termes de l'économie rurale. *Économie rurale* 1, 31–39. <https://doi.org/10.3406/ecoru.1949.1144>
- Babin, C., Godinot, O., Auberger, J., **Carof, M.**, 2022. A method to evaluate the sustainability and resilience of grass-based dairy farms in Brittany, in: *Diversification & Digitalisation – Trends That Shape Future Agriculture*. Presented at the XVII ESA Congress, Potsdam, Germany, pp. 356–357.
- Bachinger, J., Zander, P., 2007. ROTOR, a tool for generating and evaluating crop rotations for organic farming systems. *European Journal of Agronomy* 26, 130–143. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2006.09.002>
- 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. *Agronomy for Sustainable Development* 38, 33. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0512-8>
- 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. *Agronomy for Sustainable Development* 35, 911–935. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0277-7>
- Beguïn, E., Hostiou, N., Madelrieux, S., Jacquot, A.-L., Fagon, J., Chauvat, S., romain, D., Briand, P., céline, C., 2021. Mieux intégrer le travail dans la stratégie des grandes exploitations laitières, un enjeu majeur pour leur pérennité. *Innovations Agronomiques* 82, 263–282. <https://doi.org/10.15454/x01d-7846>
- Beillouin, D., Ben-Ari, T., Malézieux, E., Seufert, V., Makowski, D., 2021. Positive but variable effects of crop diversification on biodiversity and ecosystem services. *Global Change Biology* 27, 4697–4710. <https://doi.org/10.1111/gcb.15747>
- Belmin, R., Malézieux, E., Basset-Mens, C., Martin, T., Mottes, C., Della Rossa, P., Vayssières, J.-F., Le Bellec, F., 2022. Designing agroecological systems across scales: a new analytical framework. *Agronomy for Sustainable Development* 42, 3. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00741-9>
- Bockstaller, C., Girardin, P., van der Werf, H.M.G., 1997. Use of agro-ecological indicators for the evaluation of farming systems. *European Journal of Agronomy* 7, 261–270. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(97\)00041-5](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(97)00041-5)
- Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., Bussièrre, F., Cabidoche, Y.M., Cellier, P., Debaeke, P., Gaudillère, J.P., Hénault, C., Maraux, F., Seguin, B., Sinoquet, H., 2003. An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy, Modelling Cropping Systems: Science, Software and Applications* 18, 309–332. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00110-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00110-7)

- Capillon, A., Séguéy, L., 2002. Écosystèmes cultivés et stockage du carbone. Cas des systèmes de culture en semis direct avec couverture végétale. *Comptes Rendus des Séances de l'Académie d'Agriculture de France* 88, 63–70.
- Caraes, C., Jouan, J., Ridier, A., 2018. La prospective sur l'autonomie protéique dans les filières animales de l'Ouest projet TERUNIC : les scénarios. AGROCAMPUS OUEST, Rennes, France.
- Carof, M.**, 2006. Fonctionnement de peuplements en semis direct associant du blé tendre d'hiver (*Triticum aestivum* L.) à différentes plantes de couverture en climat tempéré (Thèse de doctorat). INA P-G, Paris, France.
- Carof, M.**, Colomb, B., Aveline, A., 2013. A guide for choosing the most appropriate method for multi-criteria assessment of agricultural systems according to decision-makers' expectations. *Agricultural Systems* 115, 51–62. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2012.09.011>
- Carof, M.**, de Tourdonnet, S., Coquet, Y., Hallaire, V., Roger-Estrade, J., 2007a. Hydraulic conductivity and porosity under conventional and no-tillage and the effect of three species of cover crop in northern France. *Soil Use and Management* 23, 230–237. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2007.00085.x>
- Carof, M.**, de Tourdonnet, S., Saulas, P., Le Floch, D., Roger-Estrade, J., 2007b. Undersowing wheat with different living mulches in a no-till system. I. Yield analysis. *Agronomy for Sustainable Development* 27, 347–356. <https://doi.org/10.1051/agro:2007016>
- Carof, M.**, de Tourdonnet, S., Saulas, P., Le Floch, D., Roger-Estrade, J., 2007c. Undersowing wheat with different living mulches in a no-till system. II. Competition for light and nitrogen. *Agronomy for Sustainable Development* 27, 357–365. <https://doi.org/10.1051/agro:2007017>
- Carof, M.**, Godinot, O., 2018a. A free online tool to calculate three nitrogen-related indicators for farming systems. *Agricultural Systems* 162, 28–33. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.01.015>
- Carof, M.**, Godinot, O., 2018b. Survey data from 38 integrated crop-livestock farming systems in western France. *Data in Brief* 18, 723–726. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.03.066>
- Carof, M.**, Godinot, O., Le Cadre, E., 2022. Biodiversity-based cropping systems: A long-term perspective is necessary. *Science of The Total Environment* 838, 156022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156022>
- Carof, M.**, Godinot, O., Ridier, A., 2019. Diversity of protein-crop management in western France. *Agronomy for Sustainable Development* 39, 15. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0561-7>
- Carof, M.**, Raimbault, J., Merrien, A., Leterme, P., 2015. Survey of 47 oilseed flax (*Linum usitatissimum* L.) growers to identify ways to expand its cultivation in France. *OCL* 22, 1–14. <https://doi.org/10.1051/ocl/2015043>
- Cartron, F., Fichet, J.-L., 2020. Vers une alimentation durable : un enjeu sanitaire, social, territorial et environnemental majeur pour la France (Rapport d'information No. 476), Session ordinaire de 2019-2020. Sénat (France).
- Céréopa, 2017. La protéine dans tous ses états. Rapport sur l'indépendance protéique de l'élevage français. Paris, France.
- Cernay, C., Ben-Ari, T., Pelzer, E., Meynard, J.-M., Makowski, D., 2015. Estimating variability in grain legume yields across Europe and the Americas. *Scientific Reports* 5, 11171.
- Chopin, P., Mubaya, C.P., Descheemaeker, K., Öborn, I., Bergkvist, G., 2021. Avenues for improving farming sustainability assessment with upgraded tools, sustainability framing and indicators. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 41, 19. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00674-3>
- CNRS, Université de Lorraine, 2012. Critère, subst. masc. CNRTL, Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales, Portail lexical.
- 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 Research* 54, 541–555. <https://doi.org/10.1111/wre.12112>
- Colbach, N., Kurstjens, D.A.G., Munier-Jolain, N.M., Dalbiès, A., Doré, T., 2010. Assessing non-chemical weeding strategies through mechanistic modelling of blackgrass

- (*Alopecurus myosuroides* Huds.) dynamics. *European Journal of Agronomy* 32, 205–218. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2009.11.005>
- Colomb, B., Aveline, A., **Carof, M.**, 2011. Une évaluation multicritère qualitative de la durabilité de systèmes de grandes cultures biologiques. Quels enseignements ? Restitution des programmes RotAB et CITODAB (Document d'analyse PSDR3 Midi-Pyrénées-Projet CITODAB). INRA, Toulouse, France.
- Colomb, B., **Carof, M.**, Aveline, A., Bergez, J.-E., 2013. Stockless organic farming: strengths and weaknesses evidenced by a multicriteria sustainability assessment model. *Agronomy for Sustainable Development* 33, 593–608. <https://doi.org/10.1007/s13593-012-0126-5>
- Coppenet, M., 1975. Bilan des éléments fertilisants sur les exploitations d'élevage. *Fourrages* 62, 119–132.
- Craheix, D., Angevin, F., Bergez, J.-E., Bockstaller, C.C., Colomb, B.B., Guichard, L.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. *Innovations Agronomiques* 20, 35.
- Dawson, J.J.C., Smith, P., 2007. Carbon losses from soil and its consequences for land-use management. *Science of The Total Environment* 382, 165–190. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.03.023>
- Dedieu, B., Laurent, C., Mundler, P., 1999. Organisation du travail dans les systèmes d'activités complexes. *Économie rurale* 253, 28–35. <https://doi.org/10.3406/ecoru.1999.5111>
- Della Rossa, P., Mottes, C., Cattan, P., Le Bail, M., 2022. A new method to co-design agricultural systems at the territorial scale - Application to reduce herbicide pollution in Martinique. *Agricultural Systems* 196, 103337. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103337>
- Descheemaeker, K., Ronner, E., Ollenburger, M., Franke, A.C., Klapwijk, C.J., Falconnier, G.N., Wichern, J., Giller, K.E., 2019. Which options fit best? Operationalizing the socio-ecological niche concept. *Experimental Agriculture* 55, 169–190. <https://doi.org/10.1017/S001447971600048X>
- Diakité, Z.R., Corson, M.S., Brunschwig, G., Baumont, R., Mosnier, C., 2019. Profit stability of mixed dairy and beef production systems of the mountain area of southern Auvergne (France) in the face of price variations: Bioeconomic simulation. *Agricultural Systems* 171, 126–134. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.01.012>
- Doré, T., Le Bail, M., Martin, P., Ney, B., Roger-Estrade, J. (Eds.), 2006. *L'agronomie aujourd'hui*, 1ère édition. ed, Synthèses. Éditions Quae, Versailles, France.
- Dronne, Y., 2018. Les matières premières agricoles pour l'alimentation humaine et animale : l'UE et la France. *INRAE Productions Animales* 31, 181–200. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2018.31.3.2347>
- Dupraz, P., 1997. La spécialisation des exploitations agricoles : changements techniques et prix des facteurs. *Revue d'Études en Agriculture et Environnement* 45, 93–122. <https://doi.org/10.3406/reae.1997.1559>
- Edmeades, D.C., 2003. The long-term effects of manures and fertilisers on soil productivity and quality: a review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 66, 165–180. <https://doi.org/10.1023/A:1023999816690>
- Ertas, A., Jones, J.C., 1996. *The engineering design process*, 2nd edition. ed. Wiley, New-York (E.-U.).
- FAO, 2018. FAOSTAT Database [WWW Document]. FAOSTAT. URL <http://www.fao.org/faostat/en/> (accessed 5.22.18).
- Faverdin, P., Chardon, X., Rigolot, C., Baratte, C., Raison, C., Piquemal, B., Martin-Clouaire, R., Rellier, J.-P., Le Gall, A., Dourmad, J.-Y., Leterme, P., Paillat, J.-M., Delaby, L., Garcia, F., Peyraud, J.-L., Poupa, J.-C., Morvan Thierry, Espagnol, S., 2011. Mélodie, un simulateur d'une exploitation d'élevage pour étudier les relations entre conduites des systèmes et risques pour l'environnement. *Innovations Agronomiques* 12, 109–119.
- Feschet, P., Lairez, J., 2015. Chapitre 2. Débuter l'évaluation : les étapes indispensables, in: Lairez, J., Feschet, P., Aubin, J., Bockstaller, C., Bouvarel, I. (Eds.), *Agriculture et*

- développement durable - Guide pour l'évaluation multicritère, Sciences en partage. Éditions Quae / Educagri, pp. 31–57.
- Gaba, S., Lescourret, F., Boudsocq, S., Enjalbert, J., Hinsinger, P., Journet, E.-P., Navas, M.-L., Wéry, J., Louarn, G., Malézieux, E., Pelzer, E., Prudent, M., Ozier-Lafontaine, H., 2015. Multiple cropping systems as drivers for providing multiple ecosystem services: from concepts to design. *Agronomy for Sustainable Development* 35, 607–623. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0272-z>
- Gardarin, A., Celette, F., Naudin, C., Piva, G., Valantin-Morison, M., Vrignon-Brenas, S., Verret, V., Médiène, S., 2022. Intercropping with service crops provides multiple services in temperate arable systems: a review. *Agronomy for Sustainable Development* 42, 39. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00771-x>
- Godinot, O., **Carof, M.**, Vertès, F., Leterme, P., 2014. SyNE: An improved indicator to assess nitrogen efficiency of farming systems. *Agricultural Systems* 127, 41–52. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2014.01.003>
- Godinot, O., Leterme, P., Vertès, F., **Carof, M.**, 2016. Indicators to evaluate agricultural nitrogen efficiency of the 27 member states of the European Union. *Ecological Indicators* 66, 612–622. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.02.007>
- Godinot, O., Leterme, P., Vertès, F., Faverdin, P., **Carof, M.**, 2015. Relative nitrogen efficiency, a new indicator to assess crop livestock farming systems. *Agronomy for Sustainable Development* 35, 857–868. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0281-6>
- Godinot, O., Vertès, F., Leterme, P., **Carof, M.**, 2020. Nouveaux indicateurs d'efficience de l'azote à l'échelle de l'exploitation. *Fourrages* 241, 45–56.
- Gohin, A., Bareille, F., Cariou, S., Dupraz, P., Chouteau, R., Duflot, B., Rubin, B., 2016. Les emplois liés aux filières de l'élevage en Bretagne : état des lieux quantitatif et qualitatif (No. 143), *Études & documents. Commissariat général au développement durable*.
- Hache, E., 2015. Géopolitique des protéines. *Revue internationale et stratégique* 97, 36–46. <https://doi.org/10.3917/ris.097.0036>
- Holzworth, D.P., Huth, N.I., deVoil, P.G., Zurcher, E.J., Herrmann, N.I., McLean, G., Chenu, K., van Oosterom, E.J., Snow, V., Murphy, C., Moore, A.D., Brown, H., Whish, J.P.M., Verrall, S., Fainges, J., Bell, L.W., Peake, A.S., Poulton, P.L., Hochman, Z., Thorburn, P.J., Gaydon, D.S., Dalgliesh, N.P., Rodriguez, D., Cox, H., Chapman, S., Doherty, A., Teixeira, E., Sharp, J., Cichota, R., Vogeler, I., Li, F.Y., Wang, E., Hammer, G.L., Robertson, M.J., Dimes, J.P., Whitbread, A.M., Hunt, J., van Rees, H., McClelland, T., Carberry, P.S., Hargreaves, J.N.G., MacLeod, N., McDonald, C., Harsdorf, J., Wedgwood, S., Keating, B.A., 2014. APSIM – Evolution towards a new generation of agricultural systems simulation. *Environmental Modelling & Software* 62, 327–350. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.07.009>
- Hufnagel, J., Reckling, M., Ewert, F., 2020. Diverse approaches to crop diversification in agricultural research. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 40, 14. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00617-4>
- Huyghe, C. (Ed.), 2005. Prairies et cultures fourragères en France - Entre logiques de production et enjeux territoriaux, 1ère édition. ed, Un point sur... INRA Éditions.
- INRAE, 2021a. INRAE 2030. Partageons la science et l'innovation pour un avenir durable. INRAE.
- INRAE, 2021b. Département AgroEcoSystem. Schéma stratégique 2021-2025.
- Ishizaka, A., Nemery, P. (Eds.), 2013. Multi-criteria decision analysis: methods and software. Wiley, Chichester, United Kingdom.
- Jacquet, F., Jouan, J., 2022. État des lieux de l'utilisation des pesticides, in: Jacquet, F., Jeuffroy, M.-H., Jouan, J., Le Cadre, E., Malausa, T., Reboud, X., Huyghe, C. (Eds.), *Zéro pesticide. Un nouveau paradigme de recherche pour une agriculture durable, Synthèses*. Éditions Quae, Versailles, France, pp. 21–57.
- Jeuffroy, M.-H., Loyce, C., Lefeuvre, T., Valantin-Morison, M., Colnenne-David, C., Gauffreteau, A., Médiène, S., Pelzer, E., Reau, R., Salembier, C., Meynard, J.-M., 2022. Design workshops for innovative cropping systems and decision-support tools: Learning from 12 case studies. *European Journal of Agronomy* 139, 126573. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126573>

- John, D.A., Babu, G.R., 2021. Lessons from the aftermaths of Green Revolution on food system and health. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 5, 644559. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.644559>
- Johnston, A.E., Poulton, P.R., 2018. The importance of long-term experiments in agriculture: their management to ensure continued crop production and soil fertility; the Rothamsted experience. *European Journal of Soil Science* 69, 113–125. <https://doi.org/10.1111/ejss.12521>
- Jouan, J., **Carof, M.**, Baccar, R., Bareille, N., Bastian, S., Brogna, D., Burgio, G., Couvreur, S., Cupial, M., Dufrêne, M., Dumont, B., Gontier, P., Jacquot, A.-L., Kanski, J., Magagnoli, S., Makulska, J., Pérès, G., Ridier, A., Salou, T., Sgolastra, F., Szelag-Sikora, A., Tabor, S., Tombarkiewicz, B., Weglarz, A., Godinot, O., 2021a. SEGAE: An online serious game to learn agroecology. *Agricultural Systems* 191, 103145. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103145>
- Jouan, J., **Carof, M.**, Godinot, O., 2021b. SEGAE : un jeu sérieux pour enseigner l'agroécologie. *Fourrages* 246, 1–9.
- Jouan, J., De Graeuwe, M., **Carof, M.**, Baccar, R., Bareille, N., Bastian, S., Brogna, D., Burgio, G., Couvreur, S., Cupial, M., Dumont, B., Jacquot, A.-L., Magagnoli, S., Makulska, J., Maréchal, K., Pérès, G., Ridier, A., Salou, T., Tombarkiewicz, B., Sgolastra, F., Godinot, O., 2020a. Learning interdisciplinarity and systems approaches in agroecology: experience with the serious game SEGAE. *Sustainability* 12, 4351. <https://doi.org/10.3390/su12114351>
- Jouan, J., Ridier, A., **Carof, M.**, 2020b. Legume production and use in feed: analysis of levers to improve protein self-sufficiency from foresight scenarios. *Journal of Cleaner Production* 274, 123085. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123085>
- Jouan, J., Ridier, A., **Carof, M.**, 2020c. SYNERGY: A regional bio-economic model analyzing farm-to-farm exchanges and legume production to enhance agricultural sustainability. *Ecological Economics* 175, 106688. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106688>
- Jouan, J., Ridier, A., **Carof, M.**, 2019. Economic drivers of legume production: approached via opportunity costs and transaction costs. *Sustainability* 11, 705. <https://doi.org/10.3390/su11030705>
- Keichinger, O., Viguier, L., Corre-Hellou, G., Messéan, A., Angevin, F., Bockstaller, C., 2021. Un indicateur évaluant la diversité globale des rotations : de la diversité des cultures aux services écosystémiques. *Agriculture, Environnement & Sociétés* 11, 1–19. <https://doi.org/10.54800/dgr543>
- Labreuche, J., Laurent, F., Roger-Estrade, J. (Eds.), 2014. *Faut-il travailler le sol ? Acquis et innovations pour une agriculture durable*. Editions Quæ/Arvalis-Institut du végétal, Versailles, France.
- Lairez, J., Feschet, P., 2015a. Chapitre 1. Du développement durable à l'évaluation multicritère : les bases, in: Lairez, J., Feschet, P., Aubin, J., Bockstaller, C., Bouvarel, I. (Eds.), *Agriculture et développement durable - Guide pour l'évaluation multicritère*, Sciences en partage. Éditions Quæ / Educagri, pp. 13–30.
- Lairez, J., Feschet, P., 2015b. Chapitre 5. Choisir une méthode d'évaluation, in: Lairez, J., Feschet, P., Aubin, J., Bockstaller, C., Bouvarel, I. (Eds.), *Agriculture et développement durable - Guide pour l'évaluation multicritère*, Sciences en partage. Éditions Quæ / Educagri, pp. 129–168.
- 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. *Agronomy for Sustainable Development* 27, 101–110. <https://doi.org/10.1051/agro:2006037>
- Larousse, 2022. Définitions : original - Dictionnaire de français Larousse [WWW Document]. Larousse. URL <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/original/56496> (accessed 7.27.22).
- Lavergne, S., Vanasse, A., Thivierge, M.-N., Halde, C., 2021. Using fall-seeded cover crop mixtures to enhance agroecosystem services: A review. *Agrosystems, Geosciences & Environment* 4, e20161. <https://doi.org/10.1002/agg2.20161>
- Leterme, P., Nesme, T., Regan, J., Korevaar, H., 2019. Environmental benefits of farm- and district-scale crop-livestock integration: a European perspective, in: Lemaire, G., Carvalho, P.C.D.F., Kronberg, S., Recous, S. (Eds.), *Agroecosystem Diversity*.

- Reconciling Contemporary Agriculture and Environmental Quality. Academic Press, pp. 335–349. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811050-8.00021-2>
- Loyce, C., Wery, J., 2006. Chapitre 3. Les outils des agronomes pour l'évaluation et la conception de systèmes de culture, in: Doré, T., Le Bail, M., Martin, P., Ney, B., Roger-Estrade, J. (Eds.), *L'agronomie Aujourd'hui, Synthèses*. Éditions Quae, pp. 77–95.
- MAA, 2020. La stratégie nationale protéines végétales. Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, Paris, France.
- MAAF, 2014. Plan Protéines végétales pour la France 2014-2020. Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, Paris, France.
- Madelrieux, S., Dedieu, B., Dobremez, L., 2006. La zootechnie et l'organisation du travail : modéliser les interactions entre conduite d'élevage et main-d'œuvre. *Fourrages* 35.
- Marta-Costa, A.A., Silva, E. (Eds.), 2013. *Methods and procedures for building sustainable farming systems. Application in the European context*. Springer.
- Martin, G., Felten, B., Duru, M., 2011. Forage rummy: A game to support the participatory design of adapted livestock systems. *Environmental Modelling & Software* 26, 1442–1453. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.08.013>
- Martin, G., Martin-Clouaire, R., Duru, M., 2013. Farming system design to feed the changing world. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 33, 131–149. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0075-4>
- McLauchlan, K., 2006. The nature and longevity of agricultural impacts on soil carbon and nutrients: a review. *Ecosystems* 9, 1364–1382. <https://doi.org/10.1007/s10021-005-0135-1>
- Merlos, F.A., Hijmans, R.J., 2022. Potential, attainable, and current levels of global crop diversity. *Environmental Research Letters* 17, 044071. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac62ab>
- Merrien, A., Arjauré, G., **Carof, M.**, Leterme, P., 2013. Freins et motivations à la diversification des cultures dans les exploitations agricoles : étude de cas en Vendée. *OCL* 20, 1–6. <https://doi.org/10.1051/ocl/2013009>
- Meunier, C., Alletto, L., Bedoussac, L., Bergez, J.-E., Casadebaig, P., Constantin, J., Gaudio, N., Mahmoud, R., Aubertot, J.-N., Celette, F., Guinet, M., Jeuffroy, M.-H., Robin, M.-H., Médiène, S., Fontaine, L., Nicolardot, B., Pelzer, E., Souchère, V., Voisin, A.-S., Rosiès, B., Casagrande, M., Martin, G., 2022. A modelling chain combining soft and hard models to assess a bundle of ecosystem services provided by a diversity of cereal-legume intercrops. *European Journal of Agronomy* 132, 126412. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126412>
- Meynard, J.-M., Messéan, A., Charlier, A., Charrier, F., Fares, M., Bail, M.L., Magrini, M.-B., Savini, I., 2013a. 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., Messéan, A., Charlier, A., Charrier, F., Farès, M., Le Bail, M., Magrini, M.-B., 2013b. Freins et leviers à la diversification des cultures. Etude au niveau des exploitations agricoles et des filières (Rapport d'étude). INRA, France.
- Minasny, B., Malone, B.P., McBratney, A.B., Angers, D.A., Arrouays, D., Chambers, A., Chaplot, V., Chen, Z.-S., Cheng, K., Das, B.S., Field, D.J., Gimona, A., Hedley, C.B., Hong, S.Y., Mandal, B., Marchant, B.P., Martin, M., McConkey, B.G., Mulder, V.L., O'Rourke, S., Richer-de-Forges, A.C., Odeh, I., Padarian, J., Paustian, K., Pan, G., Poggio, L., Savin, I., Stolbovoy, V., Stockmann, U., Sulaeman, Y., Tsui, C.-C., Vågen, T.-G., van Wesemael, B., Winowiecki, L., 2017. Soil carbon 4 per mille. *Geoderma* 292, 59–86. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002>
- Moraine, M., Melac, P., Ryschawy, J., Duru, M., Therond, O., 2017. A participatory method for the design and integrated assessment of crop-livestock systems in farmers' groups. *Ecological Indicators* 72, 340–351. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.08.012>
- Moraine, M., Therond, O., **Carof, M.**, Duru, M., 2013. Innovative MFS and ex ante evaluation based on Light Design methodology (Deliverable No. D1.4-5), CANTOGETHER (Grant agreement no.: FP7-289328).
- Murphy-Bokern, D., Stoddard, F.L., Watson, C.A. (Eds.), 2017. *Legumes in cropping systems*. CABI, Oxfordshire, United Kingdom.

- Notaro, M., Deheuvels, O., Gary, C., 2022a. Participative design of the spatial and temporal development of improved cocoa agroforestry systems for yield and biodiversity. *European Journal of Agronomy* 132, 126395. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126395>
- Notaro, M., Gary, C., Le Coq, J.-F., Metay, A., Rapidel, B., 2022b. How to increase the joint provision of ecosystem services by agricultural systems. Evidence from coffee-based agroforestry systems. *Agricultural Systems* 196, 103332. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103332>
- O'Leary, G.J., Liu, D.L., Ma, Y., Li, F.Y., McCaskill, M., Conyers, M., Dalal, R., Reeves, S., Page, K., Dang, Y.P., Robertson, F., 2016. Modelling soil organic carbon 1. Performance of APSIM crop and pasture modules against long-term experimental data. *Geoderma* 264, 227–237. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.11.004>
- Papy, F., 2001. Interdépendance des systèmes de culture dans l'exploitation, in: Malézieux, E., Trébuil, G., Jaeger, M. (Eds.), *Modélisation des agroécosystèmes et aide à la décision*, Repères. Cirad, pp. 51–74.
- Parent, D., Bélanger, V., Vanasse, A., Allard, G., Pellerin, D., 2013. Chapter 16. Method for the evaluation of farm sustainability in Quebec, Canada: the social aspect, in: Marta-Costa, A.A., Silva, E. (Eds.), *Methods and Procedures for Building Sustainable Farming Systems. Application in the European Context*. Springer, pp. 239–250.
- Pellerin, S., 2020. Autonomie protéique des élevages et gestion de l'azote. Quels sont les enjeux ?, in: *Cultivons l'autonomie protéique*. Presented at the Rencontres régionales de la recherche, du développement et de la formation, agriweb.tv, pp. 8–14.
- Pépin, A., Morel, K., van der Werf, H.M.G., 2021. Conventionalised vs. agroecological practices on organic vegetable farms: Investigating the influence of farm structure in a bifurcation perspective. *Agricultural Systems* 190, 103129. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103129>
- Peyraud, J.-L., Cellier, P., Aarts, F., Béline, F., Bockstaller, C.C., Bourblanc, M., Delaby, L., Donnars, C., Dourmad, J., Dupraz, P., Durand, P., Faverdin, P., Fiorelli, J.-L., Gaigné, C., Girard, A., Guillaume, F., Kuikman, P., Langlais, A., Le Goffe, P., Le Perchec, S., Lescoat, P., Morvan, T., Nicourt, C., Parnaudeau, V., Rechauchère, O., Rochette, P., Vertès, F., Veysset, P., 2012. *Les flux d'azote liés aux élevages : réduire les pertes, rétablir les équilibres*, Expertise scientifique collective. Inra, France. <https://doi.org/10.15454/hb37-n118>
- Plénet, D., Simon, S., 2015. Une démarche de conception et d'évaluation de systèmes de culture pour des vergers plus durables. *Sciences Eaux & Territoires* 16, 58–63. <https://doi.org/10.3917/set.016.0058>
- Porter, C., Boote, K., Shelia, V., Wilkens, P., Singh, U., White, J., Asseng, S., Lizaso, J., Moreno Cadena, P., Pavan, W., Ogoshi, R., Hunt, L., Tsuji, G., Jones, J., 2019. The DSSAT crop modeling ecosystem, in: Boote, K. (Ed.), *Advances in Crop Modelling for a Sustainable Agriculture*. Burleigh Dodds Science Publishing, Cambridge (United Kingdom), pp. 173–216. <https://doi.org/10.19103/AS.2019.0061.10>
- Preissel, S., Reckling, M., Schlaefke, N., Zander, P., 2015. Magnitude and farm-economic value of grain legume pre-crop benefits in Europe: A review. *Field Crops Research* 175, 64–79. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.01.012>
- Prost, L., 2019. *La recherche agronomique au prisme de la conception (Habilitation à Diriger des Recherches)*. Université Paris-Est Créteil, Paris (France).
- 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. *Agricultural Systems* 164, 122–132. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.04.009>
- Puech, C., Brulaire, A., Paraiso, J., Faloya, V., 2021. Collective design of innovative agroecological cropping systems for the industrial vegetable sector. *Agricultural Systems* 191, 103153. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103153>
- 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. *European Journal of Agronomy* 76, 186–197. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.11.005>

- Regan, J., Godinot, O., Nesme, T., 2016. Evidence of rebound effect in agriculture: recoupling crops and livestock at the discrit scale does not always reduce nitrogen losses, in: Aspects of Applied Biology 133. Presented at the ESA14 - Growing landscapes - Cultivating innovative agricultural systems, Association of Applied Biologists, Edinburgh, Scotland, p. 8.1-8.2.
- Ridier, A., Chaib, K., Roussy, C., 2016. A Dynamic Stochastic Programming model of crop rotation choice to test the adoption of long rotation under price and production risks. *European Journal of Operational Research* 252, 270–279. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.12.025>
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F.S., Lambin, E.F., Lenton, T.M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H.J., Nykvist, B., de Wit, C.A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P.K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., Corell, R.W., Fabry, V.J., Hansen, J., Walker, B., Liverman, D., Richardson, K., Crutzen, P., Foley, J.A., 2009. A safe operating space for humanity. *Nature* 461, 472–475. <https://doi.org/10.1038/461472a>
- Roguet, C., Gagné, C., Chatellier, V., Cariou, S., Carlier, M., Chenut, R., Daniel, K., Perrot, C., 2015. Spécialisation territoriale et concentration des productions animales européennes : état des lieux et facteurs explicatifs. *INRAE Productions Animales* 28, 5–22. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2015.28.1.3007>
- Ryschawy, J., Choisis, N., Choisis, J.P., Joannon, A., Gibon, A., 2012. Mixed crop-livestock systems: an economic and environmental-friendly way of farming? *Animal* 6, 1722–1730. <https://doi.org/10.1017/S1751731112000675>
- Ryschawy, J., Grillot, M., Charmeau, A., Pelletier, A., Moraine, M., Martin, G., 2022. A participatory approach based on the serious game Dynamix to co-design scenarios of crop-livestock integration among farms. *Agricultural Systems* 201, 103414. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103414>
- 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. *Agronomy for Sustainable Development* 29, 447–461. <https://doi.org/10.1051/agro/2009006>
- Sailley, M., Cordier, C., Courtonne, J.-Y., Dufлот, B., Cadudal, F., Perrot, C., Brion, A., Baumont, R., 2022. Quantifier et segmenter les flux de matières premières utilisées en France par l'alimentation animale. *INRAE Productions Animales* 34, 273–292. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2021.34.4.5396>
- Salembier, C., Elverdin, J.H., Meynard, J.-M., 2015. Tracking on-farm innovations to unearth alternatives to the dominant soybean-based system in the Argentinean Pampa. *Agronomy for Sustainable Development* 36, 1. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0343-9>
- Samset, K., Christensen, T., 2017. Ex ante project evaluation and the complexity of early decision-making. *Public Organization Review* 17, 1–17. <https://doi.org/10.1007/s11115-015-0326-y>
- Sebillotte, C., 2003. Autonomie en protéines et développement durable dans l'Union européenne. *Dossier de l'environnement de l'INRA* 24, 117–123.
- Selbonne, S., Guindé, L., Belmadani, A., Bonine, C., L. Causeret, F., Duval, M., Sierra, J., Blazy, J.M., 2022. Designing scenarios for upscaling climate-smart agriculture on a small tropical island. *Agricultural Systems* 199, 103408. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103408>
- Simon, J.-C., Le Corre, L., 1992. Le bilan apparent de l'azote à l'échelle de l'exploitation agricole : méthodologie, exemples de résultats. *Fourrages* 129, 79–94.
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S.E., Fetzer, I., Bennett, E.M., Biggs, R., Carpenter, S.R., de Vries, W., de Wit, C.A., Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Mace, G.M., Persson, L.M., Ramanathan, V., Reyers, B., Sörlin, S., 2015. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science* 347, 1259855. <https://doi.org/10.1126/science.1259855>
- Surleau-Chambenoit, C., Morin, A., Galan, M.-B., Cariolle, M., Leclercq, C., Guichard, L., Bockstaller, C.C., 2013. PLAGÉ, un réseau d'acteurs et une plate-forme WEB dédiée à l'évaluation agri-environnementale et de la durabilité des pratiques agricoles, des exploitations agricoles et des territoire. *Innovations Agronomiques* 31, 15–26.

- Sutton, M.A., Oenema, O., Erisman, J.W., Leip, A., van Grinsven, H., Winiwarter, W., 2011. Too much of a good thing. *Nature* 472, 159–161. <https://doi.org/10.1038/472159a>
- Talukder, B., Blay-Palmer, A., vanLoon, G.W., Hipel, K.W., 2020. Towards complexity of agricultural sustainability assessment: Main issues and concerns. *Environmental and Sustainability Indicators* 6, 100038. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2020.100038>
- Tamburini, G., Bommarco, R., Wanger, T.C., Kremen, C., van der Heijden, M.G.A., Liebman, M., Hallin, S., 2020. Agricultural diversification promotes multiple ecosystem services without compromising yield. *Science Advances* 6, eaba1715. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aba1715>
- Terres Univia, 2021. Statistiques. Oléagineux et plantes riches en protéines. 2020. Terres Univia, Paris, France.
- Terres Univia, 2019. Chiffres clés. Oléagineux et plantes riches en protéines. 2018. Terres Univia, Paris, France.
- Terres Univia, 2015. Chiffres clés. Oléagineux et plantes riches en protéines. 2014. Terres Univia, Paris, France.
- Thakur, M.P., Putten, W.H. van der, Wilschut, R.A., Veen, G.F. (Ciska), Kardol, P., van Ruijven, J., Allan, E., Roscher, C., Kleunen, M. van, Bezemer, T.M., 2021. Plant–soil feedbacks and temporal dynamics of plant diversity–productivity relationships. *Trends in Ecology & Evolution* 36, 651–661. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2021.03.011>
- Therond, O., Duru, M., Roger-Estrade, J., Richard, G., 2017. A new analytical framework of farming system and agriculture model diversities. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 37, 21. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0429-7>
- Tibi, A., Martinet, V., Vialatte, A., Alignier, A., Angeon, V., Bohan, D.A., Bougherara, D., Cordeau, S., Courtois, P., Deguine, J.-P., Enjalbert, J., Fabre, F., Fréville, H., Grateau, R., Grimonprez, B., Gross, N., Hannachi, M., Launay, M., Lelièvre, V., Lemarié, S., Martel, G., Navarrete, M., Plantegenest, M., Ravigné, V., Rusch, A., Suffert, F., Thoyer, S., 2022. Protéger les cultures en augmentant la diversité végétale des espaces agricoles - Synthèse du rapport d'ESCo. INRAE, France.
- van der Werf, H.M.G., Kanyarushoki, C., Corson, M.S., 2009. An operational method for the evaluation of resource use and environmental impacts of dairy farms by life cycle assessment. *Journal of Environmental Management* 90, 3643–3652. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.07.003>
- van Ruijven, J., Berendse, F., 2005. Diversity–productivity relationships: Initial effects, long-term patterns, and underlying mechanisms. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 102, 695–700. <https://doi.org/10.1073/pnas.0407524102>
- Viaux, P., 2019. La rotation longue : pratique agricole indispensable pour une agriculture multi-performante [WWW Document]. Académie d'Agriculture de France. URL <https://www.academie-agriculture.fr/actualites/academie/seance/academie/la-rotation-longue-pratique-agricole-indispensable-pour-une> (accessed 5.11.22).
- Visser, W., 2009. La conception : de la résolution de problèmes à la construction de représentations. *Le travail humain* 72, 61–78. <https://doi.org/10.3917/th.721.0061>
- Voisin, A.-S., Gueguen, 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. *Agronomy for Sustainable Development* 34, 361–380. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0189-y>
- Wang, T., Jin, H., Fan, Y., Obembe, O., Li, D., 2021. Farmers' adoption and perceived benefits of diversified crop rotations in the margins of U.S. Corn Belt. *Journal of Environmental Management* 293, 112903. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112903>
- Watson, C., Stoddard, F., 2017. Introduction - Perspectives on legume production and use in European agriculture, in: Murphy-Bokern, D., Stoddard, F.L., Watson, C.A. (Eds.), *Legumes in Cropping Systems*. CABI, Oxfordshire, United Kingdom, pp. 1–17. <https://doi.org/10.1079/9781780644981.0001>
- Watson, C.A., Reckling, M., Preissel, S., Bachinger, J., Bergkvist, G., Kuhlman, T., Lindström, K., Nemecek, T., Topp, C.F.E., Vanhatalo, A., Zander, P., Murphy-Bokern, D., Stoddard, F.L., 2017. Grain legume production and use in European agricultural systems. *Advances in Agronomy* 144, 235–303. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.03.003>