



HAL
open science

Modélisation de systèmes agroforestiers oléicoles pour évaluer ex-ante la multifonctionnalité de systèmes co-conçus par des acteurs.

Nicolas Barbault

► To cite this version:

Nicolas Barbault. Modélisation de systèmes agroforestiers oléicoles pour évaluer ex-ante la multifonctionnalité de systèmes co-conçus par des acteurs.. Sciences agricoles. Montpellier SupAgro, 2023. Français. NNT : 2023NSAM0052 . tel-04958188

HAL Id: tel-04958188

<https://theses.hal.science/tel-04958188v1>

Submitted on 20 Feb 2025

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.

THÈSE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR DE L'INSTITUT AGRO MONTPELLIER ET DE L'UNIVERSITE DE MONTPELLIER

En Sciences Agronomiques et Ecologie Fonctionnelle

École doctorale GAIA – Biodiversité, Agriculture, Alimentation, Environnement, Terre, Eau

Portée par l'Unité de recherche ABSys (Agrosystèmes Biodiversifiés)

Modélisation de systèmes agroforestiers oléicoles pour évaluer *ex-ante* la multifonctionnalité de systèmes co- conçus par des acteurs

Présentée par Nicolas BARBAULT

Le 15 décembre 2023

Sous la direction de Pierre-Eric LAURI et Marie GOSME

Et le co-encadrement de Christian DUPRAZ

Devant le jury composé de

Éric JUSTES, Directeur de Recherche, CIRAD DG Direction générale (France)

Jacques-Eric BERGEZ, Directeur de recherche, INRAE UMR AGIR (France)

Marie-Hélène JEUFFROY, Directrice de recherche, INRAE UMR Agronomie (France)

Gerhard BUCK-SORLIN, Professeur, L'Institut Agro Rennes-Angers (France)

Kamel GARGOURI, Professeur, Institut de l'Olivier (Tunisie)

Sylvaine SIMON, Ingénieure de recherche, INRAE UERI Gotheron (France)

Marie GOSME, Chargée de recherche, INRAE UMR ABSys (France)

Christian DUPRAZ, Ingénieur de recherche, INRAE UMR ABSys (France)

Pierre-Eric LAURI, Ingénieur de recherche, INRAE UMR ABSys (France)

Président du jury

Rapporteur

Rapporteuse

Examineur

Examineur

Examinatrice

Co-directrice de thèse

Invité – Encadrant de thèse

Invité – Directeur de thèse



UNIVERSITÉ
DE MONTPELLIER

L'INSTITUT
agro Montpellier

Remerciements

Une aventure incroyable ! J'ai passé trois années merveilleuses à relever des défis et à avancer sur mon projet de recherche. Je voudrais commencer par exprimer ma profonde gratitude envers toutes les personnes qui ont contribué à mon parcours de recherche. Votre soutien, vos encouragements et vos conseils ont été essentiels pour m'aider à arriver où j'en suis aujourd'hui. Voici un petit clin d'œil et un remerciement à chacun de vous :

- Mes directeurs de thèse. Pierre Eric LAURI, Marie GOSME et Christian DUPRAZ. Vous avez été les phares qui ont illuminé mon chemin tout au long de cette aventure. Vos conseils avisés, votre formation rigoureuse et les moments agréables passés ensemble ont été les piliers de ma réussite. Je vous remercie de m'avoir accordé votre confiance et de la liberté dans le développement de mon projet. Je tiens à te remercier Pierre Eric pour ta réactivité, tes conseils, ton expertise scientifique et tes recommandations pour l'IHC à Angers (communication orale et rédaction de l'article). Je te remercie Marie pour tes conseils sur le processus de modélisation, pour la prise en main du modèle Hi-sAFe, pour ton expertise scientifique et tes conseils tout au long de la thèse. Je te remercie Christian pour tes conseils, ton expertise sur le modèle Hi-sAFe et pour ton aide précieuse lors du développement de nouveaux formalismes. Ce fut un réel plaisir d'adapter le modèle Hi-sAFe à la simulation des oliviers.
- Les membres du jury de thèse. Je remercie Marie-Hélène JEUFFROY et Jacques-Eric BERGEZ d'avoir accepté d'évaluer mon travail en tant que rapporteur. Je vous en suis très reconnaissant au vu de la demande tardive. Je remercie également Eric JUSTES, Gerhard BUCK-SORLIN, Sylvaine SIMON et Kamel GARGOURI d'avoir accepté d'évaluer mon travail en tant qu'examinateur ou examinatrice.
- Les financeurs. Je remercie la FONDATION DE FRANCE et le projet PRIMA BIODIVERSIFY d'avoir contribué financièrement à mon projet de recherche. Je souhaite également remercier INRAE DESSE ainsi qu'INSTITUT AGRO (pour la bourse Erasmus +) d'avoir contribué financièrement à mes déplacements en Italie ou en Tunisie.
- Les membres de mon comité de suivi de thèse. Je souhaite également remercier les membres de mon comité de suivi de thèse : Grégoire VINCENT, Marc TCHAMITCHIAN, Bruno RAPIDEL, Françoise LESCOURRET et Adolfo ROSATI. Vos conseils ont été très pertinents pour mener à bien ce projet de recherche. Merci Grégoire VINCENT et Françoise LESCOURRET pour votre aide lors de la recherche de rapporteurs.
- Je souhaite remercier Isabelle LECOMTE pour son expérience et ses capacités à coder le modèle Hi-sAFe en JAVA. Je te remercie d'avoir su coder les nouveaux formalismes que nous avons développés. Ton travail est le socle de tout mon manuscrit.
- Le réseau d'acteurs oléicoles. Je suis reconnaissant envers vous pour avoir généreusement partagé vos expériences, vos pratiques culturelles et vos précieux conseils. Votre engagement à collaborer sur la diversification des cultures a été particulièrement apprécié, et je vous en remercie sincèrement.
- France Olive. Je souhaite remercier également Hélène LASSERRE et Julien BALAJAS pour leur expertise sur l'oléiculture. J'espère que les collaborations vont se poursuivre après mes travaux de thèse. J'ai également apprécié les échanges et la rédaction de l'article sur les complantations à base d'oliviers avec Hélène LASSERRE.

- Je souhaite remercier également Nolwenn POULAILLON (stagiaire puis Ingénieure d'étude) pour son travail incroyable et de grande qualité sur l'impact du changement climatique sur les systèmes oléicoles traditionnels et agroforestiers. Je te remercie pour ton travail qui sera valorisé sous forme d'article (chapitre 8). Ce fût un réel plaisir de te faire découvrir la modélisation et l'oléiculture.
- Je souhaite remercier également Pascal SARTRE, Magalie DELALANDE et Dominique DESCLAUX pour vos conseils, votre expertise pour la mise en place d'essais sur les parcelles d'oliviers de INRAE de Mauguio. Je vous remercie également pour les données sur l'olivieraie ainsi que pour les discussions sur le modèle Hi-sAFe.
- Les experts oléicoles italiens. Je souhaite remercier également Pr. FAMIANI, Nicola CINOSI, Leen ALMADI, Elissa DAHERS de m'avoir accueilli en Italie et d'avoir partagé votre expérience en oléiculture. Dans le cadre de cette expérience de deux mois en Italie, je remercie Milagros pour nos discussions passionnantes, la visite de l'Université de Pérouse et les conseils avisés dans le bureau des expatriés.
- Les experts oléicoles tunisiens. Je souhaite également remercier Kamel GARGOURI, Mohamed GHRAB, Hadda BEN MBAREK, Lina TRABELSI et Olfa ELLOUMI de m'avoir accueilli et d'avoir partagé votre expérience en oléiculture. J'ai apprécié ce déplacement d'un mois, qui ouvre la voie à des perspectives de collaborations, notamment sur le sujet du changement climatique. Je remercie Hadda et Lina pour les repas, les visites de Sfax et l'essai de la tenue traditionnelle Sfaxienne.
- Je souhaite également remercier Pierre-Eric LAURI, Marie GOSME, Rosan DE LANGE, Nolwenn POULAILLON, Alexandre CESARI, Stéphane De TOURDONNET, Laure HOSSARD, Laetitia LEMIERE, Jacques KUZO et Clément DAHAN, qui m'ont aidé à la préparation des ateliers de co-conception et de co-évaluation. Un travail d'équipe qui a porté ses fruits.
- Je souhaite également remercier Laetitia LEMIERE pour la démonstration de son outil d'aide (réalité augmentée) à la conception de système de culture lors de l'atelier de co-conception. Ce fut un réel plaisir d'échanger avec toi sur ce nouvel outil.
- Je souhaite également remercier Viviane MARTY, Estelle FOURRIQUE et Sandrine RENOIR pour vos conseils et votre réactivité dans les procédures administratives.
- Les membres du réseau EIR-A. Je souhaite remercier Pierre GRENIER pour l'organisation des deux séminaires de ce projet. Une aventure incroyable à l'international (en Italie et en Tunisie) et des superbes rencontres lors des séminaires. Des discussions passionnantes autour de bons repas entre amis doctorants.
- Ma thèse en 180 secondes. Je remercie Pascaline GIROT, Patrick SANDRAT et Marc DUMAS pour vos conseils très pertinents en communication et en vulgarisation scientifique. Je remercie également tous les organisateurs de cet événement. Une expérience incroyable, très riche en émotions et avec des superbes rencontres. 180 secondes, top chrono, pour expliquer mon sujet de recherche devant 600 personnes ! Quelle aventure inoubliable ! Le temps d'une journée, nous avons été de vrais artistes.

- Je remercie également Alain SELLIER et Jean-François BOURDONCLE, pour leur assistance précieuse lors d'un essai difficile visant à enlever une à une les feuilles de charpentières d'oliviers. Je vous remercie pour votre patience.
- Je remercie également l'ensemble des doctorants et des personnes de l'Unité ABSys que j'ai côtoyé au quotidien. Je vous remercie pour les échanges, les moments partagés et les conseils.
- Mes remerciements vont également à Justine. Tu es mon équilibre au quotidien et ton soutien tout au long de cette thèse a été très précieux. Je te remercie sincèrement de m'avoir aidé à monter en compétences sur R, de m'avoir aidé pour le script d'analyse de sensibilité ainsi que le script sur la calibration du modèle. Tu es une véritable as du codage et de R. Sans ton expertise, ces étapes dans le processus de modélisation auraient été bien plus compliquées à passer. Merci également pour ta chasse aux fautes d'orthographe dans ce manuscrit. Je te remercie encore pour ta patience, ton aide et ta compréhension. Dans les moments forts en émotion, tu as toujours réussi à me redonner espoir et le sourire. Je te remercie pour tout.
- Alexandre et Benoit, mes collègues de thèse, vous avez été mes compagnons de voyage tout au long de cette aventure. Votre soutien mutuel, vos conseils avisés et votre amitié sincère ont été des sources d'inspiration pour moi. Etre tous les trois doctorants était notre rêve de master ! Nos appels, parfois très longs, m'ont encouragé et donné de l'ambition. J'ai été ravi, Alexandre, de pouvoir vivre ce projet de label EIR-A et de thèse en 180 secondes en même temps que toi. Continuons à être ambitieux !
- Je souhaite également remercier ma famille. Vous avez été ma force et ma motivation tout au long de cette aventure. Votre soutien inconditionnel m'a permis de continuer à avancer même dans les moments les plus difficiles. Petite dédicace à mes parents : le jour où j'ai partagé avec vous ma décision de m'envoler vers le Sud de la France pour mon apprentissage, je sais que cela n'a pas été facile. C'est pourquoi, je vous remercie de m'avoir laissé cette liberté de partir loin, d'avoir su comprendre mon choix et d'avoir continué de m'encourager.

Au début, ce n'était pas gagné. Je devais prendre en main un modèle numérique sans vraiment connaître dans le détail les étapes du processus de modélisation. J'ai su vaincre le syndrome de l'imposteur, m'adapter au COVID19, monter en compétences très rapidement sur plusieurs thématiques. Et aujourd'hui, j'en ressors grandi avec l'envie de surmonter de nouveaux défis. Un chapitre professionnel se tourne, mais un nouveau s'ouvre. L'aventure se poursuit dans le sud, où de nouvelles opportunités et défis m'attendent.

Avant-Propos

Cette thèse a été menée d'octobre 2020 à octobre 2023 à l'UMR ABSys (systèmes biodiversifiés) du centre INRAE de Montpellier. Elle a été réalisée dans le cadre de deux projets : le projet Biodiversify PRIMA [ANR-19-P026-0008, 2020-2023] et le projet Modolivier de la Fondation de France [00107057, 2020-2023]. Marie GOSME et Pierre-Eric LAURI l'ont dirigée et Christian DUPRAZ l'a encadrée. Les résultats de cette recherche ont été valorisés par le biais de publications scientifiques et techniques, de communications orales ainsi que par des formations. Selon moi, une thèse est un projet scientifique dirigé par le doctorant, qui nécessite l'établissement de collaborations stratégiques avec divers intervenants de la société pour élaborer une approche scientifique en réponse aux questions posées. Ainsi, dans le cadre de ma recherche, j'ai établi des partenariats stratégiques avec différents acteurs. Pour refléter ces collaborations, j'ai parfois utilisé les pronoms "on" et "nous". Cependant, je suis demeuré pleinement responsable des décisions finales et du développement de mon projet de thèse, qui à mes yeux, est bien plus qu'une simple thèse, mais bien un projet de recherche. Comme dans tout projet de recherche, l'identification et la planification des actions nécessaires pour atteindre les objectifs du projet sont essentielles. Ces actions doivent être réalisées dans le délai prévu et avec les ressources allouées, qu'il s'agisse de ressources humaines ou financières. Au début de ma thèse, j'ai identifié les actions clés et les ai planifiées à l'aide d'outils, tels que les diagrammes de Gantt ou de Pert, en les adaptant aux ressources budgétisées pour la thèse. En conséquence, j'ai fait des choix stratégiques dans le cadre de ma thèse pour garantir l'atteinte des résultats escomptés dans les délais impartis et avec les ressources disponibles. Pour des raisons de facilité de lecture, j'ai pris le parti de réaliser une bibliographie par chapitre et par articles scientifiques insérés dans les chapitres. La thèse étant longue, le lecteur devrait trouver plus rapidement la référence bibliographique recherchée.

Articles dans des revues scientifiques

Barbault N., Dupraz C., Lauri P.E. and Gosme M. (2023). Parametrization of an agroforestry model: from forest trees to olive trees. *Acta Hort.* 1366, 211-218
DOI: 10.17660/ActaHortic.2023.1366.24

Barbault N., Dupraz C., Lauri P.E. et Gosme M. (2023). Insights into fruit tree models relevant to simulate fruit tree-based agroforestry systems. [Accepted with minor revision in *Agroforestry Systems*]

Barbault N., Dupraz C., Lecomte I., Lauri P.E., Famiani F., Rosati A., Sartre P., Desclaux D., Delalande M., Catel J., Gosme M. (2023). Upgrading the Hi-sAFe agroforestry model for fruit trees. Application to olive tree. [To be submitted in *Environmental Modelling and Software*]

Barbault N., Dupraz C., Lauri P.E, Lecomte I et Gosme M. (date). Towards sustainable olive production: exploring the performance of diversified olive-tree based systems using the Hi-sAFe agroforestry model. [First draft]

Barbault N., Poulailon N., Dupraz C., Lauri P.E, Lecomte I et Gosme M. (date). The impact of climate change on traditional and agroforestry systems based on olive tree, simulation on a French case study. [First draft]

Article de vulgarisation scientifique

Lasserre H. et **Barbault N.** (2022). Complantations à base d'oliviers : un exemple de système agroforestier. *Le Nouvel olivier*, 129 : 24-30.

Communication à des congrès

Barbault N., Dupraz C., Lauri P.E. et Gosme M. (2022). Modelling fruit trees in agroforestry systems: an attempt to upscale from tree to system scale. *Oral presentation at the 31st International Horticultural Congress IHC 2022*, 14th to 20th 2022, Angers, France.

Communication à des séminaires

Barbault N., Dupraz C., Lauri P.E. et Gosme M. (2021). Tester et évaluer, à l'aide du modèle Hi-sAFe, des systèmes agroforestiers à base d'oliviers innovants et résilients face aux changements climatiques. *Communication orale à Croisons les regards #5 du RMT AgroforesterieS*, 6 juin 2021, Montpellier, France.

Concours de vulgarisation scientifique

Barbault N. (2022). Ma thèse en 180 secondes. Finale Régionale Occitanie, Edition 2022. Domaine d'O Théâtre Jean-Claude Carrière. Replay: <https://www.youtube.com/watch?v=DKx-1ZQBcxg&t=35s>

Parcours doctoral de l'Ecole Internationale de Recherche d'Agreenium (EIR-A)

Séminaire annuel 2021 de l'EIR-A. (2021). Les enjeux de la bioéconomie. En visioconférence, du 19 au 22 avril 2021.

Séminaire annuel 2022 de l'EIR-A. (2022). Les transitions numériques en agriculture et alimentation. Du 25 au 29 avril 2022, Nantes, France.

Mission de recherche (2 mois), Università degli Studi di Perugia, in the Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari e Ambientali, AGR/03 - arboricoltura generale e coltivazioni arboree, à Pérougia, Italie, du 2 novembre au 20 décembre 2021.

Mission de recherche (1 mois), Institut de l'olivier, Durabilité de l'Oléiculture en Région Semi-arides et Arides, à Sfax, Tunisie, du 7 janvier au 4 février 2023.

Formations sur le modèle Hi-sAFe

Dupraz C., Gosme M., Lecomte I., **Barbault N.** et Boutchakdjian L. 2022. Modelling YOUR agroforestry system with the Hi-sAFe 4.0 model. A modelling seminar for Agromix participants and others. Montpellier (France) ou visioconférence, du 31/01/2022 au 03/02/2022.

Barbault N. 2023. Modéliser son système agroforestier à base d'oliviers avec le modèle Hi-sAFe. Dans le cadre du projet PRIMA BIODIVERSIFY « Boost ecosystem services through high Biodiversity-based Mediterranean Farming sYstems ». L'Institut de l'Olivier à Sfax (Tunisie), du 31/01/2023 au 01/02/2023.

Dupraz C., Gosme M., Lecomte I., **Barbault N.** 2023. Hi-sAFe modelling seminar Program. Montpellier (France) ou visioconférence, du 09/05/2023 au 12/05/2023.

Déclaration d'utilisation d'IA

Pendant la préparation de ce travail, j'ai utilisé le modèle de langage ChatGPT4 d'OpenAI dans le but d'améliorer la syntaxe et la fluidité du texte, de corriger les fautes d'orthographe de ce manuscrit de thèse. Après avoir utilisé cet outil, j'ai soigneusement examiné et modifié le contenu selon les besoins, et j'assume l'entière responsabilité du contenu de ce manuscrit. L'utilisation de cet outil a été décidée après avoir préalablement exploré ses avantages et ses limites.

Pour la génération d'un olivier, dans quelques figures du manuscrit, j'ai eu recours au modèle DALL-E 2, également développé par OpenAI. Ce modèle, guidé par une description textuelle de l'image désirée, permet de créer une représentation visuelle réaliste. Comme précédemment, l'utilisation de cet outil a été exercée de manière mesurée, en tenant compte de ses limites et de ses atouts.

À la fin du manuscrit, une image a été produite en utilisant le modèle Deep Dream Generator. Tout comme le modèle DALL-E 2, Deep Dream Generator est en mesure, à partir d'un texte détaillé décrivant une image, de générer une photographie réaliste. De manière similaire aux étapes antérieures, j'ai utilisé cet outil avec prudence en ayant conscience de ses avantages et de ses limites.

Suite à l'utilisation de ces trois modèles d'Intelligence Artificielle (IA), j'en tire quelques conclusions. Comme tout modèle, ces IA présentent des limites importantes. Pour ChatGPT4, cette IA est pertinente (actuellement) sur plusieurs aspects : i) aide à la rédaction (amélioration de la syntaxe des phrases et de l'orthographe), ii) aide au développement de script (notamment R). En revanche, chatGPT4 présente des faiblesses, comme i) la rédaction de texte pourvu de sens avec la création d'informations erronées ou inexistantes, ii) imprécise ou inefficace sur des aspects très techniques (par exemple, l'aide à la rédaction de script s'arrête lors de requêtes trop précises). Pour les IA DALL-E 2 et Deep Dream Generator, il ne semble pas aisé de générer les images tant souhaitées. Le texte doit être suffisamment détaillé et les modèles ne prennent pas en compte l'ensemble des aspects soulignés dans le texte. Les images générées sont généralement assez éloignées de l'image désirée. Par conséquent, il est important de considérer ces modèles d'IA comme des outils d'aide destinés à nous épauler au travail.

Table des matières

Remerciements	1
Avant-Propos	5
Articles dans des revues scientifiques.....	5
Article de vulgarisation scientifique.....	5
Communication à des congrès	6
Communication à des séminaires	6
Concours de vulgarisation scientifique	6
Parcours doctoral de l'Ecole Internationale de Recherche d'Agreenium (EIR-A)	6
Formations sur le modèle Hi-sAFé	6
Déclaration d'utilisation d'IA.....	7
Table des matières	9
Liste des figures.....	13
Liste des tableaux.....	17
Liste des sigles et abréviations	19
Introduction générale.....	21
PARTIE I.....	25
Contexte et problématique	25
Chapitre 1 : L'adaptation des oliveraies face aux contraintes agronomiques et environnementales..	27
1) Un aliment santé : la consommation d'olives et d'huile d'olive dans le monde et en France	27
A) Un aliment santé.....	27
B) La consommation d'olives et d'huile d'olive	27
2) La biologie et les systèmes oléicoles.....	30
A) La description et la biologie des oliviers.....	30
B) La description de la filière oléicole	34
2) Les limites actuelles des systèmes oléicoles et les problématiques rencontrées par les oléiculteurs.....	35
A) Les enjeux agronomiques et environnementaux	35
B) Les enjeux socio-économiques	42
C) Le changement climatique, accélérateur des problématiques agronomiques, environnementales et socio-économiques.....	43
3) La problématique et les solutions envisagées	49
A) La problématique et l'axe de la thèse	49
B) L'agroforesterie comme solution envisagée	50
Chapitre 2 : Les méthodes d'évaluation de systèmes agroforestiers à base d'oliviers	63
1) Les méthodes d'évaluation des systèmes de culture	63
2) L'évaluation ex-situ : le choix du modèle agronomique	64
A) Résumé de l'article	64
B) Article accepté avec révisions mineures dans Agroforestry Systems.....	65

3) Les questions scientifiques associées à la thématique de recherche	96
PARTIE II.....	97
Matériels & Méthodes	97
Chapitre 3 : L'évaluation par modélisation des systèmes agroforestiers à base de fruitiers	99
1) L'approche de modélisation.....	99
A) Présentation du modèle Hi-sAFe : version 4.1 (avant modification).....	99
B) L'adaptation du modèle Hi-sAFe aux arbres fruitiers, dont les oliviers.....	108
2) L'approche participative	117
A) La constitution et l'évolution du réseau d'acteurs.....	118
B) La rencontre individuelle des acteurs.....	120
C) L'organisation de l'atelier de co-conception	121
D) L'organisation de l'atelier de co-évaluation	124
3) L'évaluation par modélisation de différents systèmes agroforestiers à base d'oliviers sous climats actuel et futur	125
PARTIE III.....	129
Résultats.....	129
Chapitre 4 : L'adaptation du modèle Hi-sAFe aux oliviers : la paramétrisation.....	131
1) La paramétrisation des équations allométriques régissant les dimensions de l'olivier	131
A) L'équation allométrique : DBH vs. Hauteur	131
B) L'équation allométrique : Surface foliaire vs. DCB	132
C) L'équation allométrique : Volume du tronc - DBH - Hauteur	132
D) L'équation allométrique : DCB vs. DBH	134
E) L'équation allométrique : Surface foliaire - Volume du houppier	134
2) Les valeurs des paramètres mesurées au Domaine expérimental d'INRAE de Mauguio.....	135
A) Résumé de l'article	135
B) Article publié dans <i>Acta horticulturae</i>	136
Chapitre 5 : L'adaptation du modèle Hi-sAFe aux arbres fruitiers : analyse de sensibilité, calibration et vérifications	147
1) Résumé de l'article.....	147
2) Article à soumettre dans <i>Environmental Modelling and Software</i>	149
Chapitre 6 : La diversification des oliveraies par la co-conception de systèmes diversifiés à base d'oliviers	181
1) Les résultats des rencontres individuelles pour favoriser l'engagement des acteurs	181
A) Les systèmes olivier - vigne	181
B) Les systèmes olivier - prairie.....	185
C) Les systèmes multistrates : arbres fruitiers, plantes de services, arbres forestiers.....	187
D) Les systèmes olivier - culture.....	188
E) Conclusions et perspectives.....	190
2) Les résultats de l'atelier de co-conception	191
A) Le sous-groupe n°1 : les cultures de services	191
B) Le sous-groupe n°2 : les cultures intercalaires	194

C) Le sous-groupe n°3 : les cultures intercalaires	199
Chapitre 7 : L'évaluation par modélisation des systèmes co-conçus par les acteurs	205
1) L'adaptation des systèmes co-conçus aux capacités de simulation du modèle Hi-sAFé.....	205
A) L'adaptation du système n°1 (oliviers – légumineuses) co-conçu par les acteurs	205
B) L'adaptation du système n°2 (oliviers – cultures intercalaires – vigne) co-conçu par les acteurs.....	206
C) L'adaptation du système n°3 (oliviers – cultures intercalaires sur l'inter-rang – laitues sur le rang) co-conçu par les acteurs	206
2) L'analyse des performances agronomiques et environnementales des systèmes co-conçus sous climat actuel.....	207
A) Résumé de l'article	207
B) La première version de l'article (non soumis)	208
Chapitre 8 : L'impact du changement climatique sur les systèmes oléicoles traditionnels et agroforestiers	237
1) Résumé de l'article.....	237
2) La première version de l'article (non soumis).....	238
PARTIE IV	267
Discussion.....	267
Chapitre 9 : Discussion générale	269
1) La synthèse des principaux résultats	269
2) Les limites du projet de recherche.....	274
A) Les limites liées à la démarche de modélisation	274
B) Les limites liées à la démarche participative	276
C) Les limites liées à l'évaluation par modélisation de systèmes agroforestiers à base d'oliviers	278
3) Les perspectives de recherche et les nouveaux défis à relever	280
A) Les perspectives de recherche sur la démarche de modélisation.....	280
B) Les perspectives de recherche sur la démarche participative.....	281
C) Les perspectives de recherche sur la démarche d'évaluation par modélisation	281

Liste des figures

Figure 1 : Schéma conceptuel de l'organisation du manuscrit de thèse	23
Figure 2 : Carte de la répartition mondiale du verger oléicole (Avelin, 2022).....	28
Figure 3 : Graphique de la dynamique de production mondiale en huile d'olive en milliers de tonnes (Avelin, 2022)	29
Figure 4 : Carte des 13 départements producteurs d'huile d'olive et d'olives	29
Figure 5 : Représentation schématique de la classification taxonomique de l'espèce <i>Olea europaea</i> L.	31
Figure 6: Représentation schématique des différents stades phénologiques de l'olivier (Sanz-Cortes et al., 2002)	32
Figure 7 : Représentation schématique des trois principaux systèmes oléicoles.....	33
Figure 8 : Représentation schématique de la structure de la filière oléicole française.....	35
Figure 9 : Représentation schématique des contraintes agronomiques (facteurs biotiques et abiotiques) auxquels sont confrontés les oliviers (olivier généré par Dall.E 2 d'OpenAI). © N. Barbault.....	36
Figure 10 : Photographie d'un olivier qui a subi la gelée de 1956 et qui a repoussé avec plusieurs troncs. © N. Barbault	37
Figure 11 : Photographie des systèmes oléicoles tunisiens caractérisés par une très faible densité de plantation (région oléicole de Sfax). © N. Barbault	38
Figure 12 : Représentation schématique des contraintes environnementales auxquelles sont confrontés les oliviers (olivier généré par Dall.E 2 d'OpenAI). © N. Barbault	39
Figure 13 : Illustration de la technique des monticules utilisée pour quantifier l'érosion des sols. ©Vanwalleghem et al., 2011).....	40
Figure 14 : Photographies des monticules justifiant de la hauteur du sol initiale avant l'érosion. Les flèches rouges sur les photographies indiquent la hauteur initiale des arbres au moment de la plantation des oliviers. © N. Barbault	40
Figure 15 : Photographie des monticules justifiant de la hauteur initiale du sol avant l'érosion. La mesure indique une perte de 30 cm de sol en 30 ans. © N. Barbault.....	41
Figure 16 : Photographies de l'érosion récente du sol d'une jeune oliveraie. Les flèches rouges sur les photographies indiquent l'écoulement de l'eau et l'érosion du sol de la parcelle. © N. Barbault.....	41
Figure 17 : Photographies de la compaction des sols d'une oliveraie au moment de la récolte par le machinisme agricole. Les flèches rouges sur les photographies indiquent la compaction du sol lié au passage des engins agricoles. © N. Barbault.....	42
Figure 18 : Graphique de la dynamique d'augmentation des gaz à effet de serre entre 1850 et 2019. (source : © IPCC AR6 SYR Longer Report, Lee et al., 2023).....	43
Figure 19 : Graphique évaluant les impacts du changement climatique sur les systèmes humains et les écosystèmes en fonction des différentes régions du monde. (source : © IPCC AR6 SYR Longer Report, Lee et al., 2023).....	44
Figure 20 : Représentation schématique des différentes stratégies d'adaptation et d'atténuation des impacts liés au changement climatique. (source : © IPCC AR6 SYR Longer Report, Lee et al., 2023).....	45
Figure 21 : Représentation schématique des scénarios d'évolution de la dynamique d'émission en CO ₂ et de la température. (source : © IPCC AR6 SYR Longer Report, Lee et al., 2023)	46
Figure 22 : Représentation schématique des services écosystémiques fournis par les systèmes agroforestiers. © N. Barbault	51
Figure 23 : Photographie d'un système agroforestier : oliviers et céréales. © N. Barbault sur Unsplash.....	53
Figure 24 : Représentation schématique de la scène simulée par le modèle Hi-sAFe (source : Dupraz et al., 2019).....	100

<i>Figure 25 : Représentation schématique des fichiers d'entrées du modèle Hi-sAFe</i>	<i>101</i>
<i>Figure 26 : Représentation schématique des parties aériennes d'un arbre dans Hi-sAFe, où H correspond à la hauteur, DBH au diamètre du tronc à hauteur de poitrine (m), DCB au diamètre du tronc à la base du houppier (m), rx et ry aux rayons horizontaux et verticaux du houppier (Source : Grégoire Talbot).....</i>	<i>102</i>
<i>Figure 27 : Représentation schématique de l'allocation de carbone de l'arbre dans le modèle Hi-sAFe</i>	<i>103</i>
<i>Figure 28 : Représentation schématique du cycle de l'eau représenté dans le modèle Hi-sAFe.....</i>	<i>106</i>
<i>Figure 29 : Représentation schématique du cycle de l'azote représenté dans le modèle Hi-sAFe</i>	<i>106</i>
<i>Figure 30 : représentation schématique du couplage de modèle entre SAFE-Tree et STICS (source : Dupraz et al 2019).....</i>	<i>108</i>
<i>Figure 31 : Représentation schématique des grandes étapes dans le processus de modélisation.....</i>	<i>109</i>
<i>Figure 32 : Représentation schématique des grandes étapes dans le processus d'implémentation de formalismes dans un modèle</i>	<i>110</i>
<i>Figure 33 : Carte de répartition des oliviers non taillés mesurés en France pour calibrer les relations allométriques</i>	<i>112</i>
<i>Figure 34 : Carte de répartition des oliviers non taillés mesurés en Italie pour calibrer les relations allométriques</i>	<i>113</i>
<i>Figure 35 : Représentation schématique des grandes étapes dans le processus de paramétrisation et d'analyse de sensibilité des paramètres d'un modèle agronomique.....</i>	<i>114</i>
<i>Figure 36 : Représentation schématique des grandes étapes dans le processus de calibration des paramètres d'un modèle agronomique.....</i>	<i>116</i>
<i>Figure 37 : Représentation schématique des grandes étapes dans le processus de validation / vérification du modèle Hi-sAFe</i>	<i>117</i>
<i>Figure 38 : Graphique de la répartition du nombre de personnes du réseau d'acteurs par activité professionnelle.....</i>	<i>119</i>
<i>Figure 39 : Carte de répartition des différents acteurs intéressés pour participer aux ateliers de co-conception. Les ateliers participatifs ont été organisés à Montpellier</i>	<i>119</i>
<i>Figure 40 : Représentation schématique de la dynamique d'évolution du réseau d'acteurs entre 2022 et 2023. UPPO (Union des Producteurs et Professionnels de l'Oliviers de l'Hérault).....</i>	<i>120</i>
<i>Figure 41 : Photographie d'un sous-groupe de travail sur la co-conception de systèmes agroforestiers à base d'oliviers. © N. Barbault</i>	<i>121</i>
<i>Figure 42 : Représentation schématique des objectifs de l'atelier dans le cadre de la diversification des oliveraies</i>	<i>122</i>
<i>Figure 43 : Photographie d'un plateau de co-conception 3D modulable. © N. Barbault</i>	<i>123</i>
<i>Figure 44 : Photographie de l'outil de visualisation (réalité augmentée) permettant de visualiser l'encombrement spatial des différentes espèces ainsi que leurs ombres portées. © M. Gosme</i>	<i>123</i>
<i>Figure 45 : Photographie de la visite de la parcelle olivier-céréales avec les acteurs lors de l'atelier de co-évaluation. © N. Barbault</i>	<i>124</i>
<i>Figure 46 : Représentation schématique des grandes étapes dans le processus d'évaluation des performances agronomiques et environnementales de systèmes agroforestiers à base d'oliviers.....</i>	<i>126</i>
<i>Figure 47 : Graphique de DBH en fonction de la hauteur pour 55 oliviers</i>	<i>131</i>
<i>Figure 48 : Graphique de la Surface foliaire en fonction de DCB pour 55 oliviers.....</i>	<i>132</i>
<i>Figure 49 : Graphique de DBH et volume du tronc en fonction de la hauteur pour 42 oliviers (graphe 1/2)</i>	<i>133</i>
<i>Figure 50 : Graphique de DBH et volume du tronc en fonction de la hauteur pour 42 oliviers (graphe 2/2)</i>	<i>133</i>
<i>Figure 51 : Graphique de la Surface foliaire en fonction du volume du houppier pour six oliviers mesurés à Manguio et Clapiers.....</i>	<i>135</i>

<i>Figure 52 : Représentation schématique des étapes d'adaptation du modèle Hi-sAFé aux oliviers (présenté dans l'article).....</i>	<i>148</i>
<i>Figure 53 : Représentation schématique d'un système agroforestier co-conçu avec un producteur associant des oliviers et des ceps de vigne.....</i>	<i>183</i>
<i>Figure 54 : Représentation schématique d'un système agroforestier co-conçu avec un producteur associant des oliviers, des ceps de vigne et des arbres forestiers</i>	<i>183</i>
<i>Figure 55 : Représentation schématique d'un système agroforestier co-conçu avec un producteur associant des îlots d'oliviers dans une parcelle de vigne.....</i>	<i>184</i>
<i>Figure 56 : Représentation schématique d'un système agroforestier co-conçu avec un producteur associant des oliviers et des ceps de vigne sur le rang des oliviers</i>	<i>184</i>
<i>Figure 57 : Représentation schématique d'un système agroforestier co-conçu avec un producteur associant des oliviers, des ceps de vigne et une culture intercalaire</i>	<i>185</i>
<i>Figure 58 : Représentation schématique d'un système agroforestier co-conçu avec un producteur associant des ceps de vigne et des oliviers en limite de parcelle</i>	<i>185</i>
<i>Figure 59 : Représentation schématique d'un système agroforestier co-conçu avec un producteur associant une prairie à pâturer par des animaux ou à récolter et des oliviers en limite de parcelle .</i>	<i>186</i>
<i>Figure 60 : Représentation schématique d'un système agroforestier co-conçu avec un producteur associant une oliveraie avec des animaux.....</i>	<i>187</i>
<i>Figure 61 : Représentation schématique d'un système multistrate à base d'oliviers</i>	<i>187</i>
<i>Figure 62 : Représentation schématique d'un système multistrate à base d'oliviers, représenté avec l'encombrement spatial</i>	<i>188</i>
<i>Figure 63 : Représentation schématique d'un système agroforestier co-conçu avec un producteur associant des oliviers avec une autre culture sur l'inter-rang.....</i>	<i>188</i>
<i>Figure 64 : Représentation schématique d'un premier sous-système de culture d'une oliveraie diversifiée</i>	<i>189</i>
<i>Figure 65 : Représentation schématique d'un deuxième sous-système de culture d'une oliveraie diversifiée</i>	<i>189</i>
<i>Figure 66 : Représentation schématique d'un troisième sous-système de culture d'une oliveraie diversifiée</i>	<i>190</i>
<i>Figure 67 : Représentation schématique d'un quatrième sous-système de culture d'une oliveraie diversifiée (en cours d'adaptation)</i>	<i>190</i>
<i>Figure 68 : Représentation schématique des options de diversification d'une oliveraie imaginées lors des discussions individuelles avec les oléiculteurs. Les systèmes sont soit déjà existants, soit uniquement conçus sur le papier (réflexion de diversification)</i>	<i>191</i>
<i>Figure 69 : Photographie du support de co-conception du système n°1</i>	<i>192</i>
<i>Figure 70 : Représentation schématique d'un système oléicole diversifié par des plantes de service et co-construits par les acteurs du sous-groupe n°1</i>	<i>193</i>
<i>Figure 71 : Photographie du support de co-conception du système n°2</i>	<i>196</i>
<i>Figure 72 : Représentation schématique d'une première phase du système oléicole diversifié co-conçu par les acteurs du sous-groupe n°2</i>	<i>197</i>
<i>Figure 73 : Représentation schématique d'une deuxième phase du système oléicole diversifié co-conçu par les acteurs du sous-groupe n°2</i>	<i>198</i>
<i>Figure 74 : Photographie du support de co-conception du système n°3</i>	<i>200</i>
<i>Figure 75 : Représentation schématique d'une première phase du système oléicole diversifié co-conçu par les acteurs du sous-groupe n°3</i>	<i>201</i>
<i>Figure 76 : Représentation schématique d'une deuxième phase du système oléicole diversifié co-conçu par les acteurs du sous-groupe n°3</i>	<i>202</i>
<i>Figure 77 : Représentation schématique d'une troisième phase du système oléicole diversifié co-conçu par les acteurs du sous-groupe n°3</i>	<i>203</i>

<i>Figure 78 : Représentation schématique de l'adaptation du système n°1, co-conçu par les acteurs, aux capacités de simulation du modèle Hi-sAFé. Le système en haut est le système co-conçu suite à l'atelier de co-conception et le système en bas est le système adapté aux capacités de simulation de la version 4.2 du modèle Hi-sAFé (scène simulée).....</i>	<i>206</i>
<i>Figure 79 : Représentation schématique de l'adaptation du système n°3, co-conçu par les acteurs, aux capacités de simulation du modèle Hi-sAFé. Le système en haut est le système co-conçu suite à l'atelier de co-conception et le système en bas est le système adapté aux capacités de simulation de la version 4.2 du modèle Hi-sAFé (scène simulée).....</i>	<i>207</i>
<i>Figure 80 : Représentation schématique des principaux résultats obtenus dans le cadre de mon projet de recherche</i>	<i>273</i>
<i>Figure 81: Représentation schématique des limites dans le processus d'adaptation du modèle Hi-sAFé à simuler des oliviers.....</i>	<i>274</i>
<i>Figure 82 : Relation entre la complexité totale du modèle et l'erreur totale (Palma et al. 2007)</i>	<i>275</i>
<i>Figure 83 : Représentation schématique des différentes limites dans la démarche participative effectuée dans le cadre du projet de recherche</i>	<i>277</i>

Liste des tableaux

<i>Tableau I : Analyse SWOT pour des systèmes oléicoles traditionnels</i>	47
<i>Tableau II : Analyse SWOT pour des systèmes oléicoles semi-intensifs</i>	48
<i>Tableau III : Analyse SWOT pour des systèmes oléicoles intensifs</i>	48
<i>Tableau IV : Exemple de systèmes agroforestiers à base d'oliviers</i>	52
<i>Tableau V : Résumé des avantages et inconvénients des évaluations in-situ et ex-situ</i>	63
<i>Tableau VI : Les équations allométriques décrivant la morphologie de l'arbre dans le modèle Hi-sAFe. DBH (Diameter at Breast Height) et DCB (Diameter at Crown Base)</i>	111
<i>Tableau VII : Liste des variables mesurées sur le terrain pour calibrer certaines équations allométriques</i>	111
<i>Tableau VIII : Résumé des systèmes oliviers - vigne imaginés individuellement par des producteurs</i>	182
<i>Tableau IX : Résumé des différents systèmes oliviers - prairie co-conçus individuellement par des producteurs</i>	186
<i>Tableau X : Systèmes oléicoles diversifiés proposés par les personnes du sous-groupe n°2</i>	194
<i>Tableau XI : Systèmes oléicoles diversifiés proposés par les personnes du sous-groupe n°3</i>	199
<i>Tableau XII : Axes de limite en fonction des différents chapitres de Résultats</i>	274
<i>Tableau XIII : Axes de limite en fonction des chapitres 7 et 8</i>	278

Liste des sigles et abréviations

AFOM = Atout, Faiblesse, Opportunité, Menace
AOC = Appellation d'Origine Contrôlée
AOP = Appellation d'Origine Protégée
AURA = Auvergne-Rhône-Alpes
BBCH = Biologische Bundesanstalt bunderssortenamnt and CHemical industry
CTIFL = Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes
CTO = Centre Technique de l'Olivier
DBH = Diameter at Breast Height (diamètre du tronc à hauteur de poitrine)
DCB = Diameter at Crown Base (diamètre du tronc à la base du houppier)
FAIR = Findable, Accessible, Interoperable, Reusable
GES = Gaz à Effet de Serre
GHG = GreenHouse Gas
GIEC = Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
IA = Intelligence Artificielle
INRAE = Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'alimentation et l'Environnement
IPCC = Intergovernmental Panel on Climate Change
KNMI = Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut
LER = Land Equivalent Ratio
MOEA = Multi-Objective Evolutionary Algorithm
OMS = Organisation Mondiale de la Santé
PACA = Provence-Alpes-Côte d'Azur
PPAM = Plantes à Parfum, Aromatiques et Médicinales
PPM = Partie Par Million
RCMO = Regional Atmospheric Climate Model
RCP = Representative Concentration Pathways
RMSE = Root-Mean-Square Error (erreur quadratique moyenne)
SAFE = Silvoarable Agroforestry For Europe
SSP = Shared Socioeconomic Pathways
STICS = Simulateur multIdisciplinaire pour les Cultures Standard
SWOT = Strengths, Weaknesses, Opportunities, Theats
UE = Unité Expérimentale
UMR = Unité Mixte de Recherche
UPPO de l'Hérault = Union des Producteurs et Professionnels de l'Oliviers de l'Hérault

Introduction générale

L'olivier, arbre fruitier emblématique des régions méditerranéennes, est principalement cultivé pour ses olives, qui peuvent être transformées en divers produits tels que l'huile d'olive, les olives ou les marinades (Breton and Bervillé, 2012). L'huile d'olive est par ailleurs reconnue par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) comme aliment santé, en raison de ses capacités antioxydantes. Ainsi, l'huile d'olive permettrait de réduire l'incidence de cancers, mais également de maladies neurodégénératives (Covas et al., 2009, 2006; Sofi et al., 2008).

Cependant, malgré une hausse de la demande et des superficies récoltées, la production mondiale d'olives a ralenti depuis 2017 après plusieurs décennies de croissance (Avelin, 2022). Ce déclin est attribué en partie aux contraintes climatiques (sécheresses, dessèchement des fleurs lors de la floraison, etc.) (Koubouris et al., 2009; López-Bernal et al., 2018), aux contraintes biotiques (ravageurs) (Tzanakakis, 2003), ainsi qu'aux contraintes abiotiques (perte de fertilité des sols, etc.) (Loumou and Giourga, 2003; Nawaz et al., 2013). Ces contraintes sont aujourd'hui amplifiées par les conséquences du changement climatique.

Le changement climatique est présent et a déjà contribué à augmenter la température de surface de la terre de +1°C depuis la période préindustrielle. Ces conséquences sur notre société et sur notre agriculture sont aujourd'hui connues et détaillées dans les rapports du GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) (Ali et al., 2022; Lee et al., 2023). Sur la filière agricole, le changement climatique va impacter entre autres les régimes de précipitations ainsi que la fréquence des événements climatiques extrêmes, comme la sécheresse, les inondations, les orages et les grêles, etc. Malheureusement, les prises de décisions politiques actuelles n'ont pas réussi à réduire les émissions de gaz à effet de serre, rendant crucial d'identifier des solutions pour adapter nos systèmes agricoles aux impacts concrets du changement climatique.

Pour adapter l'oléiculture à ses différentes contraintes, de nouveaux systèmes de production émergent, tels que les systèmes agroforestiers à base d'oliviers (Dupraz and Liagre, 2011; Lauri et al., 2019; Pantera et al., 2018; Rosati et al., 2009; USDA Agroforestry Strategic Framework, 2019). Toutefois, leur utilisation et documentation restent encore limitées, surtout sur le long terme.

L'évaluation des performances de ces systèmes sur le long terme constitue un réel défi, indispensable à la compréhension des multiples interactions entre les espèces. L'évaluation de ces systèmes sur le long terme et/ou en fonction des projections climatiques futures n'est possible que par une approche de modélisation. Comme déjà démontré dans certaines études, une approche participative avec un réseau d'acteurs peut permettre de mieux ancrer la modélisation dans le concret (Murgue et al., 2016; Prost et al., 2012).

Ce sera le choix utilisé dans le cadre du projet de recherche : développer et utiliser un modèle mécaniste avec une injection de données techniques issues d'une approche participative. Ce couplage de méthodes permet d'explorer les performances agronomiques et environnementales de différents systèmes agroforestiers à base d'oliviers.

Quatre parties composent mon manuscrit de thèse : i) Contexte et problématiques, ii) Matériels et Méthodes, iii) Résultats et iv) Discussion (Figure 1). La partie "Contexte et problématiques" se compose de deux chapitres, l'un sur le contexte général de la problématique de thèse et le deuxième sur le contexte de l'approche de modélisation. Dans la partie "Matériels et Méthodes", les différentes étapes du processus de modélisation sont présentées ainsi que la démarche participative utilisée pour injecter des connaissances techniques. La partie "Résultats" se compose de cinq chapitres, dont quatre rédigés sous forme d'articles : i) Chapitre 4 : L'adaptation du modèle Hi-sAFe aux arbres fruitiers : la paramétrisation, ii) Chapitre 5 : L'adaptation du modèle Hi-sAFe aux arbres fruitiers : analyse de sensibilité, calibration et vérifications, iii) Chapitre 6 : La diversification des oliveraies par la co-conception de systèmes diversifiés à base d'oliviers, iv) Chapitre 7 : L'évaluation par modélisation des trois systèmes co-conçus

par les acteurs, v) Chapitre 8 : L'impact du changement climatique sur les systèmes oléicoles traditionnels et agroforestiers. De plus, le chapitre 9 dans la partie "Discussion" discute des résultats obtenus en fonction de la littérature scientifique et des limites des approches utilisées. Suite à ce travail, des perspectives de recherche sont mises en évidence et guideront les projets de recherche futurs.

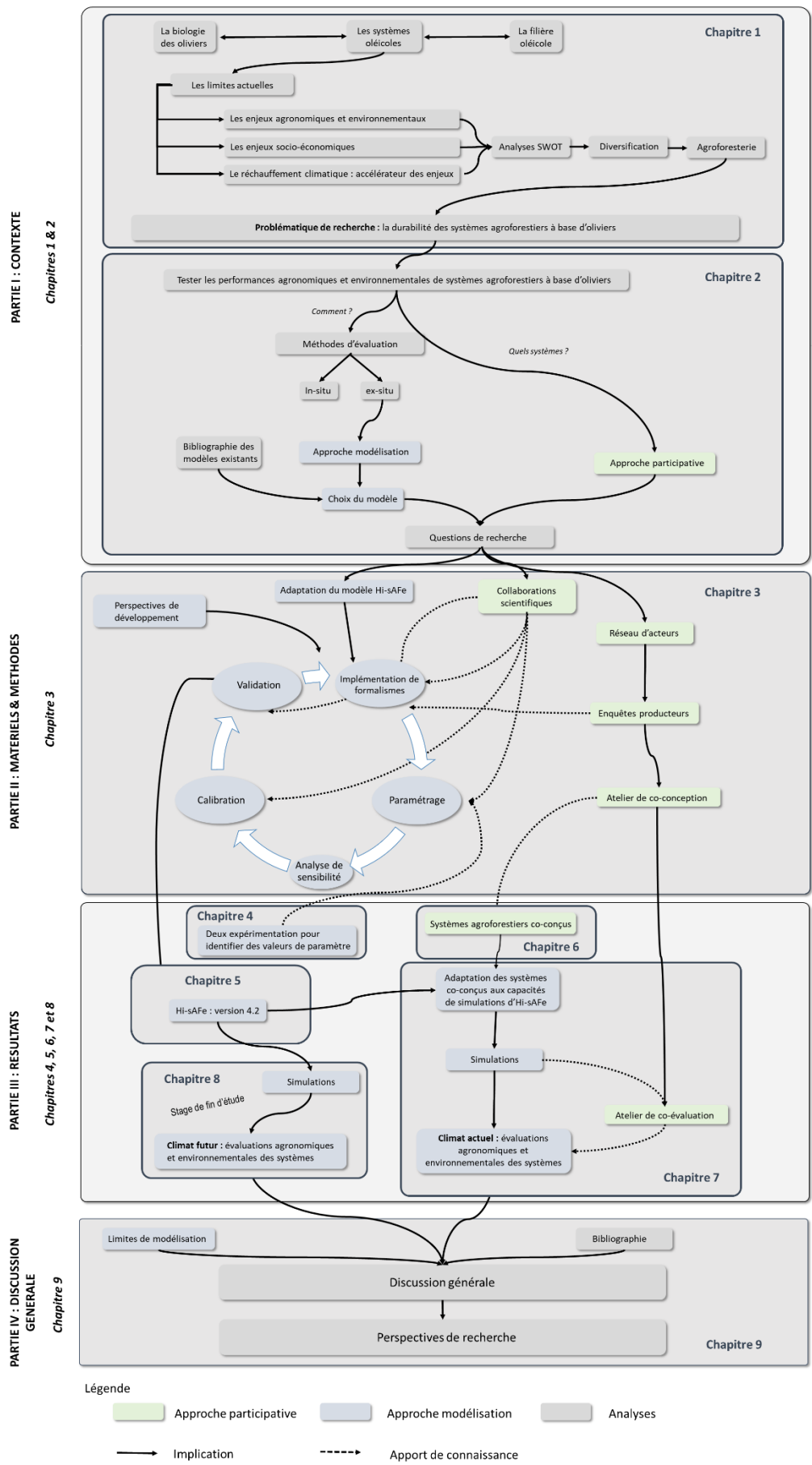


Figure 1 : Schéma conceptuel de l'organisation du manuscrit de thèse

Bibliographie de l'introduction générale

- Ali, E., Cramer, W., Carnicer, J., Georgopoulou, E., Hilmi, N.J.M., Le Cozannet, G., Lionello, P., 2022. Cross-Chapter Paper 4: Mediterranean Region Supplementary Material. *Clim. Change 2022 Impacts Adapt. Vulnerability Supplementary Material*.
- Avelin, C., 2022. Marché de l'huile d'olive Monde, Europe, France - Campagne 2020-2021.
- Breton, C., Bervillé, A., 2012. Histoire de l'olivier. Quae.
- Covas, M.-I., Konstantinidou, V., Fitó, M., 2009. Olive Oil and Cardiovascular Health. *J. Cardiovasc. Pharmacol.* 54, 477–482. <https://doi.org/10.1097/FJC.0b013e3181c5e7fd>
- Covas, M.-I., Ruiz-Gutiérrez, V., Torre, R., Kafatos, A., Lamuela-Raventós, R.M., Osada, J., Owen, R.W., Visioli, F., 2006. Minor Components of Olive Oil: Evidence to Date of Health Benefits in Humans. *Nutr. Rev.* 64, S20–S30. <https://doi.org/10.1111/j.1753-4887.2006.tb00260.x>
- Dupraz, C., Liagre, F., 2011. Agroforesterie. Des arbres et des cultures., France Agricole. ed, Agriproduction.
- Koubouris, G.C., Metzidakis, I.T., Vasilakakis, M.D., 2009. Impact of temperature on olive (*Olea europaea* L.) pollen performance in relation to relative humidity and genotype. *Environ. Exp. Bot.* 67, 209–214. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.06.002>
- Lauri, P.-É., Barkaoui, K., Ater, M., Rosati, A., 2019. Agroforestry for fruit trees in Europe and Mediterranean North Africa, in: *Burleigh Dodds Series in Agricultural Science*. Burleigh Dodds Science Publishing, pp. 385–418. <https://doi.org/10.19103/AS.2018.0041.18>
- Lee, H., Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., 2023. Synthesis report of the IPCC sixth assessment report (AR6).
- López-Bernal, Á., Morales, A., García-Tejera, O., Testi, L., Orgaz, F., De Melo-Abreu, J.P., Villalobos, F.J., 2018. OliveCan: A Process-Based Model of Development, Growth and Yield of Olive Orchards. *Front. Plant Sci.* 9, 632. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00632>
- Loumou, A., Giourga, C., 2003. Olive groves: 'The life and identity of the Mediterranean'. *Agric. Hum. Values* 20, 87–95. <https://doi.org/10.1023/A:1022444005336>
- Murgue, C., Therond, O., Leenhardt, D., 2016. Hybridizing local and generic information to model cropping system spatial distribution in an agricultural landscape. *Land Use Policy* 54, 339–354. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.02.020>
- Nawaz, M.F., Bourrié, G., Trolard, F., 2013. Soil compaction impact and modelling. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 33, 291–309. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0071-8>
- Pantera, A., Burgess, P.J., Mosquera Losada, R., Moreno, G., López-Díaz, M.L., Corroyer, N., McAdam, J., Rosati, A., Papadopoulos, A.M., Graves, A., Rigueiro Rodríguez, A., Ferreiro-Domínguez, N., Fernández Lorenzo, J.L., González-Hernández, M.P., Papanastasis, V.P., Mantzanas, K., Van Lerberghe, P., Malignier, N., 2018. Agroforestry for high value tree systems in Europe. *Agrofor. Syst.* 92, 945–959. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0181-7>
- Prost, L., Cerf, M., Jeuffroy, M.-H., 2012. Lack of consideration for end-users during the design of agronomic models. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 32, 581–594. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0059-4>
- Rosati, A., Caporali, S., Paoletti, A., 2009. Olive, Asparagus and animals: an agroforestry model for temperate climate in developed countries. *Proc. III OLIVEBIOTEQ Renov. Profitab. Compet. Mediterr. Olive Grow. Sect. Sfax Tunis.* 15, 19.
- Sofi, F., Cesari, F., Abbate, R., Gensini, G.F., Casini, A., 2008. Adherence to Mediterranean diet and health status: meta-analysis. *BMJ* 337, a1344–a1344. <https://doi.org/10.1136/bmj.a1344>
- Tzanakakis, M., 2003. Seasonal development and dormancy of insects and mites feeding on olive: a review. *Neth. J. Zool.* 52, 87–224. <https://doi.org/10.1163/156854203764817670>
- USDA Agroforestry Strategic Framework, 2019. *Agroforestry Strategic Framework: Fiscal Years 2019-2024*.

PARTIE I

Contexte et problématique

Chapitre 1 : L'adaptation des oliveraies face aux contraintes agronomiques et environnementales

Le premier chapitre de cette thèse se concentre sur le contexte scientifique qui encadre la problématique de l'étude. Il met en lumière les enjeux majeurs auxquels les systèmes oléicoles sont confrontés.

La première partie examine la consommation d'olives et d'huile à l'échelle mondiale et nationale. Elle est suivie d'une description de la biologie, de la culture et des systèmes de culture de l'olivier. Cette description est essentielle pour une bonne compréhension et conceptualisation des systèmes de culture de l'olivier en vue de leur modélisation et simulation.

La deuxième partie de ce chapitre examine les limites inhérentes aux systèmes de culture de l'olivier ainsi que les problématiques rencontrées par les producteurs.

Enfin, la dernière partie explore les différentes problématiques et solutions envisagées pour relever les défis des systèmes oléicoles, aboutissant à la présentation de la thématique de recherche.

1) Un aliment santé : la consommation d'olives et d'huile d'olive dans le monde et en France

A) Un aliment santé

L'huile d'olive est un produit méditerranéen emblématique, utilisé depuis la civilisation grecque et considéré comme la principale source de matières grasses pour les régimes alimentaires méditerranéens.

L'huile d'olive est composée majoritairement d'acides gras, dont l'acide oléique, les acides gras monoinsaturés (55 à 83 %), les acides gras polyinsaturés (4 à 20 %), et les acides gras saturés (8 à 14%) (Covas et al., 2009). D'autres composés mineurs, tels que les composés phénoliques, sont également présents et représentent environ 1 à 2 % de la teneur d'une huile d'olive (Covas et al., 2006)

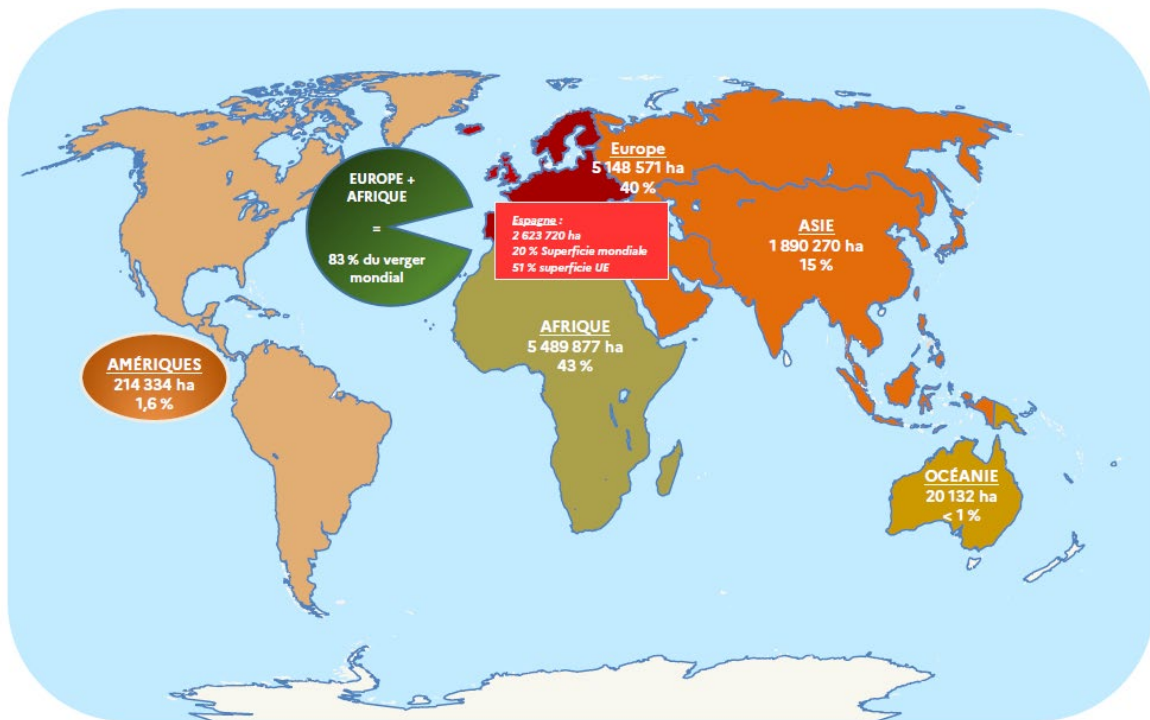
Des études cliniques ont démontré que la consommation d'huile d'olive peut réduire significativement la mortalité liée aux maladies et aux accidents cardiovasculaires. Elle peut également diminuer l'incidence des cancers et des maladies neurodégénératives, telles que la maladie de Parkinson et la maladie d'Alzheimer (Covas et al., 2009; Farhan et al., 2023; Lu et al., 2023; Sofi et al., 2008). De ce fait, cet aliment est aujourd'hui considéré comme un aliment santé aux propriétés vertueuses. Sa consommation est d'ailleurs recommandée par les organismes de santé publique (comme Santé publique France et OMS) (Santé publique France, 2019).

B) La consommation d'olives et d'huile d'olive

a) Dans le monde

L'olivier occupe actuellement la 24^{ème} place parmi les espèces les plus cultivées dans le monde (Ellstrand, 2003). La majorité de la production d'olives se trouve dans le bassin méditerranéen, qui représente 98 % de la production mondiale en 2020 (Avelin, 2022) (Figure 2). La production mondiale d'huile d'olive atteignait 3 010 000 tonnes en 2020, avec l'Espagne en tête en tant que premier producteur

mondial. Environ 12 000 moulins ont été utilisés pour produire cette huile, cultivée sur une superficie totale de 12 763 184 hectares. Ces chiffres soulignent l'importance de l'industrie de l'huile d'olive pour de nombreux pays producteurs et la forte demande mondiale pour cette huile. La région méditerranéenne est largement impliquée dans la culture de l'olivier, avec près de la moitié du verger mondial situé dans l'Union européenne, l'Espagne étant le principal producteur avec 20 % du verger. Ces régions représentent ensemble 83 % des surfaces de production d'olives dans le monde, mettant en évidence leur rôle clé dans la production d'huile d'olive à l'échelle mondiale. Dans certains pays producteurs tels que l'Algérie, le Maroc, la Tunisie et la Turquie, l'oléiculture est même considérée comme le principal secteur agricole (Avelin, 2022).

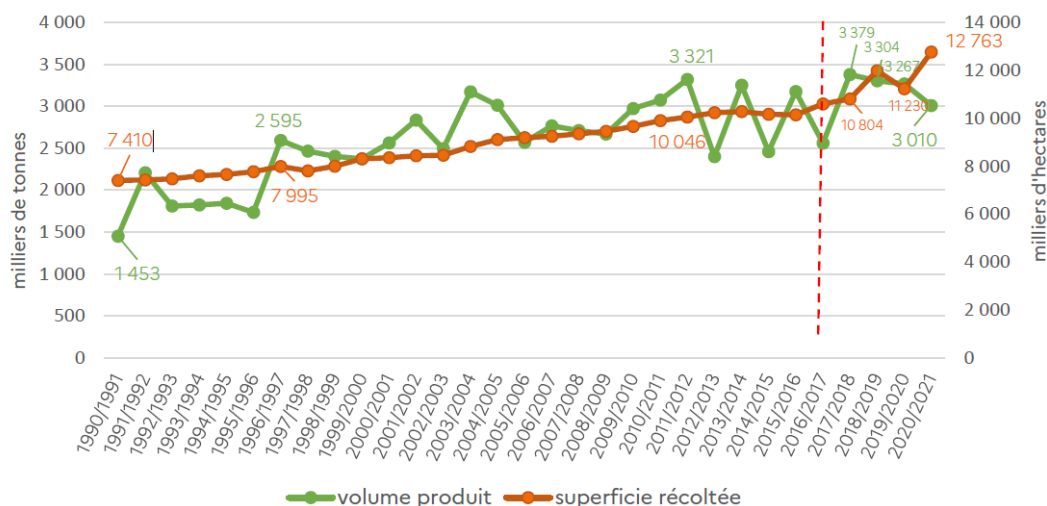


Sources : FAO – FiBL – Ifoam

Figure 2 : Carte de la répartition mondiale du verger oléicole (Avelin, 2022)

Depuis 1990, la production mondiale d'huile d'olive enregistre une forte hausse : en 30 ans, la production a été multipliée par deux. En revanche, depuis 2017, la production mondiale affiche une baisse constante (- 12 %) tandis que les surfaces ne cessent de progresser (Figure 3).

Depuis 30 ans, la production d'olives de table ne cesse d'augmenter, pour atteindre en 2021, 2 837 000 de tonnes (Conseil Oléicole International, 2022).



Sources : COI – FAO

Figure 3 : Graphique de la dynamique de production mondiale en huile d'olive en milliers de tonnes (Avelin, 2022)

b) En France

La distribution des oliviers sur le territoire français est limitée à la partie sud de la France. Les oliveraies sont plantées sur 55 000 hectares, réparties dans 13 départements (Alpes-de-Haute-Provence, Alpes-Maritimes, Ardèche, Aude, Bouches-du-Rhône, Corse-du-Sud, Drôme, Gard, Haute corse, Hérault, Pyrénées-Orientales, Var et Vaucluse) (Figure 4) (FranceAgriMer, 2021, 2020).

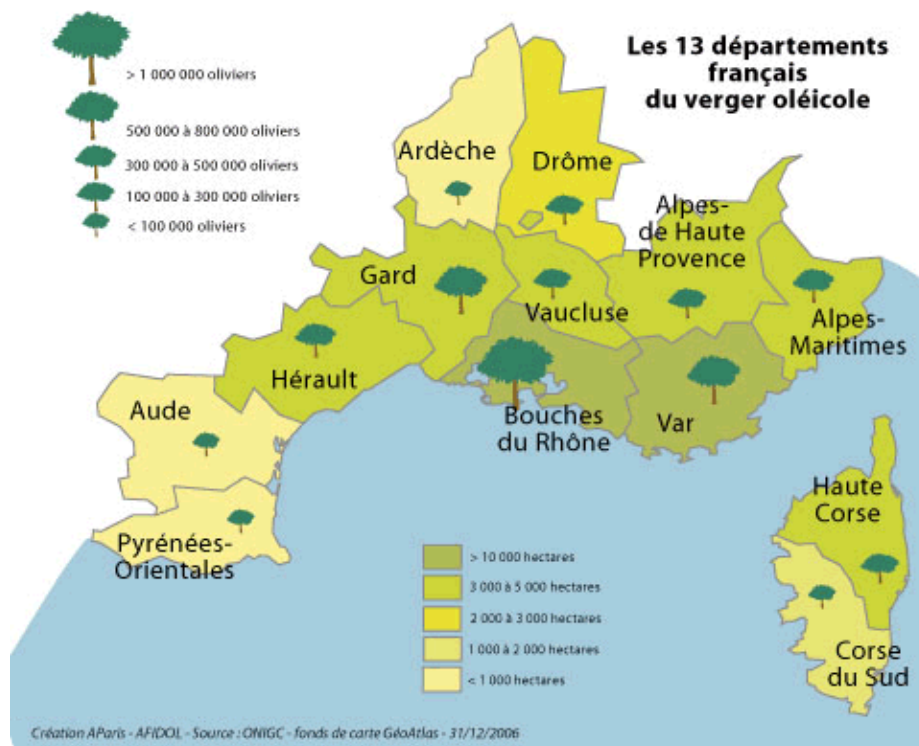


Figure 4 : Carte des 13 départements producteurs d'huile d'olive et d'olives

Une production d'huile d'olive moyenne de 4 300 tonnes par an entre 2010 et 2015 a été mesurée, contre 4 000 tonnes par an entre 2000 et 2006. Plus récemment, la production nationale d'huile d'olive était d'environ 5 000 tonnes en 2018 et de 3 225 tonnes en 2019. Au niveau régional, la région PACA (Provence-Alpes-Côte d'Azur) a été la principale région productrice d'huile d'olive en 2018, avec 2 900 tonnes, suivie de l'Occitanie, d'AURA (Auvergne-Rhône-Alpes) et de la Corse, avec respectivement

950 tonnes, 950 tonnes et 200 tonnes. En 2019, la production a diminué, avec 712 tonnes, 156 tonnes et 67 tonnes pour l'Occitanie, l'AURA et la Corse, respectivement (FranceAgriMer, 2020, 2021). Cette faible augmentation des rendements de 2000 à 2016, malgré de nombreuses plantations et reprises de vergers, est déplorée par FranceOlive (Afidol, 2016). Selon FranceOlive, cette croissance minime s'explique par plusieurs problématiques détaillées dans la partie suivante.

La consommation d'huile d'olive a considérablement augmenté au cours des 25 dernières années. Comme mentionné dans le rapport de FranceAgriMer, la consommation d'huile a augmenté de 43 700 tonnes à 100 000 tonnes en 25 ans.

Cependant, la production française ne suffit pas à satisfaire la consommation française d'huile d'olive. En effet, en 2018, la production d'huile ne représentait que 2% de la consommation française (FranceAgriMer, 2020). De même, la production d'olives ne couvre que 2% de la consommation française (FranceAgriMer, 2020). Afin de satisfaire la consommation d'huile d'olive et d'olives de table, la France importe principalement de l'Espagne, de la Grèce, de l'Italie, du Maroc et de la Tunisie (FranceAgriMer, 2020, 2021).

2) La biologie et les systèmes oléicoles

A) La description et la biologie des oliviers

a) La classification botanique

L'olivier est une espèce d'arbre fruitier qui appartient à la famille des Oleaceae et est originaire de la région méditerranéenne. Sa domestication se serait déroulée dans l'est de la méditerranéen puis disséminée dans tout le bassin méditerranéen grâce aux différentes civilisations, les Phéniciens, les Grecs et les Romains (Breton et al., 2006). En revanche, plusieurs événements de domestication ont probablement eu lieu pour cette espèce, ce qui a conduit à une grande diversité de cultivars dans le bassin méditerranéen, estimée à plus de 2 000 cultivars (Ellstrand, 2003).

La classification de l'olivier est la suivante (The Angiosperm Phylogeny Group, 2016) :

- Royaume : Plantae
- Sous-royaume : Tracheobionta
- Phylum : Magniophyta
- Sous-branche : Angiospermes
- Classe : Mognoliopsida
- Sous-classe : Asteridae
- Ordre : Lamiales
- Famille : Oleaceae
- Genre : *Olea* L.
- Espèce : *Olea europaea* L.

L'olivier peut être trouvé sous sa forme cultivée (*Olea europaea* subsp. *europaea* var. *Europaea*), ou sous sa forme sauvage, appelée oléastre (*Olea europaea* subsp. *europaea* var. *Sylvestris*). L'oléastre comprend la forme sauvage connue sous le nom de "véritable" et la forme "férale" correspondant à des oliviers sauvages cultivés à partir d'oliviers cultivés (Bartolini et al., 1998; Breton et al., 2006) (Figure 5).

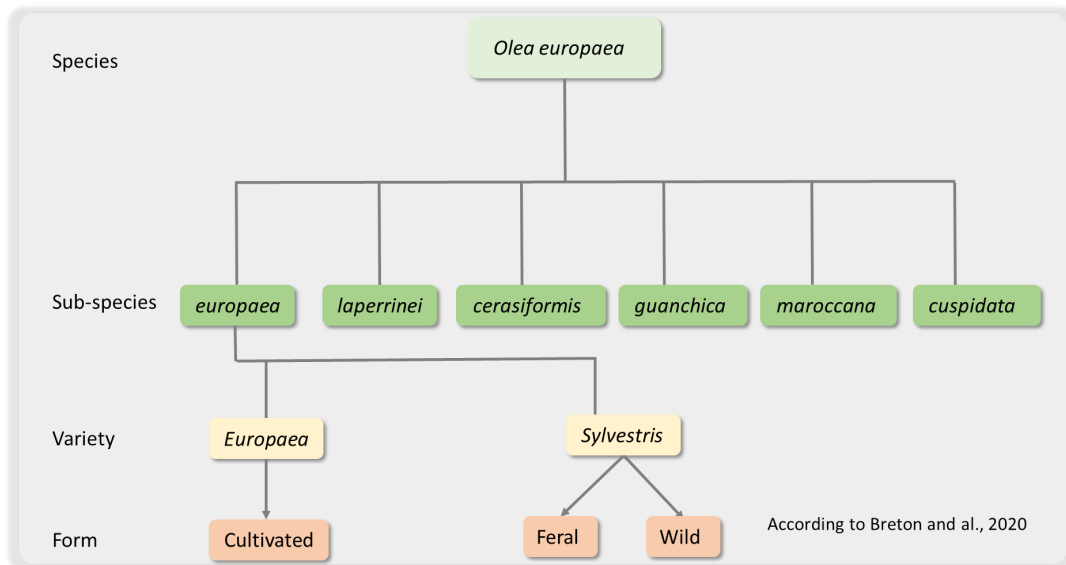


Figure 5 : Représentation schématique de la classification taxonomique de l'espèce *Olea europaea* L.

b) La description biologique

D'une longue durée de vie, certains oliviers peuvent dépasser les 700 ans (Arnan et al., 2012; Bernabei, 2015). Comme d'autres arbres fruitiers, l'olivier est composé d'un ou plusieurs troncs, de charpentières, de rameaux, de feuilles, de fruits et de racines.

Les jeunes oliviers ont généralement un tronc droit qui devient noueux avec l'âge. Non taillé, il peut atteindre une hauteur de 20 mètres. Cependant, pour sa culture, il est généralement réduit à une hauteur de trois à sept mètres. Certains oliviers peuvent présenter plusieurs troncs.

Sur le ou les tronc(s), des charpentières s'insèrent et constituent la frondaison de l'arbre. Ses charpentières portent les rameaux végétatifs puis fructifères. Arbre à feuilles persistantes, l'olivier présente deux ou trois générations de feuilles. La sénescence des feuilles, qui dure de un à trois mois, se produit généralement la 3^{ème} année suivant l'émission des feuilles, à partir de juin (Proietti, 1998). Ces feuilles sont elliptiques et ont un ensemble de bourgeons dans leurs aisselles. Le bourgeon principal peut ensuite se différencier en bourgeons végétatifs ou floraux l'année suivante (Lauri et al., 1998). Le bourgeon floral constitue une inflorescence ou grappe, regroupant un ensemble de fleurs.

L'olive est une drupe, pourpre-noire à maturité, composée d'un épicarpe (peau), d'un mésocarpe (pulpe) et d'un endocarpe (noyau très lignifié). Le mésocarpe de l'olive est riche en huile. La quantité d'huile dans l'olive augmente en raison de la lipogenèse qui se produit pendant la maturation de l'olive (Gharabi, 2018). En fonction des cultivars et des caractéristiques de production des olives ("olives à huile", "olives de table", "olives à double usage"), la date de récolte n'est pas la même et la quantité d'huile dans les olives est variable (Virassamy, 2020).

Le système racinaire de l'olivier dépend très fortement des conditions pédoclimatiques de la parcelle. Sur des sols légers et profonds, le système racinaire peut être en partie pivotant alors que sur des terres lourdes, il est traçant. Néanmoins, le système racinaire de l'olivier est généralement localisé entre 50 et 70 cm du sol (Lodolini et al., 2015; Polverigiani et al., 2012; Simoni et al., 2021).

Les stades phénologiques des oliviers sont régis par un enchaînement d'étapes de développement et de production. Selon l'échelle BBCH (Biologische Bundesanstalt bunderssortenamnt and CHEmical industry), qui est la plus utilisée actuellement pour décrire la phénologie des plantes, la croissance de l'olivier commence mi-mars avec le débourrement des bourgeons (Sanz-Cortes et al., 2002). Les

« besoins en froid », acquis pendant l'hiver et les seuils d'accumulation de température (acquis en fin d'hiver et au début du printemps) influencent le développement des bourgeons végétatifs, ainsi que celui des bourgeons floraux qui se développent à partir d'un certain seuil d'accumulation de température. La floraison dure généralement de sept à dix jours, après quoi des fleurs non fécondées et des fruits non noués tombent massivement. L'olivier, espèce anémophile, dépend du vent pour le transport du pollen (Mazzeo et al., 2014).

Les fruits noués se développent ensuite de mai à octobre. La date de récolte dépend du type de valorisation de l'olive : l'olive de table est cueillie plus tôt (septembre) que l'olive destinée à la production d'huile (octobre à décembre, éventuellement janvier) (Figure 6). Dans ce dernier cas, la période de récolte est déterminée par l'avancée de la maturation de l'olive et donc l'augmentation de sa teneur en huile (Morales et al., 2016; Sanz-Cortes et al., 2002). Les oléiculteurs utilisent les stades phénologiques pour planifier les opérations culturales, qui se décomposent en plusieurs étapes : l'itinéraire technique.

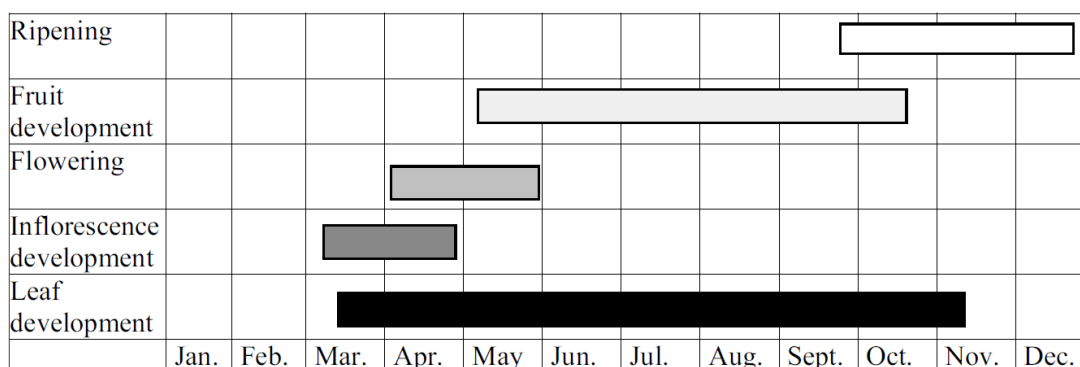


Figure 6: Représentation schématique des différents stades phénologiques de l'olivier (Sanz-Cortes et al., 2002)

c) Les itinéraires techniques

L'itinéraire technique des oliviers consiste en une série d'opérations culturales réalisées tout au long de l'année pour assurer la croissance, la santé et la production optimale de l'olivier. Cet itinéraire peut varier en fonction de la région, du climat, du type de sol et de la variété d'olivier cultivée (FranceOlive, 2021). Il se décompose en plusieurs étapes :

- Février – mars – avril : Taille de formation ou d'entretien pour éliminer les branches mortes, malades ou abîmées et favoriser la croissance des jeunes pousses et taille de fructification pour stimuler la production de fruits ;
- Avril : Traitement préventif contre les bioagresseurs, tels que la mouche de l'olivier et les maladies fongiques ;
- Mai - juin – juillet - août : Irrigation pour assurer une croissance régulière des olives et éviter le stress hydrique ;
- Septembre : Récolte des olives de table (variétés précoces) et traitement post-récolte pour leur conservation ;
- Septembre – octobre – novembre – décembre : Récolte des olives destinées à la production d'huile d'olive (variétés tardives).

Cet itinéraire technique doit être adapté en fonction des conditions locales et des pratiques culturales de chaque oléiculteur.

d) Les systèmes oléicoles

Il existe différents systèmes oléicoles, qui désignent les différentes façons de cultiver et d'entretenir les oliviers. Trois systèmes principaux sont retrouvés (Fernández-Escobar et al., 2013; Russo et al., 2016) (Figure 7) :

- **Le système traditionnel ou extensif** est la méthode la plus ancienne et la plus répandue de culture des oliviers. Elle consiste à planter les arbres, généralement en grandes parcelles, avec une faible densité de plantation (inférieure à 140 arbres/ha). Les oliveraies ne sont pas irriguées et se situent souvent sur des pentes raides. Malgré une qualité d'huile souvent élevée, les rendements y sont faibles et les irrégularités de production entraînent généralement une faible rentabilité économique ;
- **Le système intensif ou semi-intensif** a une densité de plantation plus élevée et une conduite des arbres en forme de "V" ou de "palmette". Les rendements sont supérieurs à ceux du système traditionnel, mais la qualité de l'huile peut être légèrement inférieure. Les oliveraies semi-intensives ont une densité de plantation de 140 à 399 arbres/ha, avec l'utilisation d'intrants et de produits phytosanitaires pour le contrôle des mauvaises herbes et des ravageurs. Ces vergers peuvent être irrigués et ont une productivité moyenne ;
- **Le système super intensif** implique une densité de plantation très élevée, généralement en rangées très serrées, où les oliviers sont taillés pour ne former qu'un seul tronc et quelques branches courtes. Bien que les rendements soient très élevés, la qualité de l'huile peut être inférieure à celle des systèmes traditionnels et intensifs. Les oliveraies super-intensives se caractérisent par une densité de plantation allant de 400 à 2 500 arbres/ha, et sont bien adaptées au contexte de plaine où elles bénéficient d'une forte fertilisation et irrigation. Les oléiculteurs utilisent des produits phytosanitaires contre les ravageurs (qui peuvent se retrouver également dans les deux autres systèmes), et peuvent opter pour la mécanisation de certaines opérations telles que la récolte et la taille. Ces vergers sont très productifs et rentables (Russo et al., 2016).

Les trois systèmes oléicoles présentent des problèmes environnementaux tels que l'érosion, la perte de fertilité et la diminution de la biodiversité. Cependant, ces problématiques sont plus fréquentes dans les systèmes super intensifs (Gómez et al., 2009).

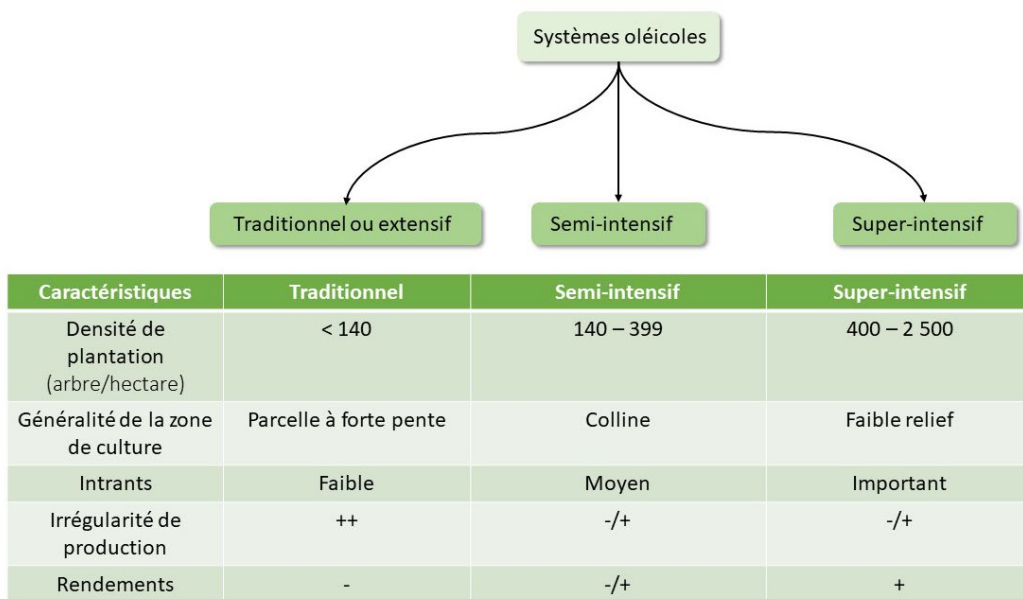


Figure 7 : Représentation schématique des trois principaux systèmes oléicoles

Il existe bien sûr d'autres systèmes oléicoles, chacun ayant ses avantages et ses inconvénients en termes de rendement, de qualité de l'huile, de coût et d'impact environnemental. Le choix du système dépend des conditions locales, des objectifs de l'oléiculteur et des préférences des consommateurs (marché ciblé).

B) La description de la filière oléicole

Les différents acteurs du secteur de l'olive sont divisés en trois catégories : les producteurs, les acteurs en amont de la production et les acteurs en aval de la production (Figure 8).

La France compte environ 25 000 producteurs d'olives, dont la moitié n'est pas considérée comme des producteurs professionnels. Bien que ces producteurs d'olives assurent la production annuelle en France, cette quantité ne suffit pas à répondre à la demande en olives et en huile d'olive (FranceAgriMer, 2020). Les exploitations sont généralement petites (Paris, 2017) et les oliviers sont une source de diversification pour les agriculteurs (Bonnemort et al., 2008).

En amont de cette production, les producteurs d'olives sont en interaction avec différents acteurs :

- Des conseillers agricoles (publics et privés). Les producteurs peuvent être guidés par des conseillers de la Chambre d'Agriculture ou du Centre Technique de l'Olivier (CTO).
- Des fournisseurs. Des vendeurs d'outils, de matériel végétal et de produits phytosanitaires.
- Des décideurs politiques. Ces derniers peuvent avoir un impact sur les itinéraires techniques appliqués par les producteurs d'olives en raison de l'application d'un nouveau décret, par exemple.
- Des chercheurs (publics et privés). La recherche peut conduire à des changements de techniques de culture, de nouvelles variétés, etc.

Le temps d'interaction entre ces acteurs et les producteurs varie, tout comme leur influence sur les opérations culturales.

En aval de cette production, les producteurs d'olives interagissent avec différents acteurs :

- Des coopératives agricoles. En France, en 2016, plus de 30 coopératives recevaient et vendaient des olives et de l'huile d'olive (Paris, 2017).
- Des moulins, pour la production d'huile. En France, 317 moulins étaient enregistrés en 2016 (Paris, 2017).
- Des confiseurs, pour la production d'olives de table. En France, 60 confiseurs préparent des olives de table pour la commercialisation (FranceAgriMer, 2020).

S'ils ne vendent pas leur production aux coopératives agricoles, aux moulins ou aux confiseurs, les producteurs peuvent vendre leur production eux-mêmes sur les marchés locaux ou directement à la ferme. En 2013, les ventes directes d'huile d'olive représentaient moins de 3 % du total des ventes d'huile d'olive.

Pour répondre à la demande française, la priorité de ces acteurs est de stabiliser et/ou d'augmenter la production française pour atteindre des rendements moyens de 5 500 à 6 000 tonnes d'huile d'olive, ce qui ne couvre que partiellement la demande française (Paris, 2017).

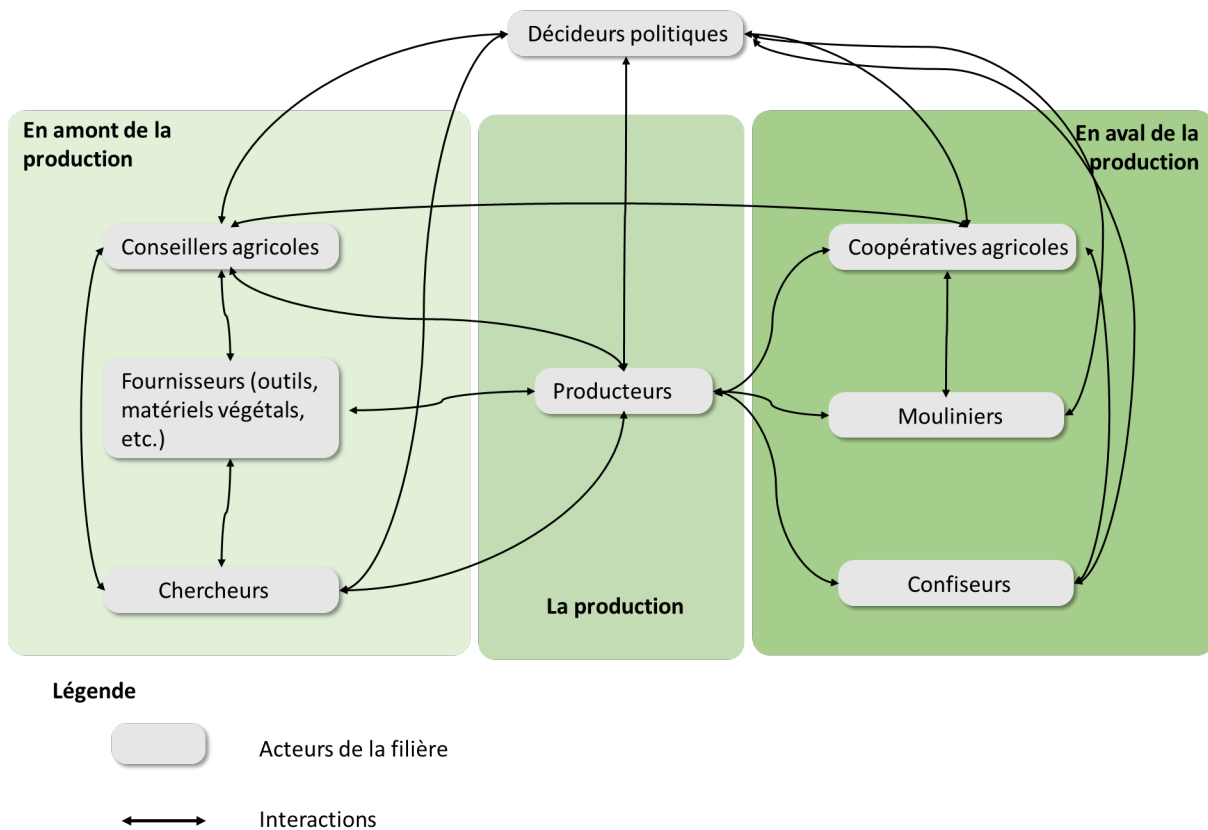


Figure 8 : Représentation schématique de la structure de la filière oléicole française

La filière oléicole implique un ensemble d'acteurs qui ont un intérêt, direct ou indirect, dans la production, la transformation et la commercialisation des olives et de l'huile d'olive. Les acteurs, également appelés parties prenantes, incluent les individus, les groupes et les organisations concernés par les activités de l'entreprise ou de la filière, qui peuvent être affectés par celles-ci ou influencer leur déroulement. Tout au long de ce document, le terme acteur sera utilisé pour désigner les parties prenantes.

2) Les limites actuelles des systèmes oléicoles et les problématiques rencontrées par les oléiculteurs

A) Les enjeux agronomiques et environnementaux

a) Les enjeux agronomiques

Comme les autres arbres fruitiers, les oliviers sont soumis à des facteurs biotiques (ravageurs) et abiotiques (température, radiation solaire, vent, humidité relative, précipitations, etc.) (Figure 9).

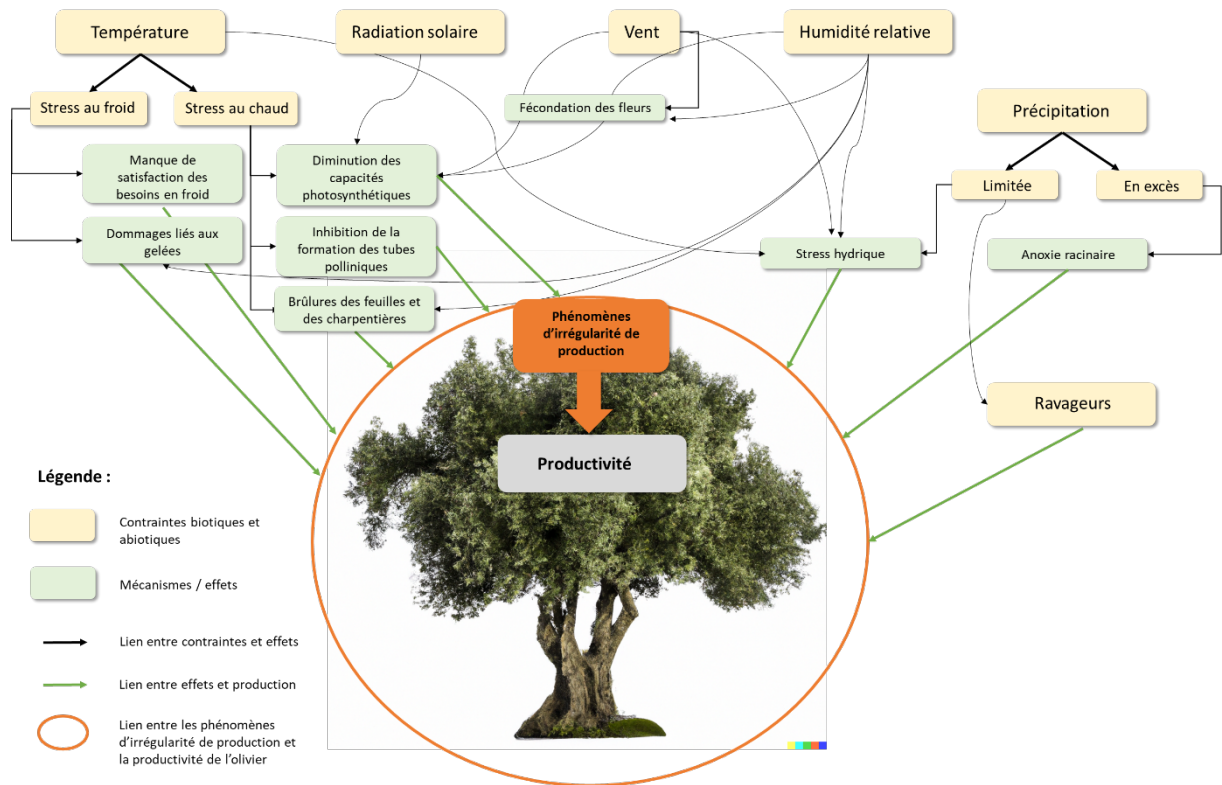


Figure 9 : Représentation schématique des contraintes agronomiques (facteurs biotiques et abiotiques) auxquels sont confrontés les oliviers (olivier généré par Dall.E 2 d'OpenAI). © N. Barbault

Les facteurs abiotiques

Les températures extrêmes, qu'elles soient chaudes ou froides, ont un impact sur la croissance, le développement et la productivité des oliviers, dont l'aire de répartition est principalement dictée par la température. Cette aire de culture se situe dans le bassin méditerranéen, une région marquant la transition entre les climats désertiques secs et les climats tempérés généralement plus humides. Les études ont démontré que l'aire de culture optimale pour les oliviers se situe dans des zones géographiques caractérisées par des températures variant de 7°C en hiver à 25°C en été (Moriondo et al., 2013).

En plus des conditions climatiques requises, des événements climatiques extrêmes peuvent survenir dans ces régions, tels que des gelées ou des canicules. Bien que les gelées soient rares, elles peuvent causer des dommages considérables, comme cela a été le cas lors de la gelée de 1956 qui a détruit un million d'oliviers en Provence (France Bleu Gard Lozère, 2016). Aujourd'hui, dans le paysage, les vestiges de cette gelée sont encore visibles avec des oliviers à multi troncs (Figure 10).



Figure 10 : Photographie d'un olivier qui a subi la gelée de 1956 et qui a repoussé avec plusieurs troncs. © N. Barbault

L'olivier ne peut pas survivre au-dessous -12°C et au-dessous de -7°C des dégâts très importants sont déjà visibles sur les feuilles (Palliotti and Bongi, 1996). Les dégâts sont visibles en dessous de -18°C sur les rameaux des oliviers (Gómez-del-Campo and Barranco, 2005). Ces dégâts liés aux gelées peuvent impacter très fortement la production.

Les oliviers sont également sensibles au stress lié à la chaleur. Des températures importantes au moment de la floraison vont impacter la dispersion et la germination du pollen, la formation et le développement du tube pollinique, ainsi que la nouaison des fruits (Fabbri and Benelli, 2000; Koubouris et al., 2009; López-Bernal et al., 2018). Bien qu'ils soient adaptés aux climats secs, les oliviers sont également vulnérables aux périodes de sécheresse et de canicule. Au-delà d'un certain seuil, les stomates se ferment et l'activité photosynthétique est réduite (Angelopoulos et al., 1996). De plus, en fonction des tailles et de l'angle d'insertion des charpentières, ces dernières peuvent également subir des brûlures au moment des épisodes caniculaires. Cependant, cette situation peut être évitée grâce à une gestion optimale de la taille des arbres (Le Verge, 2005).

Toujours lié aux températures, les oliviers peuvent être affectés par des « besoins en froid » insatisfaits, ce qui impacte leur phénologie. Comme d'autres espèces, la phénologie des oliviers est régulée par une phase d'endodormance et d'éco-dormance. Pendant la phase d'endodormance, l'olivier accumule des « unités de besoins en froid » pendant l'hiver. En éco-dormance, l'olivier accumule des « unités de besoin en chaleur » de la fin de l'hiver au début de la floraison (Fraga et al., 2019). Dans la littérature, plusieurs modèles sont utilisés pour calculer ces besoins en froid et en chaleur, avec des seuils et des dates de début d'accumulation différentes. Des chercheurs ont étudié les différents stades de développement des oliviers avec un seuil d'accumulation des besoins en chaleur de 10°C en Italie (Mancuso et al., 2002). En fonction des localités, ces manques de satisfaction des besoins en froid sont plus ou moins importants et vont impacter à des degrés différents l'olivier et sa productivité (Fabbri and Benelli, 2000; Hartmann, 1953; Porlingis, 1972). Ces manques de satisfaction des besoins en froid vont impacter la phénologie des oliviers et provoquer un décalage des stades phénologiques (Aguilera et al., 2014; Barranco et al., 2008; Bonofiglio et al., 2008). La floraison est plus précoce et peut durer plus longtemps (Benlloch-González et al., 2018; Gabaldón-Leal et al., 2017). Dans des cas extrêmes, tels que dans les pays magrébins, il est possible d'identifier des fleurs/fruits à des stades très différents sur des branches d'oliviers, ce qui peut impacter la productivité. Généralement, le nombre de fleurs et de fruits diminue (Torres et al., 2017).

Le vent peut impacter la fécondation des fleurs d'olivier en perturbant la dissémination du pollen, tout comme une forte pluviométrie pendant la floraison (Therios, 2009). Les vents chauds peuvent également endommager les grains de pollen, affectant de même la fécondation des fleurs. De plus, les vents chauds peuvent provoquer une chute de fruits plus importante, tandis que les vents secs peuvent entraîner une maturation plus précoce et occasionner un dessèchement des olives (Griggs et al., 1975; Lavee and Nir, 1986; Seifi et al., 2015).

La disponibilité en eau est un autre facteur limitant pour la culture des oliviers. Bien que la plupart des oliviers ne soient pas irrigués et soient adaptés aux climats secs (Moriana et al., 2003), leur culture est limitée par un seuil annuel de précipitations d'environ 350 mm (Ponti et al., 2014). Dans les climats semi-arides ou arides, les densités de plantation sont généralement faibles pour éviter la compétition entre les arbres pour la ressource en eau. Par exemple, en Tunisie, des densités de plantation de 30 arbres par hectare avec des espacements de 18 mètres entre arbres sont courants (Figure 11). Une densité de 17 arbres par hectare peut également être trouvée (Abdallah et al., 2021; Elloumi et al., 2009).



Figure 11 : Photographie des systèmes oléicoles tunisiens caractérisés par une très faible densité de plantation (région oléicole de Sfax). © N. Barbault

Les facteurs biotiques

Les oliveraies sont exposées à différents types de ravageurs tels que des insectes, des bactéries et des champignons (Haber and Mifsud, 2007; Tzanakakis, 2003). Ces ravageurs peuvent entraîner le dépérissement de certains oliviers, ce qui peut réduire leur productivité et leur développement. Dans certains cas, ils peuvent même provoquer la mort de l'arbre. Les oliviers sont également vulnérables aux stress abiotiques tels que la raréfaction de l'eau, qui peuvent les rendre plus sensibles aux attaques des ravageurs.

Les insectes les plus nuisibles pour les oliviers sont la mouche de l'olivier, la teigne de l'olivier et la cochenille noire de l'olivier (Centre technique de l'olivier, 2015; Tzanakakis, 2003). Les champignons les plus nuisibles pour les oliviers sont la maladie de l'œil de paon et la verticilliose. Toutefois, d'autres champignons pathogènes peuvent également attaquer les oliviers. De plus, certaines bactéries peuvent également attaquer les oliviers, comme c'est le cas de la bactérie *Xylella fastidiosa* (Cornara et al., 2017; Fierro et al., 2019; Hopkins and Purcell, 2002; Loconsole et al., 2016).

b) Les enjeux environnementaux

Outre les enjeux agronomiques, les oliveraies sont également confrontées à des enjeux environnementaux, tels que la dégradation des sols, la perte de diversité de la faune et de la flore (Figure 12).

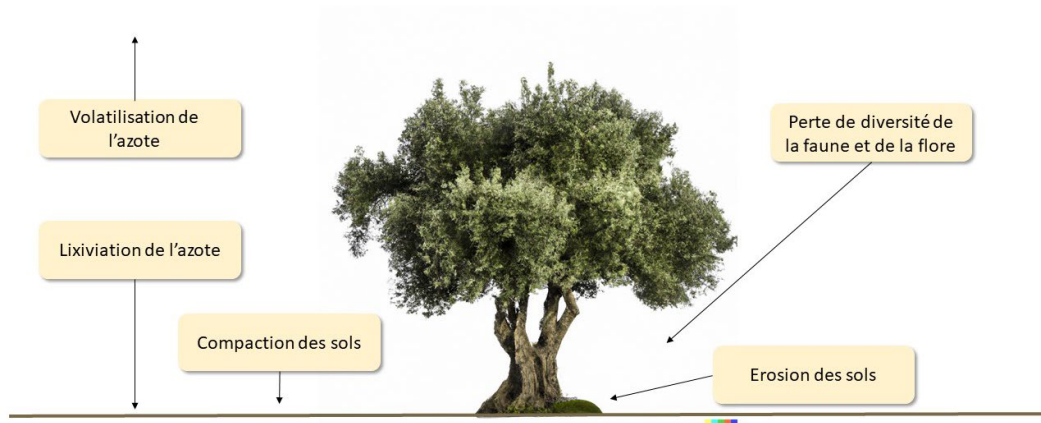


Figure 12 : Représentation schématique des contraintes environnementales auxquelles sont confrontés les oliviers (olivier généré par Dall.E 2 d'OpenAI). © N. Barbault

La dégradation des sols

Aujourd'hui, les sols méditerranéens sont fortement érodés et pour les sols les plus touchés, la couche superficielle est très caillouteuse. Cette dégradation des sols crée un cercle vicieux pour les agriculteurs, car les sols les plus érodés ne permettent plus une bonne infiltration de l'eau, leur profondeur est réduite et la partie fertile est en partie lessivée. Les oliviers sont alors contraints de survivre dans des sols de moins en moins fertiles et profonds. L'érosion des sols est corrélée au type de gestion du sol, qui a évolué au fil des ans, mais dont l'impact est difficilement mesurable sur le court terme. À partir d'un ensemble de mesures de la hauteur des monticules d'arbres dans un verger, la surface du sol d'origine au moment de la plantation peut être reconstruite et interpolée (Gómez et al., 2014) (Figure 14, Figure 15 & Figure 16). Des études ont démontré que la technique des monticules permet d'estimer le taux d'érosion des sols et ont révélé des érosions de l'ordre de 23 à 184 t/ha dans différentes régions d'Espagne (Vanwalleghem et al., 2011). La technique des monticules permet d'évaluer l'érosion du sol en mesurant la différence de hauteur entre le sol au moment de la plantation et le sol actuel (Figure 13).



Fig. 2. Mound formed around a tree at site 2 – Hundideros. The actual soil surface is indicated by the continuous black line, while the dashed line indicates the position of the original, eroded soil surface. The difference between both surfaces corresponds to the eroded soil profile (h).

Figure 13 : Illustration de la technique des monticules utilisée pour quantifier l'érosion des sols. ©Vanwalleghem et al., 2011).

Les systèmes oléicoles intensifiés ont favorisé l'érosion des sols dans des parcelles en pente (Beaufoy, 2001). En outre, bien que les experts aient implicitement admis que les vergers d'oliviers traditionnels étaient durables avant la mécanisation (Loumou and Giourga, 2003), il n'y a pas de données justifiant cette hypothèse. En fait, plusieurs indications montrent que les vergers d'oliviers traditionnels étaient loin d'être durables, étant donné que les zones méditerranéennes cultivées ont historiquement été affectées par une grave érosion hydrique. Par conséquent, l'érosion des sols des oliveraies a toujours existé et a conduit à des problématiques complexes, aggravées par l'intensification des pratiques agricoles (Vanwalleghem et al., 2011). Selon des études récentes, une oliveraie cultivée avec des labours et un sol nu est sujette à une très forte érosion variant de 12 à 23.2 t/an (Montgomery, 2007). Ces chiffres soulignent l'importance de la mise en place de pratiques agricoles durables dans les oliveraies, notamment en évitant les labours et en pratiquant une couverture permanente du sol en inter-rang.



Figure 14 : Photographies des monticules justifiant de la hauteur du sol initiale avant l'érosion. Les flèches rouges sur les photographies indiquent la hauteur initiale des arbres au moment de la plantation des oliviers. © N. Barbault



Figure 15 : Photographie des monticules justifiant de la hauteur initiale du sol avant l'érosion. La mesure indique une perte de 30 cm de sol en 30 ans. © N. Barbault



Figure 16 : Photographies de l'érosion récente du sol d'une jeune oliveraie. Les flèches rouges sur les photographies indiquent l'écoulement de l'eau et l'érosion du sol de la parcelle. © N. Barbault

Depuis la mécanisation des pratiques, les sols subissent non seulement l'érosion, mais également une compaction qui réduit l'infiltration de l'eau et la porosité du sol, tout en augmentant sa densité (Figure 17). Cela a pour conséquence une réduction de la capacité de stockage en eau, une diminution de la résilience du sol aux périodes de sécheresse, et une altération des propriétés physiques, de la faune et de la flore associées (Horn et al., 1995; Nawaz et al., 2013).



Figure 17 : Photographies de la compaction des sols d'une oliveraie au moment de la récolte par le machinisme agricole. Les flèches rouges sur les photographies indiquent la compaction du sol lié au passage des engins agricoles. © N. Barbault

La perte de diversité

Dans les systèmes intensifs oléicoles, la densité de plantation est élevée et l'irrigation est souvent pratiquée pour maximiser le rendement des cultures. Cependant, cette intensification agricole a des effets négatifs sur la diversité de la faune et de la flore. La plantation dense et l'utilisation de pesticides peuvent éliminer les habitats naturels de la faune, les forcer à migrer vers d'autres zones, ou réduire leur population en supprimant leur source de nourriture. De plus, l'utilisation intensive d'engrais et de pesticides peut appauvrir la biodiversité des sols et réduire la diversité des plantes, qui fournissent de l'habitat et de la nourriture pour la faune et les auxiliaires de culture. La diminution de la diversité de la faune et de la flore dans les systèmes intensifs oléicoles peut entraîner une perturbation de l'écosystème local et réduire la résilience du système face aux changements environnementaux (Carpio et al., 2016; Metzidakis et al., 2008).

En réponse à ce problème, il est important de promouvoir des pratiques agricoles durables pour protéger et maintenir la biodiversité. Des études ont montré que pour des systèmes oléicoles durables, la quantité et la diversité microbienne augmentent, dont notamment la densité des bactéries liées au cycle de l'azote (García-Ruiz et al., 2009; Solomou and Sfougaris, 2015). De plus, la richesse des espèces d'amphibiens et des insectes est réduite dans les oliveraies par rapport à d'autres systèmes agricoles (Metzidakis et al., 2008). Des auteurs ont également mis en évidence une plus grande diversité d'oiseaux, principalement due à une plus grande densité de proies de types Hétéroptère, Hyménoptère, Hémiptère et de Coléoptères (Solomou and Sfougaris, 2015). Une plus grande diversité d'araignées (Cárdenas et al., 2015) et d'arthropodes (Gkidakis et al., 2016) ont également été trouvées dans des vergers d'oliviers en agriculture biologique. Les systèmes intensifs ont aussi un impact négatif sur la diversité de la faune et de la flore. Des études ont démontré que ces systèmes conduisent à la diminution de la diversité des espèces animales et végétales. Par conséquent, il est essentiel de développer des pratiques agricoles durables pour préserver la diversité des sols et des espèces animales et végétales. Cela peut inclure des pratiques telles que la rotation des cultures, l'utilisation de pesticides et d'engrais biologiques, ainsi que la conservation des habitats naturels des animaux (Pleguezuelo et al., 2018).

B) Les enjeux socio-économiques

La filière oléicole en France et en Europe est un secteur important de l'économie, employant de nombreuses personnes et contribuant à l'activité économique des régions productrices circum-méditerranéennes. La production biologique d'olives est en plein essor et offre de réelles opportunités de développement pour les producteurs, grâce à des conditions climatiques favorables. Toutefois, les

exploitations de cette filière sont majoritairement de petite et moyenne taille et sont souvent confrontées à des difficultés pour trouver des intrants (produits phytosanitaires et engrais) abordables et efficaces. De plus, la formation et la recherche en agroécologie sont insuffisantes, ce qui peut ralentir la conversion vers la production biologique et limiter l'innovation dans la filière (Pleguezuelo et al., 2018). Néanmoins, le soutien de la Commission européenne et d'autres organismes publics, ainsi que la demande croissante en produits sains, offrent des opportunités de croissance pour la filière oléicole actuellement en perte de vitesse. Cependant, la concurrence sur le marché européen et la réduction potentielle du financement public sont des menaces importantes pour l'avenir de cette filière. Pour continuer à se développer et répondre aux enjeux futurs de la filière, il sera donc crucial de réduire les coûts de production, de renforcer les marges et de développer la commercialisation, tout en évaluant les aspects socio-économiques tels que la viabilité économique, la sécurité alimentaire, la contribution au développement rural et, selon les régions, la conservation de l'héritage culturel (Gomez-Limon and Riesgo, 2010; Paris, 2015; Pleguezuelo et al., 2018).

C) Le changement climatique, accélérateur des problématiques agronomiques, environnementales et socio-économiques

a) L'évolution du climat

Le climat de la planète a connu une augmentation de température significative au cours des dernières décennies, avec une hausse de la température de surface terrestre d'environ 1,1°C par rapport à la période préindustrielle. Cette augmentation rapide de la température est principalement due à une augmentation des émissions de gaz à effet de serre (GES ou GHG GreenHouse Gas), causée par les activités humaines telles que la combustion de combustibles fossiles et les processus industriels. Depuis 1850, les émissions de GHG ont augmenté de manière importante, atteignant un niveau record de 59±6.6 Gt CO₂ en 2019 (Figure 18).

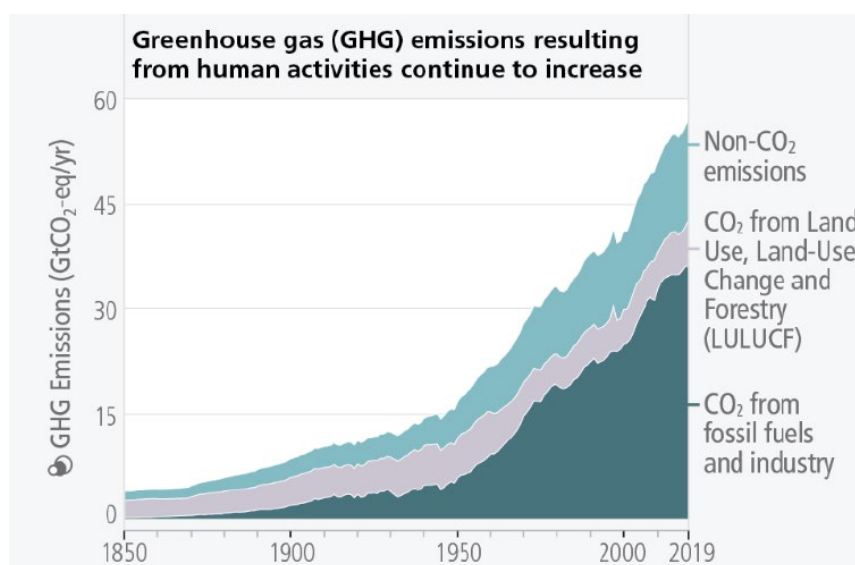


Figure 18 : Graphique de la dynamique d'augmentation des gaz à effet de serre entre 1850 et 2019. (source : © IPCC AR6 SYR Longer Report, Lee et al., 2023)

Les concentrations atmosphériques de CO₂, de méthane et d'oxyde nitreux ont également atteint des niveaux records depuis plusieurs centaines de milliers à plusieurs millions d'années. En 2019, la concentration de CO₂ dans l'atmosphère était de 410 parties par million (ppm). Les secteurs de l'énergie, de l'industrie, des transports et des bâtiments sont les principaux émetteurs de gaz à effet de serre,

représentant environ 79% des émissions totales en 2019. L'agriculture, la foresterie et d'autres utilisations des terres contribuent également aux émissions. Malgré les efforts déployés pour réduire les émissions de CO₂, celles-ci n'ont pas diminué de manière significative et continuent d'augmenter chaque année (Forster et al., 2023; Lee et al., 2023; Pörtner et al., 2022).

b) Les impacts du changement climatique déjà visibles

Le changement climatique a de nombreux effets sur l'environnement (sécheresse, incendie, forte précipitation, fonte des glaciers, élévation du niveau des océans, acidification des océans et augmentation de la fréquence des événements extrêmes) et impacte six éléments majeurs des sociétés humaines et des écosystèmes : i) la disponibilité de la ressource hydrique et la production alimentaire, ii) la santé et le bien-être, iii) les villes, les habitats et les infrastructures, iv) le changement de la structure des écosystèmes, v) les déplacements des aires de répartition des espèces, vi) la phénologie des espèces végétales. Ces impacts sur nos sociétés et nos écosystèmes sont dus au changement des conditions climatiques (Figure 19) (Lee et al., 2023).

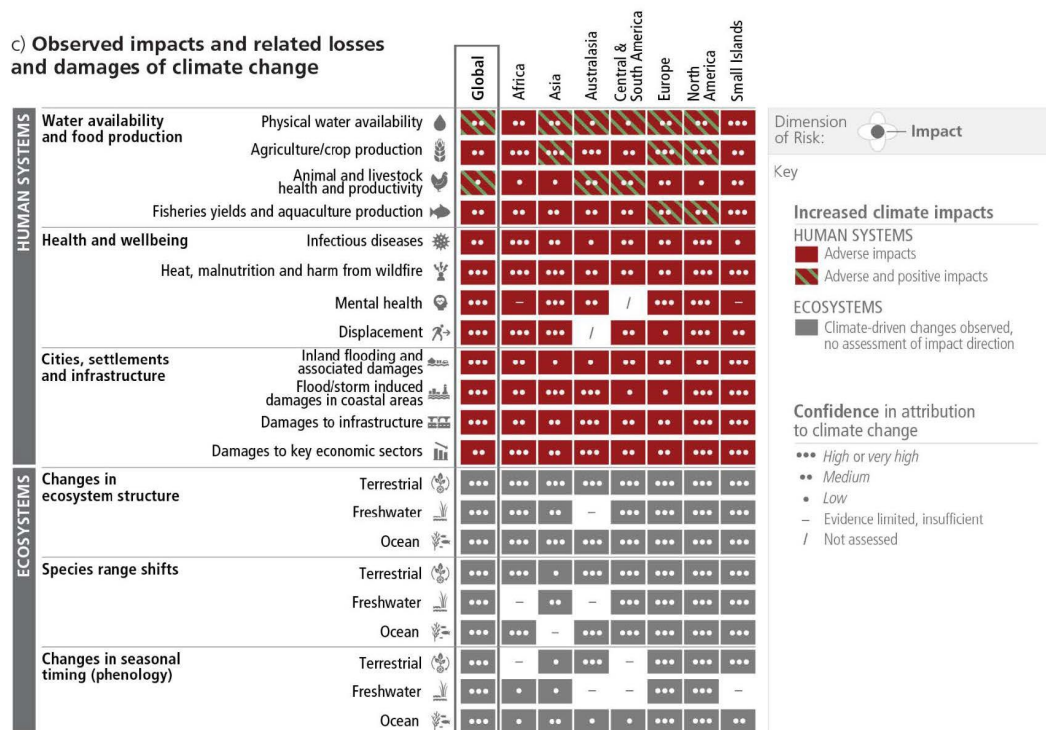


Figure 19 : Graphique évaluant les impacts du changement climatique sur les systèmes humains et les écosystèmes en fonction des différentes régions du monde. (source : © IPCC AR6 SYR Longer Report, Lee et al., 2023)

c) Les stratégies de réponses aux impacts du changement climatique : les adaptations et les atténuations

Pour limiter ces impacts sur les sociétés humaines et les écosystèmes, des actions d'adaptation et d'atténuation sont possibles. Elles sont réparties en cinq catégories : i) l'approvisionnement énergétique, ii) la terre, l'eau et la nourriture, iii) les habitats et les infrastructures, iv) la santé, v) la société, la vie quotidienne et l'économie (Figure 20) (Lee et al., 2023).

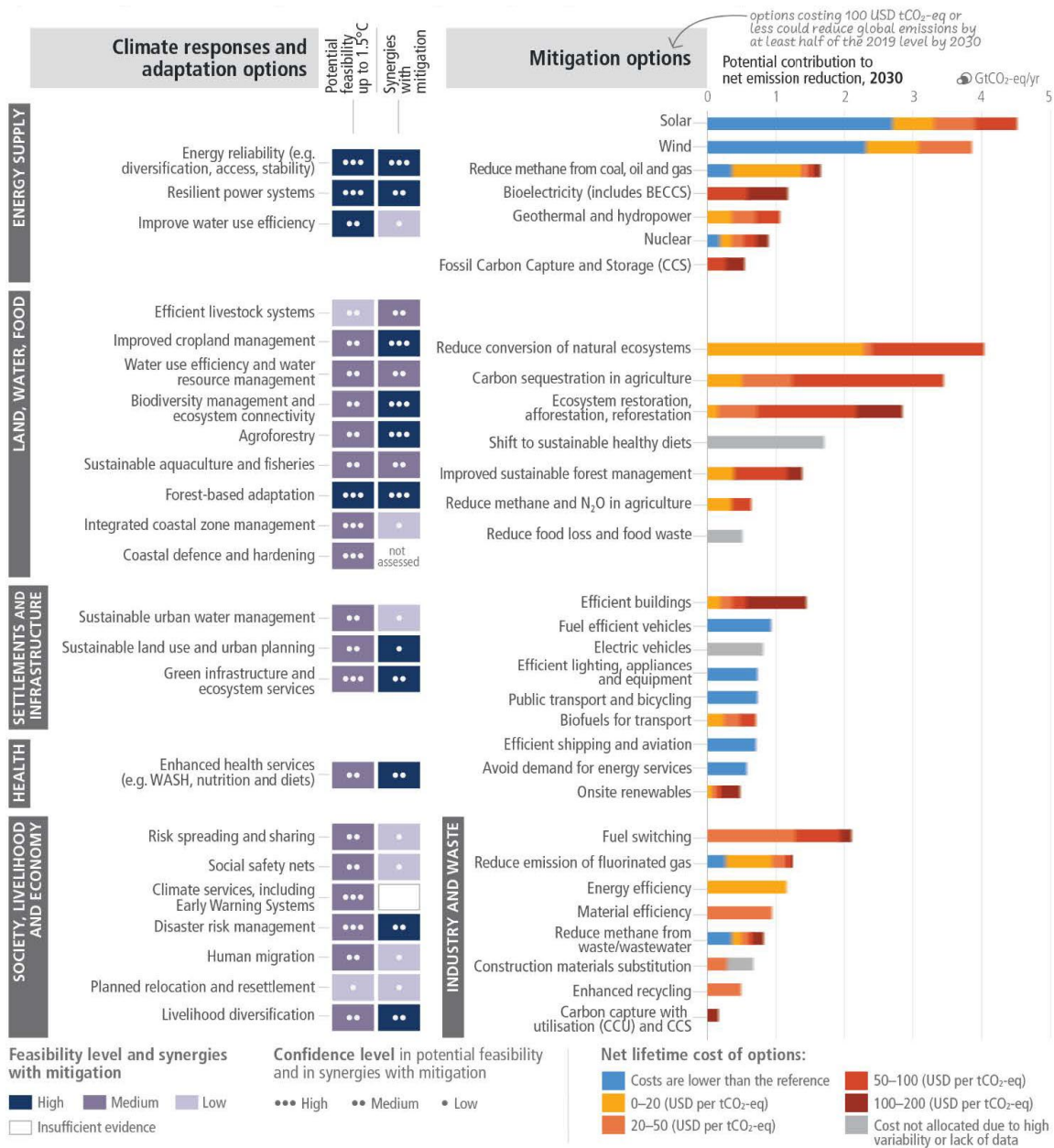


Figure 20 : Représentation schématique des différentes stratégies d'adaptation et d'atténuation des impacts liés au changement climatique. (source : © IPCC AR6 SYR Longer Report, Lee et al., 2023)

Pour ce qui concerne la terre, l'eau et la nourriture, plusieurs adaptations sont possibles : améliorer les systèmes d'élevage, améliorer la gestion des terres cultivées, améliorer l'utilisation de l'eau, améliorer le management de la biodiversité et de la connectivité des paysages, développer l'agroforesterie, développer des systèmes d'aquaculture et de pêche durable, améliorer l'adaptation des systèmes forestiers, développer le management et la protection des zones côtières (Lee et al., 2023).

d) Les scénarios de l'évolution du climat

Afin d'évaluer l'impact de l'évolution du climat futur, les scientifiques ont identifié quatre profils de l'évolution de la concentration en gaz à effet de serre. Ces trajectoires, définies comme RCP (Representative Concentration Pathways) permettent d'anticiper les impacts du climat futur : RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 et RCP 8.5 (Figure 21) (Lee et al., 2023).

- RCP 2.6 est le scénario le plus optimiste consistant à limiter drastiquement les émissions de GES afin de respecter l'accord de Paris. L'objectif de ce scénario est de limiter le réchauffement à 1.5°C ;
- RCP 4.5 est un scénario intermédiaire consistant à limiter les émissions de GES à un niveau faible avant la fin du XXI^e siècle. L'objectif de ce scénario est de limiter le réchauffement à 2°C ;
- RCP 6.0 est un scénario consistant à limiter les émissions de GES à un niveau modéré avant la fin du XXI^e siècle. L'objectif de ce scénario est de limiter le réchauffement à 3°C.
- RCP 8.5 est le scénario le plus pessimiste, où les GES continuent d'augmenter au rythme actuel. Dans ce scénario, l'augmentation des températures sera supérieure à 4°C.

Les économistes et les sociologues ont développé un autre indicateur associé au RPC, le SSP (Shared Socioeconomic Pathways). Cet indicateur tient compte du développement socio-économique et des stratégies d'adaptation et d'atténuation (Lee et al., 2023).

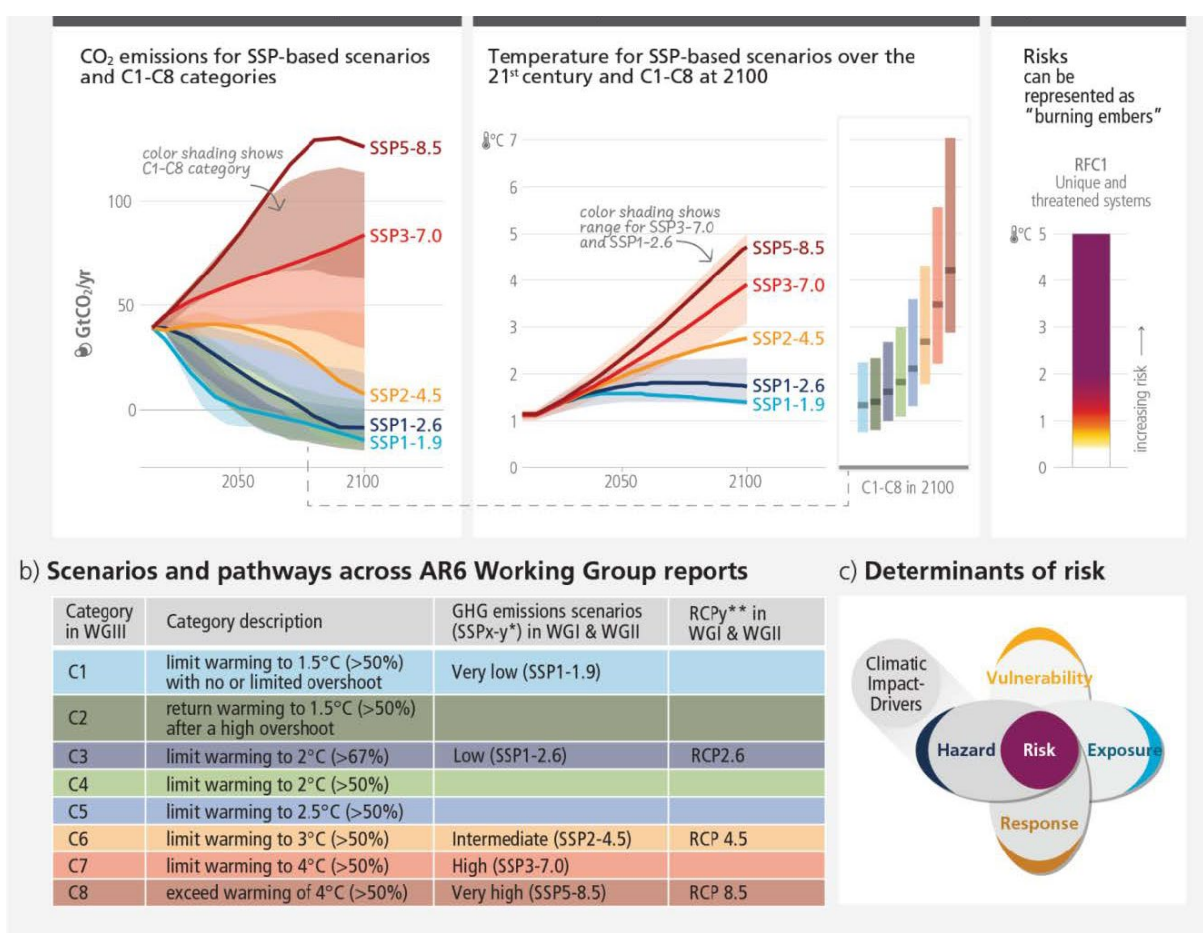


Figure 21 : Représentation schématique des scénarios d'évolution de la dynamique d'émission en CO₂ et de la température. (source : © IPCC AR6 SYR Longer Report, Lee et al., 2023)

e) Focus du changement climatique sur la région méditerranéenne et sur les systèmes oléicoles

La région méditerranéenne est connue pour sa flore et sa faune autochtones, mais elle fait face à plusieurs impacts environnementaux (Ali et al., 2022) :

- Les vagues de chaleur sont de plus en plus fréquentes, ce qui entraîne une augmentation de la mortalité et de la morbidité, ainsi qu'une hausse de la consommation d'énergie.
- Les inondations, tant pluviales que fluviales, sont plus fréquentes et sont souvent causées par une utilisation des terres inappropriée, une exploitation excessive des eaux souterraines, une urbanisation mal gérée et une gestion insuffisante des risques d'inondation.
- La disponibilité et la qualité de l'eau sont également en baisse.
- Les incendies ont tendance à diminuer en Europe méditerranéenne grâce à de bonnes pratiques, malgré l'augmentation de la fréquence et de la sévérité de la sécheresse.
- Les inondations côtières et l'érosion sont en hausse en raison de l'élévation du niveau de la mer.
- Les écosystèmes marins et continentaux sont affectés, entraînant une perte de biodiversité et d'habitats.
- L'agriculture et la viticulture sont également affectées par ces changements environnementaux, entraînant une baisse de rendement.

De ce fait, le réchauffement climatique dans la zone méditerranéenne aura des répercussions sur l'agriculture, notamment en diminuant le ruissellement et les flux d'eau, ce qui réduira la recharge des nappes phréatiques et l'eau disponible dans les réserves. La gestion de l'eau pour l'irrigation des cultures sera ainsi impactée, avec également une diminution du débit des cours d'eau et une augmentation de la température de l'eau (Andrew and Sauquet, 2017; Koutroulis et al., 2016; Trambly et al., 2020; Yeste et al., 2021). Les fortes températures affecteront la phénologie des cultures (Fraga et al., 2019; Gordo and Sanz, 2010; Villalobos et al., 2006), entraînant une baisse de leur rendement. De plus, bien que la disponibilité de l'eau se raréfie, les cultures auront besoin de plus d'eau à cause de l'augmentation des températures moyennes, tandis que l'augmentation du taux de CO₂ stimulera la photosynthèse (Biel et al., 2008; Kheir et al., 2019).

Les conséquences du changement climatique ne sont pas sans impact sur les oliveraies de la zone méditerranéenne. La phénologie de ces arbres fruitiers sera affectée, tandis que des épisodes de températures extrêmes pourraient gravement réduire leur production. En outre, les rendements des oliveraies diminueront considérablement, avec une chute attendue de 20 % en cas d'augmentation de 2°C dans les pays du nord de la Méditerranée, et de 15 à 65 % pour des systèmes non irrigués en Algérie, en cas d'augmentation de 3°C (Bouregaa, 2019; Brilli et al., 2019; Fraga et al., 2020).

D) Une analyse SWOT sur la filière oléicole française

Une analyse SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats) est un outil de planification qui permet de visualiser les forces, les faiblesses, les opportunités et les menaces d'un système de culture. L'acronyme français équivalent AFOM (Atout, Faiblesse, Opportunité, Menace) peut également être retrouvé dans la littérature. L'analyse SWOT (ou AFOM) se caractérise par quatre composantes :

- Forces (Strengths) : caractéristiques propres du système de culture, principalement définies par ses avantages ;
- Faiblesses (Weaknesses) : caractéristiques propres du système de culture, principalement définies par ses inconvénients ;
- Opportunités (Opportunities) : facteurs externes au système de culture qui peuvent être utilisés pour augmenter la performance du système ;
- Menaces (Threats) : facteurs externes au système de culture qui peuvent entraver les performances du système.

Afin de décrire les trois principaux systèmes oléicoles mentionnés plus haut : extensif, semi intensif et intensif (Figure 7), des analyses SWOT ont été effectuées pour chacun d'entre eux (Tableau I, Tableau II et Tableau III).

Tableau I : Analyse SWOT pour des systèmes oléicoles traditionnels

Forces (Strengths)	Faiblesses (Weaknesses)
--------------------	-------------------------

<ul style="list-style-type: none"> ○ AOP / AOC ○ Pas besoin d'irrigation ○ Pas besoin de fertilisation ○ Pas besoin de pesticides ○ Aménagement du paysage ○ Capacité de diversification du système ○ Possible utilisation du biocontrôle ○ Passage à l'agriculture raisonnée ○ Outils pour diminuer l'utilisation de pesticides ○ Agriculture biologique 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Irrégularité de production ○ Faible productivité ○ Besoin de labour ○ Erosion des sols ○ Perte de fertilité des sols ○ Exploitations de petites et moyennes tailles
<p style="text-align: center;">Opportunités (Opportunities)</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Marché de diversification ○ Soutient de la Commission européenne et d'autres organismes publics pour l'agriculture biologique ○ Consommateurs soucieux de la sécurité alimentaire et des modes de productions ○ Augmentation de la demande en huile 	<p style="text-align: center;">Menaces (Threats)</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Perte de biodiversité ○ Interdiction du glyphosate ○ Diminution des ressources hydriques ○ Impacts du changement climatique

Tableau II : Analyse SWOT pour des systèmes oléicoles semi-intensifs

<p style="text-align: center;">Forces (Strengths)</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Productivité ○ Mécanisation de pratiques culturales ○ AOP/AOC ○ Capacité de diversification ○ Possible utilisation du biocontrôle ○ Passage à l'agriculture raisonnée ○ Agriculture biologique ○ Outils pour diminuer l'utilisation de pesticides ○ Aménagement du paysage 	<p style="text-align: center;">Faiblesses (Weaknesses)</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Utilisation de pesticides ○ Besoin en irrigation ○ Besoin en fertilisation ○ Irrégularité de production ○ Besoin de labour ○ Erosion des sols ○ Perte de fertilité des sols ○ Exploitations de petites et moyennes tailles ○ Difficile de trouver des intrants abordables
<p style="text-align: center;">Opportunités (Opportunities)</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Marché de diversification ○ Soutient de la Commission européenne et d'autres organismes publics pour l'agriculture biologique ○ Consommateurs soucieux de la sécurité alimentaire et des modes de productions ○ Augmentation de la demande en huile 	<p style="text-align: center;">Menaces (Threats)</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Perte de biodiversité ○ Interdiction du glyphosate ○ Diminution des ressources hydriques ○ Impacts du changement climatique

Tableau III : Analyse SWOT pour des systèmes oléicoles intensifs

<p style="text-align: center;">Forces (Strengths)</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Productivité importante ○ Mécanisation de pratiques culturales ○ AOP/AOC ○ Capacité de diversification limitée ○ Possible utilisation du biocontrôle ○ Passage à l'agriculture raisonnée ○ Agriculture biologique ○ Outils pour diminuer l'utilisation de pesticides ○ Aménagement du paysage 	<p style="text-align: center;">Faiblesses (Weaknesses)</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Utilisation de pesticides ○ Besoin en irrigation ○ Besoin en fertilisation ○ Irrégularité de production ○ Besoin de labour ○ Erosion des sols ○ Perte de fertilité des sols ○ Difficile de trouver des intrants abordables
<p style="text-align: center;">Opportunités (Opportunities)</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Marché de diversification ○ Soutient de la Commission européenne et d'autres organismes publics pour l'agriculture biologique ○ Consommateurs soucieux de la sécurité alimentaire et des modes de productions ○ Augmentation de la demande en huile 	<p style="text-align: center;">Menaces (Threats)</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Perte de biodiversité ○ Interdiction du glyphosate ○ Diminution des ressources hydriques ○ Impacts du changement climatique

Les trois systèmes oléicoles présentent des avantages, faiblesses, opportunités et menaces similaires. Cependant, ils se distinguent principalement par leur niveau de productivité, leur mécanisation des pratiques culturales, leur utilisation de pesticides et leur besoin en irrigation et fertilisation.

Le système oléicole traditionnel est le plus respectueux de l'environnement, car il ne nécessite pas d'irrigation, de fertilisation et de pesticides. Cependant, sa faible productivité et l'irrégularité de production sont des inconvénients importants. Il a également des opportunités intéressantes, notamment la diversification du système et la valorisation des produits en AOP (Appellation d'Origine Protégée) / AOC (Appellation d'Origine Contrôlée) (Tableau I).

Le système oléicole semi-intensif offre une productivité plus élevée et une possible mécanisation des pratiques culturales. En revanche, ce système nécessite des pesticides, des stratégies d'irrigation et de fertilisation, ce qui peut avoir des conséquences négatives sur l'environnement. Cependant, il peut également bénéficier de la diversification du système et de la valorisation des produits en AOP / AOC.

Le système oléicole intensif offre une productivité maximale grâce à la mécanisation de certaines pratiques culturales, mais il est le plus polluant des trois, nécessitant des pesticides, des stratégies d'irrigation et de fertilisation importantes, ce qui peut entraîner une perte de fertilité des sols et des impacts environnementaux négatifs. Il a également une capacité de diversification limitée.

En résumé, le système oléicole traditionnel est le plus respectueux de l'environnement, mais il a une faible productivité, tandis que le système oléicole intensif offre une productivité élevée, mais avec des conséquences environnementales négatives. Le système oléicole semi-intensif se situe entre les deux, offrant une productivité plus élevée tout en ayant des impacts environnementaux limités, mais il nécessite une utilisation de pesticides, une irrigation et une fertilisation. Les opportunités et menaces pour les trois systèmes sont similaires et liées à l'évolution de la demande en huile, à la perte de biodiversité, à l'interdiction du glyphosate, à la diminution des ressources hydriques et aux impacts du changement climatique. Ces trois analyses démontrent une opportunité de diversification, notamment pour les systèmes oléicoles traditionnels et semi-intensifs.

3) La problématique et les solutions envisagées

A) La problématique et l'axe de la thèse

Les changements récents dans les systèmes de culture de l'olivier soulèvent des questions sur les performances agronomiques, environnementales et économiques des oliveraies, tant dans les conditions climatiques actuelles que futures. Ainsi, l'analyse SWOT a révélé une opportunité de diversification des systèmes de culture de l'olivier. Cette diversification pourrait contribuer à relever les défis agronomiques, environnementaux et économiques actuels et futurs.

Dans ce contexte, la problématique de recherche porte sur les performances agronomiques et environnementales des systèmes agroforestiers à base d'oliviers. Les systèmes agroforestiers à base d'oliviers peuvent-ils à la fois améliorer les performances environnementales des oliveraies (en termes de gestion de l'eau, de pertes d'azote, de l'érosion des sols, du stockage du carbone, etc.) et maintenir les performances agronomiques (rendement) ?

Cette problématique est cruciale pour mieux comprendre les avantages et les défis des systèmes agroforestiers à base d'oliviers et pour déterminer s'ils peuvent représenter une solution durable pour l'avenir de la filière oléicole.

Il est important de noter que les enjeux socio-économiques ne seront pas abordés dans le cadre de cette thèse.

B) L'agroforesterie comme solution envisagée

a) Définition et présentation du contexte

Une des solutions à la dégradation de l'environnement et à la perte de diversité peut être l'agroforesterie (Daoui and Fatemi, 2014; Matson et al., 1997). Ce terme est défini comme un ensemble de pratiques agricoles qui combinent des arbres avec des cultures et/ou du bétail (den Herder et al., 2017; European Commission, 2023; USDA Agroforestry Strategic Framework, 2019). L'agroforesterie peut optimiser la production par unité de surface, en augmentant le rendement total du système (produits des arbres et des cultures) jusqu'à 30 % par rapport à la rotation des parcelles agricoles d'un côté et la reforestation d'une parcelle agricole de l'autre (Dupraz and Liagre, 2011). Cette optimisation repose sur une meilleure connaissance et maîtrise de trois mécanismes spécifiques : la compétition, la complémentarité et la facilitation (Dupraz and Liagre, 2011; Jose et al., 2000). Par exemple, l'association d'espèces annuelles ou pluriannuelles peut être complémentaire aux arbres, si les niches écologiques sont différentes. En conséquence, ces espèces n'auront pas les mêmes besoins, en termes de nature des ressources et de leur emplacement spatial et/ou temporel (Ong et al., 2014, 1998). Ces espèces sont appelées "complémentaires" et exploitent les ressources de l'environnement de manière plus efficace qu'une monoculture. Dans certains cas, l'une des espèces peut être considérée comme "facilitatrice", c'est-à-dire qu'elle modifie l'environnement de manière favorable à l'autre espèce, comme dans le cas des légumineuses pour leur contribution en azote (Bryan, 2000).

b) Avantages / inconvénients

Dans un système agroforestier, la diversité de la faune et de la flore peut fournir une multitude de services écosystémiques tels que la régulation du climat, la régulation des ravageurs, la pollinisation, la filtration de l'eau et la protection des sols contre l'érosion (Bentrup et al., 2019; De Stefano and Jacobson, 2018; Dupraz and Liagre, 2011; Jose et al., 2000; Shi et al., 2018) (Figure 22). Cependant, ces interactions peuvent également causer des disservices écosystémiques tels que la compétition pour les ressources, la prolifération de ravageurs ou de maladies et la contamination de l'environnement. Il est donc important de comprendre comment ces interactions fonctionnent et comment elles peuvent être gérées pour maximiser les bénéfices des services écosystémiques tout en minimisant les disservices (Feliciano et al., 2018; Santos et al., 2019; Shi et al., 2018; Torralba et al., 2016).

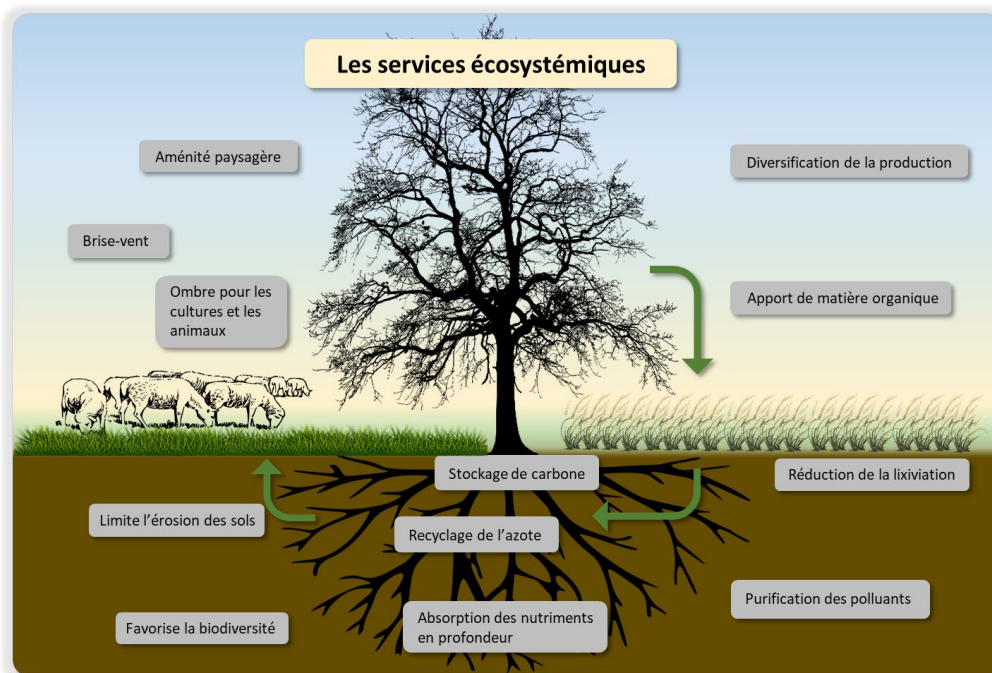


Figure 22 : Représentation schématique des services écosystémiques fournis par les systèmes agroforestiers. © N. Barbault

Au niveau des interactions aériennes, la modification du microclimat peut avoir à la fois des avantages et des inconvénients. L'ombre offerte par les arbres peut réduire la quantité de rayonnement lumineux reçue par les plantes sous-jacentes, limitant ainsi leur photosynthèse (Chirko et al., 1996). Cependant, elle peut également aider à réduire les stress causés par les températures élevées (Mitlöhner et al., 2001; Monteith et al., 1991). La modification de l'environnement dans un système agroforestier peut également avoir un impact sur la diversité et la fréquence des insectes présents (Plexida et al., 2018; Stamps and Linit, 1997; Vandermeer, 1989). La présence d'arbres peut offrir des habitats supplémentaires pour une grande variété d'insectes, notamment des pollinisateurs et des prédateurs naturels qui aident à contrôler les ravageurs (Bentrop et al., 2019; Bohada-Murillo et al., 2020; Jose, 2009; Jose et al., 2000; Staton et al., 2019).

Au niveau des interactions souterraines, les arbres et les cultures intercalaires ont des profondeurs et des systèmes racinaires différents, ce qui peut réduire la concurrence directe pour l'eau et les nutriments. Les arbres, avec leurs racines profondes, sont capables d'extraire de l'eau et des nutriments à des profondeurs que les cultures ne peuvent atteindre, tandis que les cultures, avec leurs systèmes racinaires plus superficiels, peuvent exploiter les nutriments dans les couches supérieures du sol. Les arbres, par l'absorption en profondeur de nutriments et le processus de sénescence des feuilles, contribuent à augmenter la disponibilité des ressources pour les cultures intercalaires (Basche and DeLonge, 2019; Dupraz and Liagre, 2011; Schroth, 1999). En outre, les mécanismes d'ascenseur hydraulique améliorent la disponibilité d'eau dans les couches supérieures du sol. Pendant la nuit, les arbres absorbent de l'eau en profondeur, qui est ensuite redistribuée dans les couches peu profondes du sol (Dawson, 1993; Fan et al., 2023). Cependant, l'allélopathie peut causer des problèmes, car des composés chimiques présents dans les plantes peuvent avoir un impact sur la germination, la croissance, le développement, la distribution et la reproduction de plusieurs espèces de plantes. La fixation d'azote par les bactéries (présentes sur les nodules des légumineuses) est un processus biologique important en agriculture durable. Les bactéries fixatrices d'azote, appelées rhizobiums, vivent en symbiose avec les racines des plantes hôtes (trèfle, soja, pois, haricots, etc.) (Jose et al., 2000; Querné et al., 2017).

Les systèmes agroforestiers présentent des avantages et inconvénients. Ces systèmes agroforestiers permettent une diversification de la production et contribuent également à l'aménité paysagère.

c) Les systèmes agroforestiers à base d'oliviers

Les systèmes agroforestiers existent depuis les débuts de l'agriculture. Dans la littérature, il est possible de retrouver des références mentionnant l'existence de systèmes mixant oliviers et d'autres cultures (Smith, 2010). Dans le Traité de l'Olivier rédigé en 1784 par Pierre Joseph Amoreux, des complantations d'oliviers et cultures intercalaires sont évoquées (Amoreux, 1784). D'autres complantations ont également existé, notamment vigne et olivier (Lasserre and Barbault, 2022; Rühl et al., 2011). L'article technique sur les complantations vigne – oliviers, publié dans le Nouvel Olivier, est disponible en annexe I.

Les systèmes agroforestiers à base d'oliviers sont déjà cultivés et combinent des oliviers avec des cultures (céréales, légumes, vignes, bulbes de fleurs, etc.) ou du bétail (moutons, poulets, etc.) (Lauri et al., 2019; Mantzanas et al., 2015; Pantera et al., 2018, 2016; Paris et al., 2019; Warlop, 2016) (Tableau IV) (Figure 23).

Tableau IV : Exemple de systèmes agroforestiers à base d'oliviers

Oliviers complantés avec d'autres cultures		Oliviers associés à des animaux	
Cultures	Exemples de la littérature	Espèces	Exemples de la littérature
Céréales	(Ben Zineb et al., 2022; Haddad et al., 2023; Mantzanas, 2016; Mantzanas et al., 2021; Temani et al., 2021)	Moutons	(Pantera et al., 2018; Rosati, 2016)
Vignes	(Favor, 2021; Rühl et al., 2011)	Chèvres	
Légumes	(Daoui and Fatemi, 2014; Leauthaud et al., 2022; Warlop, 2016)	Poules	
Légumineuses	(Amassaghrou et al., 2023; Ben Zineb et al., 2022; Mantzanas, 2016; Mantzanas et al., 2021)		
Asperges	(Mantovani, 2016; Rosati et al., 2017, 2009)		
Bulbes de fleurs	(Pantera et al., 2016)		
Fruitières	(Mantzanas, 2016; Pantera et al., 2016)		



Figure 23 : Photographie d'un système agroforestier : oliviers et céréales. © N. Barbault sur Unsplash

Pour répondre aux enjeux actuels des systèmes oléicoles, il est crucial de considérer différents types d'agencements spatiaux et temporels. Ces systèmes diversifiés peuvent inclure des espèces fruitières variées, d'autres cultures intercalaires annuelles ou pérennes, ainsi que des animaux, qui peuvent interagir de manière complémentaire ou synergique. Les espèces peuvent être complantées avec l'olivier ou plantées en décalage dans le temps pour maximiser les bénéfices.

Cependant, peu de données existent sur les performances à long terme de ces systèmes agroforestiers. Par conséquent, des évaluations approfondies doivent être réalisées sur les plans agronomique et environnemental pour déterminer leur viabilité et leur efficacité par rapport aux systèmes oléicoles traditionnels.

Sur le plan agronomique, il est primordial d'analyser le rendement des cultures tant sur la qualité que la quantité, les interactions entre les plantes, les besoins en eau et en nutriments, ainsi que les impacts sur l'écosystème de la parcelle. Il est également important de mesurer la productivité et la rentabilité économique de ces systèmes agroforestiers.

Sur le plan environnemental, il est essentiel d'évaluer les impacts sur le cycle de l'eau, de l'azote, du carbone, afin de déterminer l'impact écologique de ces systèmes.

En somme, il est nécessaire de tester et d'évaluer les différents systèmes agroforestiers à base d'oliviers pour déterminer leur potentiel à répondre aux enjeux actuels du secteur oléicole et à garantir une production alimentaire de qualité tout en respectant l'environnement.

Bibliographie du chapitre 1

Abdallah, S.B., Elfkhi, S., Suárez-Rey, E.M., Parra-López, C., Romero-Gámez, M., 2021. Evaluation of the environmental sustainability in the olive growing systems in Tunisia. *J. Clean. Prod.* 282, 124526. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124526>

Afidol, 2016. Olives et Huiles d'Olive en France [WWW Document]. FranceOlive. URL <https://afidol.org/wp-content/uploads/2015/03/Market-Olea-23-Olives-et-huiles-d-olive-en-France.pdf>

- Aguilera, F., Ruiz, L., Fornaciari, M., Romano, B., Galán, C., Oteros, J., Ben Dhiab, A., Msallem, M., Orlandi, F., 2014. Heat accumulation period in the Mediterranean region: phenological response of the olive in different climate areas (Spain, Italy and Tunisia). *Int. J. Biometeorol.* 58, 867–876. <https://doi.org/10.1007/s00484-013-0666-7>
- Ali, E., Cramer, W., Carnicer, J., Georgopoulou, E., Hilmi, N.J.M., Le Cozannet, G., Lionello, P., 2022. Cross-Chapter Paper 4: Mediterranean Region Supplementary Material. *Clim. Change 2022 Impacts Adapt. Vulnerability Supplementary Material*.
- Amassaghrou, A., Barkaoui, K., Bouaziz, A., Alaoui, S.B., Fatemi, Z.E.A., Daoui, K., 2023. Yield and related traits of three legume crops grown in olive-based agroforestry under an intense drought in the South Mediterranean. *Saudi J. Biol. Sci.* 30, 103597. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2023.103597>
- Amoreux, P.J., 1784. *Traité de l'olivier: contenant l'histoire & la culture de cet arbre, les différentes manières d'exprimer l'huile d'olive, celles de la conserver, &c.* Chez la Veuve Gontier.
- Andrew, J.T., Sauquet, E., 2017. Climate change impacts and water management adaptation in two mediterranean-climate watersheds: learning from the Durance and Sacramento Rivers. *Water* 9, 126. <https://doi.org/10.3390/w9020126>
- Angelopoulos, K., Dichio, B., Xiloyannis, C., 1996. Inhibition of photosynthesis in olive trees (*Olea europaea* L.) during water stress and rewatering. *J. Exp. Bot.* 47, 1093–1100. <https://doi.org/10.1093/jxb/47.8.1093>
- Arnan, X., López, B.C., Martínez-Vilalta, J., Estorach, M., Poyatos, R., 2012. The age of monumental olive trees (*Olea europaea*) in northeastern Spain. *Dendrochronologia* 30, 11–14. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2011.02.002>
- Avelin, C., 2022. *Marché de l'huile d'olive Monde, Europe, France - Campagne 2020-2021*.
- Barranco, D., Navero, D.B., Romero, L.R., 2008. *El cultivo del olivo*. Mundi-Prensa.
- Bartolini, G., Prevost, G., Messeri, C., Carignani, G., 1998. Olive germplasm: cultivars and world-wide collections.
- Basche, A.D., DeLonge, M.S., 2019. Comparing infiltration rates in soils managed with conventional and alternative farming methods: A meta-analysis. *PLoS One* 14, e0215702.
- Beaufoy, G., 2001. EU Policies for olive farming-Unsustainable on all Counts. [Httpwww Wwf Org Ukfilelibrarypdfoliveoil Pdf](http://www.Wwf.Org/Ukfilelibrary/pdf/oliveoil.Pdf).
- Ben Zineb, A., Barkaoui, K., Karray, F., Mhiri, N., Sayadi, S., Mliki, A., Gargouri, M., 2022. Olive agroforestry shapes rhizosphere microbiome networks associated with annual crops and impacts the biomass production under low-rainfed conditions. *Front. Microbiol.* 13, 977797. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.977797>
- Benlloch-González, M., Sánchez-Lucas, R., Benlloch, M., Ricardo, F.-E., 2018. An approach to global warming effects on flowering and fruit set of olive trees growing under field conditions. *Sci. Hortic.* 240, 405–410. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.06.054>
- Bentrup, G., Hopwood, J., Adamson, N.L., Vaughan, M., 2019. Temperate Agroforestry Systems and Insect Pollinators: A Review. *Forests* 10, 981. <https://doi.org/10.3390/f10110981>
- Bernabei, M., 2015. The age of the olive trees in the Garden of Gethsemane. *J. Archaeol. Sci.* 53, 43–48. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2014.10.011>
- Biel, C., De Herralde, F., Save, R., Evans, R., 2008. Effects of CO₂ atmospheric fertilization on greenhouse production of olive trees (*Olea europaea* L.'Arbequina'). *Eur. J. Hortic. Sci.* 73, 227.
- Bohada-Murillo, M., Castaño-Villa, G.J., Fonturbel, F.E., 2020. The effects of forestry and agroforestry plantations on bird diversity: A global synthesis. *Land Degrad. Dev.* 31, 646–654. <https://doi.org/10.1002/ldr.3478>
- Bonnemort, C., Agogue, C., Chambre d'Agriculture de l'Aude, 2008. Fiche Olive pour Huile [WWW Document]. URL https://occitanie.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Occitanie/076_Inst-Occitanie/Documents/Productions_techniques/Agriculture_biologique/Espace_ressource_bio/ITK-OliveHuileLR-2008.pdf.

- Bonofiglio, T., Orlandi, F., Sgromo, C., Romano, B., Fornaciari, M., 2008. Influence of temperature and rainfall on timing of olive (*Olea europaea*) flowering in southern Italy. *N. Z. J. Crop Hortic. Sci.* 36, 59–69. <https://doi.org/10.1080/01140670809510221>
- Bouregaa, T., 2019. Impact of climate change on yield and water requirement of rainfed crops in the Setif region. *Manag. Environ. Qual. Int. J.* 30, 851–863. <https://doi.org/10.1108/MEQ-06-2018-0110>
- Breton, C., Médail, F., Pinatel, C., Bervillé, A., 2006. De l'olivier à l'oléastre : origine et domestication de l'*Olea europaea* L. dans le Bassin méditerranéen. *Cah. Agric. EDP Sci.* 15, 9.
- Brilli, L., Lugato, E., Moriondo, M., Gioli, B., Toscano, P., Zaldei, A., Leolini, L., Cantini, C., Caruso, G., Gucci, R., Merante, P., Dibari, C., Ferrise, R., Bindi, M., Costafreda-Aumedes, S., 2019. Carbon sequestration capacity and productivity responses of Mediterranean olive groves under future climates and management options. *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Change* 24, 467–491. <https://doi.org/10.1007/s11027-018-9824-x>
- Bryan, J., 2000. Nitrogen-fixing Leguminous trees and shrubs: a basic resource of agroforestry. *Silvic. Basis Agrofor. Syst.*
- Cárdenas, M., Pascual, F., Campos, M., Pekár, S., 2015. The spider assemblage of olive groves under three management systems. *Environ. Entomol.* 44, 509–518. <https://doi.org/10.1093/ee/nvv030>
- Carpio, A.J., Oteros, J., Tortosa, F.S., Guerrero-Casado, J., 2016. Land use and biodiversity patterns of the herpetofauna: The role of olive groves. *Acta Oecologica* 70, 103–111. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2015.12.007>
- Centre technique de l'olivier, 2015. Protection raisonnée et biologique des oliviers.
- Chirko, C.P., Gold, M.A., Nguyen, P.V., Jiang, J., 1996. Influence of direction and distance from trees on wheat yield and photosynthetic photon flux density (Qp) in a Paulownia and wheat intercropping system. *For. Ecol. Manag.* 83, 171–180. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(96\)03721-8](https://doi.org/10.1016/0378-1127(96)03721-8)
- Conseil Oléicole International, 2022. Olives de tables - Table olives.
- Cornara, D., Saponari, M., Zeilinger, A.R., de Stradis, A., Boscia, D., Loconsole, G., Bosco, D., Martelli, G.P., Almeida, R.P., Porcelli, F., 2017. Spittlebugs as vectors of *Xylella fastidiosa* in olive orchards in Italy. *J. Pest Sci.* 90, 521–530. <https://doi.org/10.1007/s10340-016-0793-0>
- Covas, M.-I., Konstantinidou, V., Fitó, M., 2009. Olive Oil and Cardiovascular Health. *J. Cardiovasc. Pharmacol.* 54, 477–482. <https://doi.org/10.1097/FJC.0b013e3181c5e7fd>
- Covas, M.-I., Ruiz-Gutiérrez, V., Torre, R., Kafatos, A., Lamuela-Raventós, R.M., Osada, J., Owen, R.W., Visioli, F., 2006. Minor Components of Olive Oil: Evidence to Date of Health Benefits in Humans. *Nutr. Rev.* 64, S20–S30. <https://doi.org/10.1111/j.1753-4887.2006.tb00260.x>
- Daoui, K., Fatemi, Z.E.A., 2014. Agroforestry systems in Morocco: the case of olive tree and annual crops association in Saïs region. *Sci. Policy Polit. Mod. Agric. Syst. Glob. Context Local Dyn. Sustain. Agric.* 281–289. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7957-0_19
- Dawson, T.E., 1993. Hydraulic lift and water use by plants: implications for water balance, performance and plant-plant interactions. *Oecologia* 95, 565–574. <https://doi.org/10.1007/BF00317442>
- De Stefano, A., Jacobson, M.G., 2018. Soil carbon sequestration in agroforestry systems: a meta-analysis. *Agrofor. Syst.* 92, 285–299. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0147-9>
- den Herder, M., Moreno, G., Mosquera-Losada, R.M., Palma, J.H.N., Sidiropoulou, A., Santiago Freijanes, J.J., Crous-Duran, J., Paulo, J.A., Tomé, M., Pantera, A., Papanastasis, V.P., Mantzanas, K., Pachana, P., Papadopoulos, A., Plieninger, T., Burgess, P.J., 2017. Current extent and stratification of agroforestry in the European Union. *Agric. Ecosyst. Environ.* 241, 121–132. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.03.005>
- Dupraz, C., Liagre, F., 2011. Agroforesterie. Des arbres et des cultures., France Agricole. ed, Agriproduction.
- Elloumi, O., Ghrab, M., Ben Mimoun, M., 2009. Responses of olive trees (cv. Chemlali) after five years of experiment to potassium mineral nutrition under rainfed condition. *UC Davis Dep. Plant Sci.*

- Ellstrand, N.C., 2003. Dangerous liaisons?: when cultivated plants mate with their wild relatives. JHU Press.
- European Commission, 2023. Agroforestry GENERAL Fiche.
- Fabbri, A., Benelli, C., 2000. Review Article Flower bud induction and differentiation in olive. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 75, 131–141. <https://doi.org/10.1080/14620316.2000.11511212>
- Fan, X., Hao, X., Zhang, S., Zhao, Z., Zhang, J., Li, Y., 2023. *Populus euphratica* counteracts drought stress through the dew coupling and root hydraulic redistribution processes. *Ann. Bot.* 131, 451–461. <https://doi.org/10.1093/aob/mcac159>
- Farhan, N., Al-Maleki, A.R., Sarih, N.M., Yahya, R., Shebl, M., 2023. Therapeutic importance of chemical compounds in extra virgin olive oil and their relationship to biological indicators: A narrative review and literature update. *Food Biosci.* 102372. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102372>
- Favor, K., 2021. Interspecific Interactions between Olive Trees and Grapevines in Vineyard Agroforestry Systems in an Arid Climate Region. Missouri, Missouri.
- Feliciano, D., Ledo, A., Hillier, J., Nayak, D.R., 2018. Which agroforestry options give the greatest soil and above ground carbon benefits in different world regions? *Agric. Ecosyst. Environ.* 254, 117–129. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.11.032>
- Fernández-Escobar, R., Gil-Ribes, J.A., Quesada-Moraga, E., Trapero, A., Msallem, M., 2013. Evolution and sustainability of the olive production systems.
- Fierro, A., Liccardo, A., Porcelli, F., 2019. A lattice model to manage the vector and the infection of the *Xylella fastidiosa* on olive trees. *Sci. Rep.* 9, 8723. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44997-4>
- Forster, P.M., Smith, C.J., Walsh, T., Lamb, W.F., Lamboll, R., Hauser, M., Ribes, A., Rosen, D., Gillett, N., Palmer, M.D., 2023. Indicators of Global Climate Change 2022: annual update of large-scale indicators of the state of the climate system and human influence. *Earth Syst. Sci. Data* 15, 2295–2327. <https://doi.org/10.5194/essd-15-2295-2023>
- Fraga, H., Pinto, J.G., Santos, J.A., 2019. Climate change projections for chilling and heat forcing conditions in European vineyards and olive orchards: A multi-model assessment. *Clim. Change* 152, 179–193. <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2337-5>
- Fraga, H., Pinto, J.G., Viola, F., Santos, J.A., 2020. Climate change projections for olive yields in the Mediterranean Basin. *Int. J. Climatol.* 40, 769–781. <https://doi.org/10.1002/joc.6237>
- France Bleu Gard Lozère, 2016. Février 1956, dans le Gard les oliviers pleurent. Fr. Bleu Gard Lozère.
- FranceAgriMer, 2021. Oléiculture [WWW Document]. URL <https://www.franceagrimer.fr/Mediatheque/INSTITUTIONNEL/PUBLICATIONS/ETABLISSEMENT/2021/Les-fiches-de-FranceAgriMer-2021/Fiche-filiere-Oleiculture>.
- FranceAgriMer, 2020. Oléiculture [WWW Document]. URL <https://www.franceagrimer.fr/content/download/63221/document/FICHE%20FILIERE%20OLEICULTURE.pdf>.
- FranceOlive, 2021. Cahier de l'oléiculteur. FranceOlive.
- Gabaldón-Leal, C., Ruiz-Ramos, M., de la Rosa, R., León, L., Belaj, A., Rodríguez, A., Santos, C., Lorite, I.J., 2017. Impact of changes in mean and extreme temperatures caused by climate change on olive flowering in southern Spain. *Int. J. Climatol.* 37, 940–957. <https://doi.org/10.1002/joc.5048>
- García-Ruiz, R., Ochoa, V., Vinegla, B., Hinojosa, M., Pena-Santiago, R., Liébanas, G., Linares, J., Carreira, J., 2009. Soil enzymes, nematode community and selected physico-chemical properties as soil quality indicators in organic and conventional olive oil farming: Influence of seasonality and site features. *Appl. Soil Ecol.* 41, 305–314. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2008.12.004>
- Gharabi, D., 2018. Effet du stress salin sur le comportement physiologique et morfo-biochimique de jeunes plants de variétés d'olivier cultivé (*Olea-europea*) locales et introduites non greffés et greffés sur oléastre ". djillali liabes de sidi bel abbes.

- Gkisakis, V., Volakakis, N., Kollaros, D., Bārberi, P., Kabourakis, E.M., 2016. Soil arthropod community in the olive agroecosystem: Determined by environment and farming practices in different management systems and agroecological zones. *Agric. Ecosyst. Environ.* 218, 178–189. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.11.026>
- Gómez, J., Infante-Amate, J., de Molina, M., Vanwalleghem, T., Taguas, E., Lorite, I., 2014. Olive Cultivation, its Impact on Soil Erosion and its Progression into Yield Impacts in Southern Spain in the Past as a Key to a Future of Increasing Climate Uncertainty. *Agriculture* 4, 170–198. <https://doi.org/10.3390/agriculture4020170>
- Gómez, J.A., Álvarez, S., Soriano, M.-A., 2009. Development of a soil degradation assessment tool for organic olive groves in southern Spain. *CATENA* 79, 9–17. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2009.05.002>
- Gómez-del-Campo, M., Barranco, D., 2005. Field evaluation of frost tolerance in 10 olive cultivars. *Plant Genet. Resour.* 3, 385–390. <https://doi.org/10.1079/PGR200592>
- Gomez-Limon, J.A., Riesgo, L., 2010. Sustainability assessment of olive grove in Andalusia: A methodological proposal.
- Gordo, O., Sanz, J.J., 2010. Impact of climate change on plant phenology in Mediterranean ecosystems. *Glob. Change Biol.* 16, 1082–1106. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02084.x>
- Griggs, W.H., Hartmann, H., Bradley, M.V., Iwakiri, B., Whisler, J., 1975. Olive pollination in California. *Bull. Calif. Agric. Exp. Stn.*
- Haber, G., Mifsud, D., 2007. Pests and diseases associated with olive trees in the Maltese Islands (Central Mediterranean). *Cent. Mediterr. Nat.* 4, 143–161.
- Haddad, B., Lambarraa-Lehnhardt, F., Bouras, F.-Z., Kherif, O., Zemmouri, B., Seghouani, M., Guetaf, F., Ferhat, M., Latati, M., 2023. Comparative assessment of agroforestry performances between pea and barley intercropping with olive tree under semi-arid Mediterranean conditions. *Res. Sq.* <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3167796/v1>
- Hartmann, H., 1953. Effect of winter chilling on fruitfulness and vegetative growth in the olive. Presented at the Proc. Amer. Soc. Hort. Sci, pp. 184–190.
- Hopkins, D., Purcell, A., 2002. *Xylella fastidiosa*: cause of Pierce's disease of grapevine and other emergent diseases. *Plant Dis.* 86, 1056–1066. <https://doi.org/10.1094/PDIS.2002.86.10.1056>
- Horn, R., Domżzał, H., Słowińska-Jurkiewicz, A., Van Ouwerkerk, C., 1995. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. *Soil Tillage Res.* 35, 23–36. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(95\)00479-C](https://doi.org/10.1016/0167-1987(95)00479-C)
- Jose, S., 2009. Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. *Agrofor. Syst.* 76, 1–10. <https://doi.org/10.1007/s10457-009-9229-7>
- Jose, S., Gillespie, A., Seifert, J., Biehle, D., 2000. Defining competition vectors in a temperate alley cropping system in the midwestern USA: 2. Competition for water. *Agrofor. Syst.* 48, 41–59. <https://doi.org/10.1023/A:1006289322392>
- Kheir, A.M., El Baroudy, A., Aiad, M.A., Zoghdan, M.G., Abd El-Aziz, M.A., Ali, M.G., Fullen, M.A., 2019. Impacts of rising temperature, carbon dioxide concentration and sea level on wheat production in North Nile delta. *Sci. Total Environ.* 651, 3161–3173. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.209>
- Koubouris, G.C., Metzidakis, I.T., Vasilakakis, M.D., 2009. Impact of temperature on olive (*Olea europaea* L.) pollen performance in relation to relative humidity and genotype. *Environ. Exp. Bot.* 67, 209–214. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.06.002>
- Koutroulis, A., Grillakis, M., Daliakopoulos, I., Tsanis, I., Jacob, D., 2016. Cross sectoral impacts on water availability at + 2 C and + 3 C for east Mediterranean island states: The case of Crete. *J. Hydrol.* 532, 16–28. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.11.015>
- Lasserre, H., Barbault, N., 2022. Complantations à base d'oliviers: un exemple de système agroforestier. *Nouv. Oliv.* 129, 34–30.

- Lauri, P.-É., Barkaoui, K., Ater, M., Rosati, A., 2019. Agroforestry for fruit trees in Europe and Mediterranean North Africa, in: Burleigh Dodds Series in Agricultural Science. Burleigh Dodds Science Publishing, pp. 385–418. <https://doi.org/10.19103/AS.2018.0041.18>
- Lauri, P.-É., Moutier, N., Garcia, G., 1998. Architecture et conduite de l'olivier (*Olea europaea* L.) – repères bibliographiques et perspectives de recherche. *11^{ème} Colloque INRA-Ctifl sur les Recherches Fruitières : Architecture et Modélisation en Arboriculture Fruitière. Montpellier (France) 5-6 mars 1998*, pp 133-141.
- Lavee, S., Nir, G., 1986. Grape. In 'CRC handbook of fruit set and development'. (Ed. SP Monselise) pp. 167–191.
- Le Verge, S., 2005. Les tailles de l'olivier.
- Leauthaud, C., Ben Yahmed, J., Hussein, M., Rezgui, F., Ameer, F., 2022. Adoption factors and structural characteristics of irrigated olive grove agroforestry systems in Central Tunisia. *Agroecol. Sustain. Food Syst.* 46, 1025–1046. <https://doi.org/10.1080/21683565.2022.2085230>
- Lee, H., Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., 2023. Synthesis report of the IPCC sixth assessment report (AR6).
- Loconsole, G., Saponari, M., Boscia, D., D'Attoma, G., Morelli, M., Martelli, G., Almeida, R., 2016. Intercepted isolates of *Xylella fastidiosa* in Europe reveal novel genetic diversity. *Eur. J. Plant Pathol.* 146, 85–94. <https://doi.org/10.1007/s10658-016-0894-x>
- Lodolini, E., Polverigiani, S., Paolasini, F., Evangelista, G., Tarragoni, A., Neri, D., 2015. Effect of root pruning on vegetative-reproductive balance of young olive trees. Presented at the X International Symposium on Modelling in Fruit Research and Orchard Management 1160, pp. 113–118. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1160.16>
- López-Bernal, Á., Morales, A., García-Tejera, O., Testi, L., Orgaz, F., De Melo-Abreu, J.P., Villalobos, F.J., 2018. OliveCan: A Process-Based Model of Development, Growth and Yield of Olive Orchards. *Front. Plant Sci.* 9, 632. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00632>
- Loumou, A., Giourga, C., 2003. Olive groves: "The life and identity of the Mediterranean". *Agric. Hum. Values* 20, 87–95. <https://doi.org/10.1023/A:1022444005336>
- Lu, Y., Zhao, J., Xin, Q., Yuan, R., Miao, Y., Chen, K., Cong, W., 2023. Protective effects of oleic acid and polyphenols in extra virgin olive oil on cardiovascular diseases. *Food Sci. Hum. Wellness.* <https://doi.org/10.26599/FSHW.2022.9250047>
- Mancuso, S., Pasquali, G., Fiorino, P., 2002. Phenology modelling and forecasting in olive (*Olea europaea* L.) using artificial neural networks. *adva* 1000–1010. <https://doi.org/10.1400/14113>
- Mantovani, D., 2016. Olive (*Olea europaea*) and wild asparagus (*Asparagus acutifolius* L.) agroforestry system: asparagus performance and its best positioning in the olive orchard. Presented at the 3rd European Agroforestry Conference Montpellier, 23-25 May 2016, EURAF.
- Mantzanas, K., 2016. Olive trees intercropped with cereals and legumes in Kassandra peninsula, northern Greece. Presented at the 3rd European Agroforestry Conference Montpellier, 23-25 May 2016, EURAF.
- Mantzanas, K., Pantera, A., Koutsoulis, D., Papadopoulos, A., Kapsalis, D., Ispikoudis, S., Fotiadis, G., Sidiropoulou, A., Papanastasis, V.P., 2021. Intercrop of olive trees with cereals and legumes in Chalkidiki, Northern Greece. *Agrofor. Syst.* 95, 895–905. <https://doi.org/10.1007/s10457-021-00618-6>
- Mantzanas, K., Papanastasis, V., Pantera, A., Papadopoulos, A., Burgess, A.P., 2015. System report: olive agroforestry in Kassandra, Chalkidiki, Greece.
- Matson, P.A., Parton, W.J., Power, A.G., Swift, M.J., 1997. Agricultural intensification and ecosystem properties. *Science* 277, 504–509. <https://doi.org/10.1126/science.277.5325.504>
- Mazzeo, A., Palasciano, M., Gallotta, A., Camposeo, S., Pacifico, A., Ferrara, G., 2014. Amount and quality of pollen grains in four olive (*Olea europaea* L.) cultivars as affected by 'on' and 'off' years. *Sci. Hortic.* 170, 89–93. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.02.030>

- Metzidakis, I., Martinez-Vilela, A., Nieto, G.C., Basso, B., 2008. Intensive olive orchards on sloping land: Good water and pest management are essential. *J. Environ. Manage.* 89, 120–128. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.04.028>
- Mitlöhner, F., Morrow, J., Dailey, J., Wilson, S., Galyean, M., Miller, M., McGlone, J., 2001. Shade and water misting effects on behavior, physiology, performance, and carcass traits of heat-stressed feedlot cattle. *J. Anim. Sci.* 79, 2327–2335. <https://doi.org/10.2527/2001.7992327x>
- Monteith, J., Ong, C., Corlett, J., 1991. Microclimatic interactions in agroforestry systems. *For. Ecol. Manag.* 45, 31–44. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(91\)90204-9](https://doi.org/10.1016/0378-1127(91)90204-9)
- Montgomery, D.R., 2007. Soil erosion and agricultural sustainability. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 104, 13268–13272. <https://doi.org/10.1073/pnas.0611508104>
- Morales, A., Leffelaar, P.A., Testi, L., Orgaz, F., Villalobos, F.J., 2016. A dynamic model of potential growth of olive (*Olea europaea* L.) orchards. *Eur. J. Agron.* 74, 93–102. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.12.006>
- Moriana, A., Orgaz, F., Pastor, M., Fereres, E., 2003. Yield responses of a mature olive orchard to water deficits. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 128, 425–431. <https://doi.org/10.21273/JASHS.128.3.0425>
- Moriondo, M., Trombi, G., Ferrise, R., Brandani, G., Dibari, C., Ammann, C.M., Lippi, M.M., Bindi, M., 2013. Olive trees as bio-indicators of climate evolution in the Mediterranean Basin: Impact of climate change on olive tree distribution. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 22, 818–833. <https://doi.org/10.1111/geb.12061>
- Nawaz, M.F., Bourrié, G., Trolard, F., 2013. Soil compaction impact and modelling. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 33, 291–309. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0071-8>
- Ong, C., Black, C., Wilson, J., Muthuri, C., Bayala, J., Jackson, N., 2014. Agroforestry: hydrological impacts. *Encycl. Agric. Food Syst.* 1, 244–252. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52512-3.00028-0>
- Ong, C., Deans, J., Wilson, J., Mutua, J., Khan, A., Lawson, E., 1998. Exploring below ground complementarity in agroforestry using sap flow and root fractal techniques. *Agrofor. Syst.* 44, 89–106. <https://doi.org/10.1023/A:1006137707806>
- Palliotti, A., Bonghi, G., 1996. Freezing injury in the olive leaf and effects of mefluidide treatment. *J. Hortic. Sci.* 71, 57–63. <https://doi.org/10.1080/14620316.1996.11515382>
- Pantera, A., Burgess, P.J., Mosquera Losada, R., Moreno, G., López-Díaz, M.L., Corroyer, N., McAdam, J., Rosati, A., Papadopoulos, A.M., Graves, A., Rigueiro Rodríguez, A., Ferreiro-Domínguez, N., Fernández Lorenzo, J.L., González-Hernández, M.P., Papanastasis, V.P., Mantzanas, K., Van Lerberghe, P., Malignier, N., 2018. Agroforestry for high value tree systems in Europe. *Agrofor. Syst.* 92, 945–959. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0181-7>
- Pantera, A., Papadopoulos, A., Kitsikopoulos, D., Mantzanas, K., Papanastasis, V., Fotiadis, G., 2016. System report: olive agroforestry in Molos, Central Greece. *AGFORWARD Deliv* 3.
- Paris, A., 2017. Le marché de l'huile d'olive: en France [WWW Document]. URL <http://afidol.org/2017-SITEVI-March%C3%A9-HO-et-OT.pdf>.
- Paris, A., 2015. La France oléicole.
- Paris, P., Camilli, F., Rosati, A., Mantino, A., Mezzalana, G., Dalla Valle, C., Franca, A., Seddaiu, G., Pisanelli, A., Lauteri, M., Brunori, A., Re, G.A., Sanna, F., Ragagnoli, G., Mele, M., Ferrario, V., Burgess, P.J., 2019. What is the future for agroforestry in Italy? *Agrofor. Syst.* 93, 2243–2256. <https://doi.org/10.1007/s10457-019-00346-y>
- Pleguezuelo, C.R.R., Zuazo, V.H.D., Martínez, J.R.F., Peinado, F.J.M., Martín, F.M., Tejero, I.F.G., 2018. Organic olive farming in Andalusia, Spain. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 38, 20. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0498-2>
- Plexida, S., Solomou, A., Poirazidis, K., Sfougaris, A., 2018. Factors affecting biodiversity in agrosylvopastoral ecosystems with in the Mediterranean Basin: A systematic review. *J. Arid Environ.* 151, 125–133. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2017.11.017>

- Polverigiani, S., Lodolini, E.M., Neri, D., 2012. Olive Root Growth Observed By Field Rhizotron. *Acta Hortic.* 271–278. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.949.39>
- Ponti, L., Gutierrez, A.P., Ruti, P.M., Dell’Aquila, A., 2014. Fine-scale ecological and economic assessment of climate change on olive in the Mediterranean Basin reveals winners and losers. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 111, 5598–5603. <https://doi.org/10.1073/pnas.1314437111>
- Porlingis, I., 1972. The effect of fall and winter temperatures on inflorescence and fruit production of several Greek olive cultivars (*Olea europaea* L.). *Ann. Agric. For. Sch. Aristot. Univ. Thessalon.* 15, 311–328.
- Pörtner, H.-O., Roberts, D.C., Poloczanska, E.S., Mintenbeck, K., Tignor, M., Alegría, A., Craig, M., Langsdorf, S., Lösschke, S., Möller, V., 2022. IPCC, 2022: Summary for policymakers.
- Proietti, P., 1998. Gas Exchange in senescing leaves of *Olea europaea* L. *Photosynthetica* 35, 579–587. <https://doi.org/10.1023/A:1006987109181>
- Querné, A., Battie-laclau, P., Dufour, L., Wery, J., Dupraz, C., 2017. Effects of walnut trees on biological nitrogen fixation and yield of intercropped alfalfa in a Mediterranean agroforestry system. *Eur. J. Agron.* 84, 35–46. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.12.001>
- Rosati, A., 2016. When chickens graze in olive orchards, the environmental impact of both chicken rearing and olive growing decreases. Presented at the 3rd European Agroforestry Conference Montpellier, 23-25 May 2016, EURAF.
- Rosati, A., Caporali, S., Paoletti, A., 2009. Olive, Asparagus and animals: an agroforestry model for temperate climate in developed countries. *Proc. III OLIVEBIOTEQ Renov. Profitab. Compet. Mediterr. Olive Grow. Sect. Sfax Tunis.* 15, 19.
- Rosati, A., Pantera, A.A., Burgess, P., 2017. Lessons learnt: Wild asparagus and other crops in olive orchards in Italy. *Contrib. Deliv.* 3.
- Rühl, J., Caruso, T., Giucastro, M., La Mantia, T., 2011. Olive agroforestry systems in Sicily: Cultivated typologies and secondary succession processes after abandonment. *Plant Biosyst.* 145, 120–130. <https://doi.org/10.1080/11263504.2010.540383>
- Russo, C., Cappelletti, G., Nicoletti, G., Di Noia, A., Michalopoulos, G., 2016. Comparison of European Olive Production Systems. *Sustainability* 8, 825. <https://doi.org/10.3390/su8080825>
- Santé publique France, 2019. L’essentiel des recommandations sur l’alimentation.
- Santos, P.Z.F., Crouzeilles, R., Sansevero, J.B.B., 2019. Can agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem service provision in agricultural landscapes? A meta-analysis for the Brazilian Atlantic Forest. *For. Ecol. Manag.* 433, 140–145. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.10.064>
- Sanz-Cortes, F., Martinez-Calvo, J., Badenes, M.L., Bleiholder, H., Hack, H., Llacer, G., Meier, U., 2002. Phenological growth stages of olive trees (*Olea europaea*). *Ann. Appl. Biol.* 140, 151–157. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2002.tb00167.x>
- Schroth, G., 1999. A review of belowground interactions in agroforestry, focussing on mechanisms and management options. Auclair Dupraz C Eds *Agrofor. Sustain. Land-Use Fundam. Res. Model. Emphas. Temp. Mediterr. Appl.* 60. https://doi.org/10.1007/978-94-017-0679-7_1
- Seifi, E., Guerin, J., Kaiser, B., Sedgley, M., 2015. Flowering and fruit set in olive: a review. *Iran J Plant Physiol* 5, 1263–1272.
- Shi, L., Feng, W., Xu, J., Kuzyakov, Y., 2018. Agroforestry systems: Meta-analysis of soil carbon stocks, sequestration processes, and future potentials. *Land Degrad. Dev.* 29, 3886–3897. <https://doi.org/10.1002/ldr.3136>
- Simoni, S., Caruso, G., Vignozzi, N., Gucci, R., Valboa, G., Pellegrini, S., Palai, G., Goggioli, D., Gagnarli, E., 2021. Effect of Long-Term Soil Management Practices on Tree Growth, Yield and Soil Biodiversity in a High-Density Olive Agro-Ecosystem. *Agronomy* 11, 1036. <https://doi.org/10.3390/agronomy11061036>
- Smith, J., 2010. The history of temperate agroforestry. *Org. Res. Cent.*

- Sofi, F., Cesari, F., Abbate, R., Gensini, G.F., Casini, A., 2008. Adherence to Mediterranean diet and health status: meta-analysis. *BMJ* 337, a1344–a1344. <https://doi.org/10.1136/bmj.a1344>
- Solomou, A.D., Sfougaris, A.I., 2015. Bird community characteristics as indicators of sustainable management in olive grove ecosystems of Central Greece. *J. Nat. Hist.* 49, 301–325. <https://doi.org/10.1080/00222933.2014.987839>
- Stamps, W., Linit, M., 1997. Plant diversity and arthropod communities: Implications for temperate agroforestry. *Agrofor. Syst.* 39, 73–89. <https://doi.org/10.1023/A:1005972025089>
- Staton, T., Walters, R.J., Smith, J., Girling, R.D., 2019. Evaluating the effects of integrating trees into temperate arable systems on pest control and pollination. *Agric. Syst.* 176, 102676. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102676>
- Temani, F., Bouaziz, A., Daoui, K., Wery, J., Barkaoui, K., 2021. Olive agroforestry can improve land productivity even under low water availability in the South Mediterranean. *Agric. Ecosyst. Environ.* 307, 107234. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107234>
- Therios, I.N., 2009. *Olives*. CABI.
- Torralba, M., Fagerholm, N., Burgess, P.J., Moreno, G., Plieninger, T., 2016. Do European agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem services? A meta-analysis. *Agric. Ecosyst. Environ.* 230, 150–161. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.06.002>
- Torres, M., Pierantozzi, P., Searles, P., Rousseaux, M.C., García-Inza, G., Miserere, A., Bodoira, R., Contreras, C., Maestri, D., 2017. Olive cultivation in the southern hemisphere: Flowering, water requirements and oil quality responses to new crop environments. *Front. Plant Sci.* 8, 1830. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01830>
- Tramblay, Y., Koutroulis, A., Samaniego, L., Vicente-Serrano, S.M., Volaire, F., Boone, A., Le Page, M., Llasat, M.C., Albergel, C., Burak, S., 2020. Challenges for drought assessment in the Mediterranean region under future climate scenarios. *Earth-Sci. Rev.* 210, 103348. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103348>
- Tzanakakis, M., 2003. Seasonal development and dormancy of insects and mites feeding on olive: a review. *Neth. J. Zool.* 52, 87–224. <https://doi.org/10.1163/156854203764817670>
- USDA Agroforestry Strategic Framework, 2019. *Agroforestry Strategic Framework: Fiscal Years 2019–2024*.
- Vandermeer, J.H., 1989. *The ecology of intercropping*. Cambridge University Press.
- Vanwalleghem, T., Amate, J.I., de Molina, M.G., Fernández, D.S., Gómez, J.A., 2011. Quantifying the effect of historical soil management on soil erosion rates in Mediterranean olive orchards. *Agric. Ecosyst. Environ.* 142, 341–351. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.06.003>
- Villalobos, F.J., Testi, L., Hidalgo, J., Pastor, M., Orgaz, F., 2006. Modelling potential growth and yield of olive (*Olea europaea* L.) canopies. *Eur. J. Agron.* 24, 296–303. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2005.10.008>
- Virassamy, C., 2020. *La culture et la transformation des olives dans le pays de Nîmes* [WWW Document]. URL <https://www.culture.gouv.fr/Media/Medias-creation-rapide/La-culture-et-la-transformation-des-olives-dans-le-pays-de-Nimes.pdf>.
- Warlop, F., 2016. *The smart project: a focus on fruit trees and vegetables agroforestry systems in France*. Presented at the 3rd European Agroforestry Conference Montpellier, 23–25 May 2016, EURAF.
- Yeste, P., Rosa-Cánovas, J.J., Romero-Jiménez, E., Ojeda, M.G.-V., Gámiz-Fortis, S.R., Castro-Díez, Y., Esteban-Parra, M.J., 2021. Projected hydrologic changes over the north of the Iberian Peninsula using a Euro-CORDEX multi-model ensemble. *Sci. Total Environ.* 777, 146126. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146126>

Chapitre 2 : Les méthodes d'évaluation de systèmes agroforestiers à base d'oliviers

Pour évaluer les performances agronomiques et environnementales des systèmes agroforestiers à base d'oliviers, différentes méthodes peuvent être utilisées : les méthodes in-situ et ex-situ. Dans la première partie de ce chapitre, les deux méthodes sont présentées ainsi que l'approche participative. Dans une deuxième partie, le choix du modèle utilisé (méthode d'évaluation ex-situ) est détaillé à travers un article de revue sur les modèles agroforestiers et fruitiers existants. Les questions scientifiques associées à la thématique de recherche sont explicitées en fin de chapitre.

1) Les méthodes d'évaluation des systèmes de culture

Certaines méthodes pour évaluer les systèmes de culture impliquent des évaluations in-situ, c'est-à-dire impliquant une expérimentation de terrain. Ces expérimentations comprennent plusieurs modalités, y compris une modalité témoin de référence. Cette méthode est efficace pour répondre à des questions spécifiques et est plus ou moins simple à mettre en place, offrant un moyen efficace pour obtenir des données. Cependant, ces expérimentations présentent certaines limites, notamment la difficulté d'extrapoler les résultats dans des contextes pédoclimatiques différents, ainsi que l'extrapolation sur des années contrastées.

Une approche alternative consiste à évaluer un système de culture à l'aide d'un modèle numérique ex-situ. Cette méthode permet de tester différentes modalités, y compris une modalité témoin de référence, de manière similaire à une expérimentation in-situ. Les modèles sont efficaces pour évaluer le système dans son ensemble sur le long terme, mais ils ne fournissent que des solutions approximatives et nécessitent des puissances informatiques importantes. De plus, la conception de ces outils, qui peuvent nécessiter des années de développement en fonction du degré de détail souhaité, est un inconvénient. Cependant, une fois développés, ces outils permettent de répondre rapidement à de nombreuses questions en « quelques clics ».

Comme mentionné précédemment, chaque technique d'évaluation des systèmes de culture a ses avantages et ses inconvénients, résumés dans le tableau ci-dessous (Tableau V).

Tableau V : Résumé des avantages et inconvénients des évaluations in-situ et ex-situ

Facteurs	Evaluation in-situ	Evaluation ex-situ
Complexité de la démarche	Moyenne	Complexe
Connaissance sur l'effet de la méthode	Compris	Assez flou
Appropriation des résultats	Facilement appropriables	Plus difficilement appropriables
Coût d'acquisition des résultats	Elevé	Faible (après le développement du modèle)
Domaine de validité	Moyenne	Moyenne
Effet long terme	Pas adapté	Adapté
Effet court terme	Adapté	Moins bien adapté
Incertitude	Faible	Forte

Les évaluations in-situ sont d'une complexité moyenne et permettent d'acquérir des connaissances sur l'effet des systèmes utilisés. Cependant, elles sont coûteuses, mais les résultats sont facilement appropriables par les acteurs de la société. Ces évaluations sont adaptées pour mesurer les effets à court terme et dans des conditions bien précises. Néanmoins, les extrapolations des résultats dans des contextes pédoclimatiques différents restent délicates et nécessitent des réplicats, rendant ainsi le coût de cette approche important.

L'évaluation ex-situ, quant à elle, est plus complexe, mais les résultats sont moins coûteux à acquérir et plus faciles à interpréter. Elle est adaptée pour mesurer les effets à long terme et pour évaluer l'effet d'un système dans différents contextes pédoclimatiques. Cependant, cette approche est moins précise pour mesurer les effets à court terme et l'incertitude est plus élevée.

Pour évaluer les performances des systèmes agroforestiers à base d'oliviers sur le long terme, j'ai fait le choix d'utiliser la méthode d'évaluation ex-situ. Cette méthode, couplée à une approche participative, peut s'avérer efficace pour explorer les performances des systèmes co-conçus par des acteurs. Elle implique de travailler en collaboration avec les acteurs de la filière pour identifier leurs problématiques, co-concevoir des systèmes innovants, et discuter des résultats. Cette approche permet d'adapter les modèles à la réalité du terrain, afin de mieux représenter le développement et la productivité des systèmes agroforestiers. En somme, l'approche participative permet de mieux ancrer la modélisation dans la réalité, en facilitant les échanges entre les acteurs et les scientifiques (Prost et al., 2012).

Pour répondre à la problématique, nous utiliserons une approche hybride combinant l'évaluation par modélisation (ex-situ) et l'approche participative. Chaque approche sera utilisée selon un protocole bien défini, tel que décrit dans le chapitre n°3 (Matériels et Méthodes) de la thèse.

Bibliographie de la partie 2.1

Prost, L., Cerf, M., Jeuffroy, M.-H., 2012. Lack of consideration for end-users during the design of agronomic models. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 32, 581–594. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0059-4>

2) L'évaluation ex-situ : le choix du modèle agronomique

A) Résumé de l'article

Pour répondre à la problématique de recherche portant sur les performances des systèmes agroforestiers à base d'oliviers, la technique d'évaluation utilisée est la modélisation. En utilisant cette technique d'évaluation, l'objectif est d'évaluer les performances de ces systèmes sur un pas de temps long (minimum 20 ans).

Afin d'évaluer ces systèmes agroforestiers à base d'oliviers, il est nécessaire d'identifier un modèle capable de répondre à cette problématique. Pour ce faire, une analyse bibliographique est effectuée dans le but d'identifier un modèle existant.

Afin d'évaluer les performances agronomiques de différentes répartitions spatiales de systèmes agroforestiers à base d'oliviers, j'ai identifié des critères indispensables que doit contenir le modèle. Trois critères sont retenus : i) la représentation en trois dimensions de la croissance des arbres et des cultures, ii) la simulation sur un pas de temps long et, iii) les représentations des principales opérations culturales.

Cette analyse bibliographique a permis d'identifier 31 modèles, cependant aucun d'entre eux ne permet actuellement d'évaluer la durabilité de systèmes agroforestiers à base d'oliviers. Seuls deux modèles, à savoir le modèle Hi-sAFé (Dupraz et al., 2019) et le modèle de Moriondo et al. (2019), peuvent être adaptés par l'implémentation de formalismes pour simuler des systèmes agroforestiers à base d'oliviers.

Un article de revue sur ce sujet a été soumis à la revue *Agroforestry Systems* (actuellement en attente d'une réponse) et est disponible ci-dessous.

B) Article accepté avec révisions mineures dans *Agroforestry Systems*

Insights into fruit tree models relevant to simulate fruit tree-based agroforestry systems

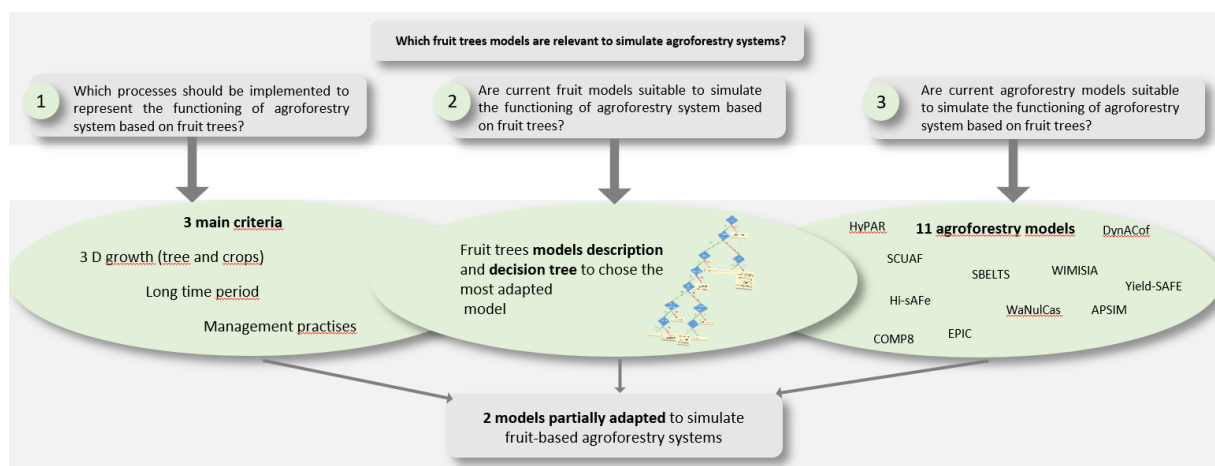
N. Barbault, C. Dupraz, P.E. Lauri, M. Gosme ^d

ABSys, Univ Montpellier, CIHEAM-IAMM, CIRAD, INRAE, Institut Agro, Montpellier, France
nicolas.barbault@inrae.fr

Abstract

Agroforestry, the integration of trees, crops, and animals, is expected to increase environmental sustainability of fruit production compared to traditional orchards. Virtual experiments with models would allow the performance and sustainability of these systems to be evaluated in a range of pedoclimatic and management scenarios, taking into account the interactions of fruit trees with crops. The models should represent tree and crop growth in 3D, run simulations over the whole life cycle of the orchard, and account for management practices that influence tree-crop interactions. We reviewed existing fruit tree and agroforestry models and have proposed a decision tree to guide future modellers in choosing a model that meets their simulation objectives. None of the reviewed models met all requirements, but we identified improvements that could be made to two existing models to accurately simulate temperate fruit tree based agroforestry systems.

Graphical abstract



Keywords: fruit tree models, agroforestry models, fruit tree systems, sustainability evaluation, FSPM, process based models

Abbreviations:

PAR: Photosynthetically Active Radiation
HI: Harvest Index
FSPM: Functional Structural Plant Model
GPP: Gross Primary Production
NPP: Net Primary Production
FT-AFS: Fruit Tree-based AgroForestry Systems

Acknowledgements:

The authors thank F. Reyes for his advice feedback on a first draft of this article, his advice and his expertise in modelling. This work was supported by the Biodiversify project European Union, PRIMA [ANR-19-P026-0008, 2020-2023]; and the Modolivier project Fondation de France [00107057, 2020-2023].

Introduction

Agroforestry was defined more than 40 years ago (Bene et al., 1977), and this definition has evolved to include a wide range of agroforestry systems with diverse objectives assigned to them (Somarriba, 1992). This definition has recently been adjusted to include the context of climate change and the need to connect economic, social and political dimensions (Lauri et al., 2019; van Noordwijk, 2018). In this sense, USDA described agroforestry as "the intentional mixing of trees and shrubs into crops and animal production systems to create environmental, economic, and social benefits" (USDA Agroforestry Strategic Framework, 2011). Every EU Member State recently included its own definition of agroforestry within its Common Agricultural Policy Strategic Plan (Lawson, 2023).

In the global warming context, agroforestry is one of the solutions that could help mitigate and adapt to climate change effects (Hernández-Morcillo et al., 2018). Regarding mitigation, agroforestry allows carbon sequestration, notably through the accumulation of carbon in the biomass and the soil, and favours the reduction of greenhouse gas emissions, notably through the reduction of N₂O emissions due to a better absorption of nutrients (Hernández-Morcillo et al., 2018; Jose, 2009). About adaptation, agroforestry increases the resilience of systems and biodiversity (Lawson et al., 2023; Rolo et al., 2023; Hernández-Morcillo et al., 2018; Jose, 2009; Quinkenstein et al., 2009; Wolz & DeLucia, 2018).

Agroforestry can be subdivided into 11 sub-practices: i) Silvopastoral, ii) forest grazing, iii) wood pasture or orchard grazing, iv) silvoarable, v) forest farming, vi) alley cropping, alley coppice, or orchard intercropping, vii) agrosilvopastoral, viii) sequential mixtures of silvoarable and silvopastoral systems, ix) linear agroforestry, x) forest strips, xi) shelterbelt networks, wooded hedges or riparian tree strips (Dupraz, Lawson, et al., 2018). In these agroforestry systems, trees may have different functions. In some cases, they mainly produce a service to the underlying crop (e.g. shade trees in coffee or cocoa-based agroforestry systems) or they have an objective of production (timber, fuelwood, cork, etc.) that is considered as secondary to the production of crops. Alternatively, they can constitute the main production expected on the plot, and crops or animals constitute a complementary production. The latter case is termed "high-value-tree agroforestry" (Deng et al., 2017). In the EU, these systems would be called "permanent-crop-agroforestry" and these all land in the category of "permanent crops" automatically qualifies for CAP (Common Agricultural Policy) Basic Payments. These systems are usually based on trees producing fruits or nuts such as, in temperate and Mediterranean climates, olive, apple, pear, walnut, chestnut, hazelnut, which constitute the principal source of income (Pantera et al., 2018)). In the EU, these systems would be called "permanent-crop-agroforestry" and these land in the category of "permanent crops" automatically qualifies for CAP Basic Payments. Every EU Member

State recently included its own definition of agroforestry within its Common Agricultural Policy Strategic Plan (Lawson, 2023).

These fruit trees based agroforestry systems provide several benefits for tree growers. For example, they allow diversifying the production, thus increasing resilience towards climatic or economic changes, while at the same time increasing the total production of the agricultural plot compared to separate orchards and annual crops (Zahoor et al., 2021). Another benefit can be an increase of soil fertility, in particular through nitrogen fixation by legume crops (Dollinger & Jose, 2018). Other benefits include increased pollination (Bentrup et al., 2019), improved natural regulation of pests (Pumariño et al., 2015) or improved infiltration and water retention capacity of the soil (Wang et al., 2017). They also provide other ecosystem services such as carbon sequestration (Ramachandran Nair et al., 2010) or biodiversity conservation (Torralba et al., 2016).

However, the benefits for both production and ecosystem services provision are dependent on the design and management of agroforestry systems, in particular the choice of species, the spatial organisation of the plot as well as tree and crop management: including soil tillage, fertilisation, irrigation, tree pruning, etc. These factors also interact with the soil and climate conditions, and the ecological conditions in which the system is embedded. Thus, there is no one-size-fits-all agroforestry system, and the system has to be adapted to the environmental conditions as well as to the farmer's objectives and constraints.

Several approaches can be used to test different systems and compare alternative solutions. These can be tested through on-station and on-farm experiments. However, these experiments are expensive in terms of time (trees grow slowly), space (trees are widely spaced and need controls), manpower for monitoring these trials and financial costs. The designs must also be replicated in many geographical sites to test the resilience of the system in response to soil and climate constraints or to adapt systems to local pedoclimatic conditions. An alternative solution is to perform virtual experiments using computer models which simulate the impact of cultural practices on the development of the tree and its productivity (Vos et al., 2007).

A recent literature review by Grisafi et al (2022) synthesised the diversity of models that have been developed for fruit trees. They showed that: (i) modelling of the fruit tree architecture improved the reliability of the simulations, (ii) spatially explicit models allowed the simulation of the canopy dynamics as well as the light interception dynamics, (iii) FSPM models allow a good understanding of the functioning of the tree architecture. However, their review focused on modelling of trees in monospecific orchards. They did not address the suitability of the models for agroforestry systems based on fruit trees. Due to the current challenges facing fruit production worldwide (adaptation to climate change, reduction of negative environmental impacts, protection of consumers' and agricultural workers' health, etc.), agroforestry systems might become more important in horticultural production, and the need to model these systems will become more and more pressing (Grisafi et al., 2022). There is a wide diversity of existing models for orchards, however few are able to simulate agroforestry systems, since the processes driving tree-crop interactions and/or processes impacted by tree-crop interactions are not always represented in simple fruit-tree models. Focusing here on temperate fruit trees, we have reviewed existing models to identify those that could be adapted to represent the functioning of fruit tree-based agroforestry systems (FT-AFS).

This paper will address three main questions: i) which processes should be implemented to represent the functioning of fruit tree-based agroforestry systems?; ii) are current fruit tree models suitable for simulating the functioning of FT-AFS?; iii) are current agroforestry models suitable to simulate the functioning of FT-AFS? In the discussion, two main questions are considered: i) how to choose the most

suitable model to answer one's scientific question? ii) how to adapt existing models to simulate the functioning of FT-AFS?

1) Modelling: What are the key elements of FT-AFS to represent?

To simulate FT-AFS, a number of processes need to be represented. All soil–vegetation–atmosphere transfer (SVAT) processes, such as water balance or energy transfers, are required in order to predict the plants (trees and crops) responses to the environmental conditions. Those processes are included in most crop models, such as the STICS model (Brisson et al., 2009), the APSIM model (McCown et al., 1996), the Hi-sAFe model (Dupraz et al., 2019) or the OliveCan model (López-Bernal et al., 2018). But in addition, processes that are specific to agroforestry systems should also be taken into account. These include the processes driving or being driven by tree-crop interactions, such as competition, complementarity or facilitation (Vandermeer, 1989) (Fig.1).

Regarding the environment, it is necessary to consider variables describing climatic and soil conditions of the plot to be simulated. Climate is generally represented by daily input variables such as average air temperature (and/or minimum and maximum temperatures), precipitation, global radiation and wind. To simulate soil, several variables can be considered, such as soil depth, texture, pH, organic matter content, microbial biomass, humidity, nitrate and ammonium content, etc.

In order to be able to represent tree-crop interactions, agroforestry models have to represent the components of the system that drive these interactions. Thus, they cannot focus only on fruit production, as some empirical fruit tree models do, but should also consider the tree vegetative growth, because vegetative organs drive the competition between trees and crops (light competition for the aerial part, and water and nutrient competition for the belowground part). Similarly, for crops, it is important to represent both the aerial and belowground parts of the plants. Indeed, the crop canopy will drive not only light interception and transpiration by the crop but also evaporation from bare-soil. These processes will affect the soil water availability and ultimately the tree growth. Furthermore, the tree and crop foliage has to be at least partly spatially explicit because tree-crop interactions are driven not only by the biomass of the respective species, but also by the spatial configuration of the system (Jiménez & Díaz, 2003). Furthermore, the rooting profile of the crops and trees must be explicitly represented since is essential to evaluate the intensity of tree-crop competition for water and nutrients. At the same time, competition for water and nutrients will vary according to distance from the tree, and light competition will also depend on orientation relative to the tree. Therefore, the model should represent space in 3D to consider both the spatial heterogeneity of agroforestry systems (2D) and the dominance or complementarity along the vertical axis.

Another important feature of agroforestry systems is the temporal complementarity between trees and crops (e.g. winter crops using resources in winter when trees are leafless in temperate regions), and trees using resources in summer (after winter crop harvest). Furthermore, some of the expected ecosystem services produced by cover crops, or even cash crops, are dependent on the period at which the crop is sown or harvested (e.g. reduction of erosion, which is important at periods of high rainfall, in particular in Mediterranean climate). Therefore, to be able to capture the interplay between the crop's and the tree's phenologies, and the weather variability during the year, it is important to simulate the system with a sufficiently high temporal resolution. However, it is also important to represent the system over a long period, because tree-crop interactions evolve over many years as trees grow, and there is a feedback between tree-crop interactions and tree growth. Therefore, it is not possible to use fixed-size trees: tree size and its change with time is an endogenous variable in the system.

The models should also integrate the key tree cultural operations that have an impact on the tree-crop interactions, such as: irrigation, fertilisation, branch and root pruning, soil tillage and fruit load management. Similarly, crop management practices that might have an impact on trees are sowing and harvest dates, soil tillage, irrigation, fertilisation. Indeed, irrigation drives the impact of water competition (if there were sufficient water for both crops, competition would not be felt), fertilisation drives the impact of nitrogen competition, soil tillage drives belowground competitions by destroying roots at regular intervals and tree pruning drives light competition. In case of interactions between weeds, diseases, pests or beneficial organisms of the tree and of the crop, management practices aiming at controlling pests (*sensu lato*) should also be considered.

The (positive and negative) interactions between the fruit tree and the understory crop will then result from the simulated processes: water uptake by the tree and the crop will lead to competition for water, light interception by the tree trunk and canopy will cause competition for light, the buffered microclimate under the tree might create more favourable conditions for the crop, resulting in facilitation, nitrogen released by decomposition of legume crop residues will improve nitrogen nutrition of the tree etc. More direct interactions could also be simulated when necessary, such as allelopathy in the case of walnut trees, although this seems to be limited in agroforestry systems (Inderjit & Nilsen, 2003).

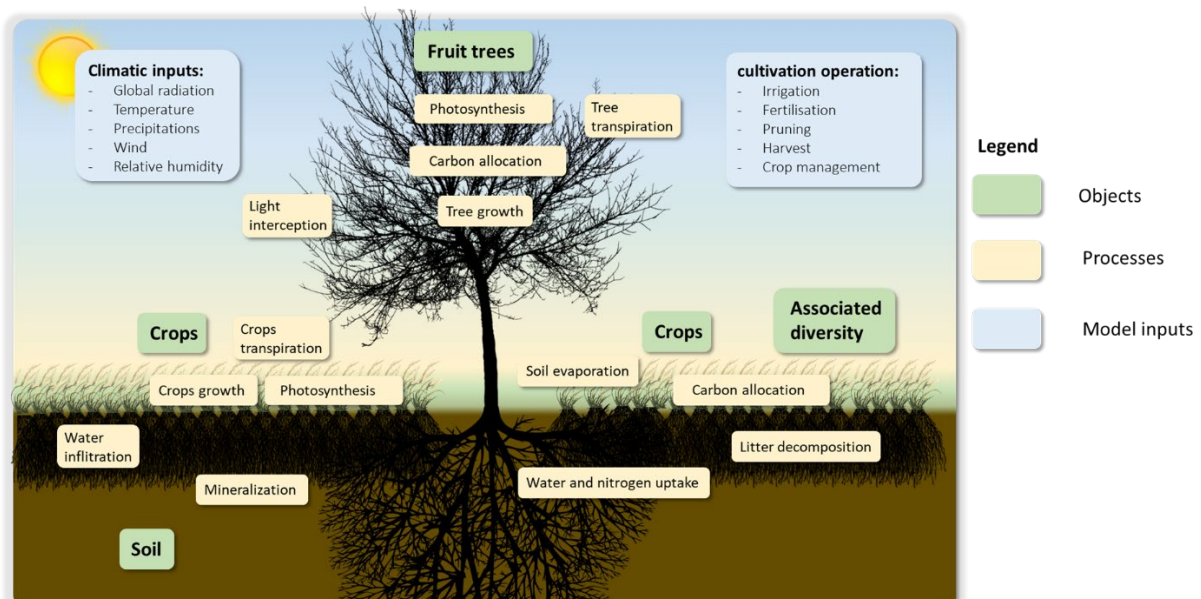


Figure 1: Processes to represent when simulating the functioning of FT-AFS.

These processes allow representing of the competition and/or complementarity (for light, water, nutrients), and facilitation-processes (buffered microclimate, improved fertility, modified and deeper root profiles) between trees and crops. Carbon allocation is integrated in the fruit-carbon compartment.

To summarise, compared to models that focus only on fruit production, models aiming at simulating fruit trees in agroforestry systems should have the following features:

- represent space in 3D with a spatial scale relevant to tree-crop interactions

- represent time with a sufficiently long time period to model tree growth (typically several decades), and a sufficiently fine time step to represent the complementarity between tree and crop phenologies (typically days or hours).
- represent the four most important cultural operations impacting on tree-crop interactions: irrigation (driving the impact of water competition), fertilisation (driving the impact of nitrogen competition), fruit load management (driving belowground competitions) and tree pruning (driving light competition).

2) Bibliographic study

Since the literature search is focused only on models integrating temperate fruit species, tropical fruit tree models are not included, although it is likely that some mechanisms used in temperate tropical models /are also relevant for tropical temperate fruit tree models. It is also important to note that specific formalisms can be identified in environmental models (e.g., models focused on light interception, etc.). However, this review article does not explore the available models for each specific process but focuses solely on available agroforestry and fruit tree models.

To identify fruit tree models in the literature, we relied on existing literature reviews such as Grisafi et al. (2022) and Moriondo et al. (2015). The list of existing models was completed by specific searches (on Web of Sciences and GoogleScholar search engines) with: "olive tree modelling", "apple tree modelling", "pear tree modelling", "peach tree modelling". This search was based on the highest economic value species in the temperate and Mediterranean regions.

To identify the different agroforestry models in the literature, we relied on existing literature reviews such as Burgess et al. (2019) and Kraft et al. (2021). The list of existing models was completed by specific searches (on Web of Sciences and GoogleScholar search engines) with: modelling agroforestry systems, modelling diversified systems.

3) Models' diversity: very different modelling objectives

3.1 A synthetic view of different fruits and agroforestry models

During the last 50 years, several models have been developed by researchers to understand, predict, or optimise the functioning of trees (Fig.2). Built to address various problems, these models are based on different methodologies, with various degrees of simplification. In the literature, fruit and agroforestry models have been developed in parallel: no agroforestry model was initially developed with fruit trees in mind (but some have been adapted afterwards (e.g. Palma et al., 2016)).

For fruit trees, models can be classified into two categories: empirical models based statistical relationships and mechanistic models. Mechanistic models can be separated into two subcategories: i) "fine-scale architecture": FSPM (Functional Structural Plant Models models) which are based on a detailed representation of tree architecture, ii) "coarse architecture" scale models: compartmental models, which are based on a rougher representation of tree structure. FSPM models represent the architecture of the plant, by dividing the plant into different elementary parts that have an explicit position in space, at least relative to the other components. Biophysical process-based models represent the development of the plant according to the interaction of several physical and/or biological processes acting on compartments of the plant that are not necessarily positioned in space (Sievänen et al., 2014).

For agroforestry systems, various models have been developed with different formalisms. Six types of models predominate (Burgess et al., 2019): i) allometric models, ii) non-growth models of soil carbon

or light interception, iii) plot scale models of tree and crop growth, iv) architectural models at the plant scale, v) farm decision models, vi) landscape models. In this article, only plot scale models of tree and crop growth are developed, because they possess the three characteristics that we identified as essential for simulating the functioning of FT-AFS, while remaining relatively simple.

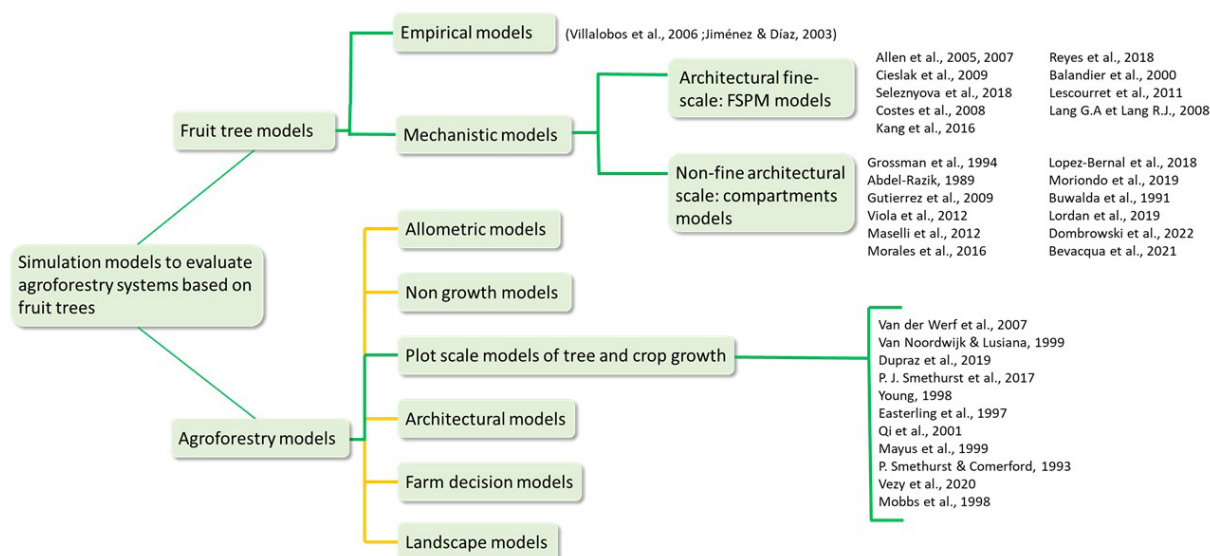


Figure 2: A synthetic view of different fruit and agroforestry models presented in this review. The green lines illustrate the models developed to simulate the growth and yield of fruit tree in a conventional or agroforestry context. The yellow lines indicate the coexistence of other types of models not considered here.

3.2 Focus on the diversity of fruit tree models

In the literature, fruit models have been developed for various species such as apple trees (*Malus domestica* L.), peach trees (*Prunus persica* L.), olive trees (*Olea europaea* L.), pear trees (*Pyrus communis* L.), walnut trees (*Juglans* sp. L.), cherry trees (*Prunus avium* L.) and kiwi trees (*Actinidia*) (Tab.I). Representation-methods differ according to the objectives of the model.

Table I: Summary of the different fruit tree models according to the species modelled.

Species	Model (if named)	Bibliography
apple trees		Seleznyova et al., 2018
apple trees	MAppleT model	Da Silva et al., 2014
apple trees	MaluSim	Lakso et al., 1999
apple trees	IMApple	Kang et al., 2016
apple trees	MUSCA	Reyes et al., 2018
apple trees	CLM5-FruitTree	Dombrowski et al., 2022
cherry trees	VCHERRY	Lang G.A et Lang R.J., 2008
kiwi trees	L-Kiwi model	Cieslak et al., 2011
kiwi trees		Buwalda, 1991
olive trees		Abdel-Razik, 1989
olive trees		Villalobos et al., 2006
olive trees		Gutierrez et al., 2009
olive trees		Viola et al., 2012
olive trees		Maselli et al., 2012
olive trees		Morales et al., 2016
olive trees	OliveCan	López-Bernal et al., 2018
olive trees		Moriondo et al., 2019
peach trees	L-PEACH	Lopez et al., 2010

peach trees	PEACH	Grossman & DeJong, 1994
peach trees	Qualitree	Lescourret et al., 2011
peach trees		Bevacqua et al., 2021
pear trees		Jiménez & Díaz, 2003
walnut trees	SIMWAL	Balandier et al., 2000

3.3 Empirical fruit tree models

Empirical models are based on a set of equations linking explanatory variables with one or several response variables. The model is a “black box”: the modeller does not need to know why these variables are related, just that empirical evidence (often based on statistical analysis of field data) shows a relationship between the variables.

We found only two empirical models: one for olive trees developed by Villalobos et al. (2006) and a second for pear trees built by Jiménez and Díaz (2003). However, other empirical models might exist and have not been listed in this review because they are not presented as “models” in the literature.

These two fruit tree models are based on empirical relationships and do not consider physical and biological processes. This type of model can be used by farmers to predict their future yield as a function of variables measured before flowering (Jiménez & Díaz, 2003) or by researchers to understand the components of yield most impacted by environmental conditions (Villalobos et al., 2006), but they are unable to predict the development of a tree in a new agroecosystem, as the model’s parameters would need to be calibrated again in each environment.

3.4 Architectural fine-scale: Functional Structural Plant Models

Functional Structural Plant Models (FSPM) simulate the plant growth and development. The model simulates the photosynthesis and/or respiration of each organ individually (according to the scale studied), their growth, and the relationships between organs. FSPM models are often used to understand the links between the architecture and the development of the plant. These plant-centred models represent a real advance, in understanding carbon-allocation dynamics, over empirical models. Initially developed on annual crops, FSPM models have been developed for perennial crops such as fruit trees. To go from annual to perennial species, several new processes had to be added: (i) the specific phenology (senescence, bud break) of fruit trees, (ii) the carbon reserve compartment (storage and remobilization) and (iii) the formation of new organs (in the buds) during the previous year. The carbon dynamics in the plant had to be modified accordingly. For fruit trees, representation-methods are different in comparison with annual crops and often more complex. These models aim to better understand and define the effect of pruning and fruit load on the fruit tree.

In the literature, several FSPM have been developed to simulate the architecture of temperate fruit trees (e.g. peach, kiwi, walnut, cherry, and apple). We will focus here on the comparison between these models, the description of each individual model is available in the Supplementary Information A. These nine FSPM fruit trees models are: L-Peach, L-Kiwi, Apple, MAppleT, IMApplE, MUSCA, SIMWAL, QualiTree, VCHERRY.

These models represent the development of a fruit tree according to more or less divergent formalisms depending on the processes (photosynthesis, the root system, the inter-annual fruit production variability, the inter-annual tree growth) (Table II). All reviewed FSPM models represent photosynthesis. Indeed, this process is the basis of carbon synthesis. It can be simulated by two biogeochemical approaches: i) the Farquhar-von Caemmerer-Berry (FvCB) model, ii) the

photosynthesis-light response curve. The FvCB model describes the biological functioning of photosynthetic mechanisms. More precisely, the parameters of these mechanisms require a very accurate calibration. The photosynthesis-light response curve does not describe biological functioning. Consequently, its calibration is easier. The L-Peach, the MUSCA and the SIMWAL models use the FvCB model. In contrast, the L-Kiwi, the Apple and the QualiTree models apply the photosynthesis-light response curve.

The root system is also present in all models. However, depending on the model, the root architecture system is more or less simplified. Furthermore, some models, such as Apple model and VCHERRY model, take into account the rootstock, which influences carbon allocation to roots, tree vigour, growth and flowering (Gjamovski & Kiprijanovski, 2011; Lauri et al., 2006). The inter-annual variation in fruit production is rarely considered. Nevertheless, the dynamics of production is fundamental to represent the phenomena of production irregularity in fruit trees. In the model descriptions, limited information is provided on this aspect. The SIMWAL and QualiTree models do not simulate several years of production.

Table II: Summary of the different formalisms of fruit trees FSPM models (Functional Structural Plant Models).

Model	Publications	Roots	Rootstock	Fruit compartment	Inter-annual fruit production	Inter-annual tree growth	Photosynthesis
L-Peach	Allen et al., 2005, 2007 Smith et al., 2008 Lopez et al., 2010 Da Silva, Qin, et al., 2014	Yes	No	Yes	No indication	No indication	Farquhar-von Caemmerer-Berry (FvCB)
L-Kiwi	Cieslak et al., 2009 Cieslak et al., 2011 Cieslak et al., 2011	Yes	No	Yes	No indication	No indication	photosynthesis-light response curve
Apple	Seleznayova et al., 2018	Yes	Yes	Yes	No indication	No indication	photosynthesis-light response curve
MAppleT	Costes et al., 2008 Da Silva, Han et al., 2014 Pallas et al., 2016	Yes	No	Yes	No indication	Yes	No indication
IMApple	Kang et al., 2016	Yes	No	Yes	No indication	No indication	No indication
MUSCA	Reyes et al., 2018 Reyes et al., 2019	Yes	No	Yes	No indication	No indication	Farquhar-von Caemmerer-Berry (FvCB)
SIMWAL	Balandier et al., 2000	Yes	No	No	No	No indication	Farquhar-von Caemmerer-Berry (FvCB)
QualiTree	Lescourret et al., 2011	Yes	No	Yes	No	No	photosynthesis-light response curve
VCHERRY	Lang G.A et Lang R.J., 2008	Yes	Yes	Yes	No indication	No indication	No indication

Depending on the model, management practices differ (Tab. III). As the main objective of FSPM models is to understand carbon allocation in the plant, all the examined FSPM models take into account pruning as a cultural operation. The impact of fruit load is also widely studied with FSMP models. This practice is represented in all models, except the SIMWAL model. Irrigation and fertilisation of fruit trees seem to be poorly represented in the models studied. For irrigation, only the QualiTree and L-Peach models are able to test the effect of irrigation on tree development. Fertilization is never mentioned in model descriptions. None of these models can represent cropping under trees. Simulation periods are rarely presented, but rarely exceed one or two years.

Table III: Summary of the management practices taken into account in fruit trees FSPM models.

Model	Publications	Fruit load management: Thinning	Pruning	Irrigation	Fertilisation
L-Peach	Allen et al., 2005, 2007 Smith et al., 2008 Lopez et al., 2010 Da Silva, Qin, et al., 2014	Yes	Yes	Yes	No indication
L-Kiwi	Cieslak et al., 2009 Cieslak et al., 2011 Cieslak et al., 2011	Partially	Yes	No indication	No indication
Apple	Seleznayova et al., 2018	No indication	Yes	No indication	No indication
MAppleT	Costes et al., 2008 Da Silva, Han et al., 2014 Pallas et al., 2016	Yes	Yes	No indication	No indication
IMApple	Kang et al., 2016	Yes	Yes	No indication	No indication
MUSCA	Reyes et al., 2018 Reyes et al., 2019	No indication	No indication	No indication	No indication
SIMWAL	Balandier et al., 2000	No	Yes	No	No
QualiTree	Lescourret et al., 2011 Mirás-Avalos et al., 2013 Mirás-Avalos et al., 2011	Yes	Yes	Yes	No indication
VCHERRY	Lang G.A et Lang R.J., 2008	Yes	Yes	No indication	No indication

One strong limitation of FSPM is that the generally short time step (minute or hour) prevents simulation of the development of the tree from the plantation to the end of its life. The representation of all the organs generates huge datasets for an adult tree that require high computation resources. Therefore, these models tend to be used to simulate only young trees. Another limitation of these models is that they do not consider the environment in which the tree evolves, apart from incident radiation. And yet, biotic and abiotic constraints, as well as management practices, have a direct effect on vegetative development as well as on fruiting and fruit development.

3.5 Coarse architectural scale: compartments models

Coarse architectural scale models (or compartments models) often take the form of compartments, where all organs of a certain type are pooled (i.e. contrary to FSPM, the architecture is not taken into account explicitly). The number of organs or the biomass in each compartment are the state variables, and fluxes of matter between the different compartments are driven by equations supposed to represent the biological mechanisms. Mechanistic process-based fruit tree models have been developed since the 1990s on various temperate fruit tree species: peach, olive, kiwi and apple trees.

In the literature, several coarse architectural scale models have been developed since the 1990s to simulate the development of fruit trees (e.g. peach, kiwi, apple and olive). We will focus here on the comparison between these models, since the description of each individual model is available in the Supplementary Information B. These 12 non-fine architectural scale fruit tree models are those described in the following papers: Grossman et al., 1994, Abdel-Razik, 1989, Gutierrez et al., 2009, Viola et al., 2012, Maselli et al., 2012, Morales et al., 2016, OliveCan (López-Bernal et al., 2018), Moriondo et al., 2019, Buwalda et al., 1991, Lakso et al., 1999, CLM5-Fruit Tree model (Dombrowski et al., 2022) and Bevacqua et al., 2021.

Similarly to FSPM models, coarse architectural scale models represent the development of a fruit tree according to more or less divergent representation methods depending on the mechanisms represented (Tab.IV). For photosynthesis representation, three models used Farquhar-von Caemmerer-Berry (FvCB) formalisms, four models used Photosynthesis-light response curve and the MaluSim model used another light model, the Charles-Edwards model, which calculates the interception of light by the plant under

the assumption that the leaves are uniformly distributed (Charles-Edwards & Thornley, 1973). The root system and the fruit compartment are present in all models. However, depending on the model, it can be more or less simplified.

The phenomenon of irregularity of production, which is often termed “alternate bearing” when displaying a typical ON-OFF fruiting pattern across consecutive years, is rarely discussed in the literature of fruit tree models. Due to multiple endogenous and exogenous factors causing it, the irregularity of production is difficult to predict. Only the CLM5-Fruit Tree model explicitly takes into account the dynamics of fruit production (inter-annual production). Some models do not take it into account the inter-annual production and for some of them no information is available in the literature. Only the CLM5-Fruit-Tree model is able to represent the dynamics of fruit production.

Table IV: Summary of the different formalisms of compartment fruit trees models.

Model	Publications	Roots	Rootstock	Fruits compartment	Inter-annual production	Inter-annual tree growth	Photosynthesis
	Grossman et al., 1994	Yes	No	Yes	No indication	No indication	Farquhar-von Caemmerer-berry (fvcb)
	Abdel-Razik, 1989	Yes	No	Yes	No indication	No indication	Photosynthesis-light response curve
	Gutierrez et al., 2009	Yes	Yes	Yes	No indication	No indication	Photosynthesis-light response curve
	Viola et al., 2012	Yes	No	Yes	No indication	Yes	No indication
	Maselli et al., 2012	Yes	No	Yes	No indication	No indication	No indication
	Morales et al., 2016	Yes	No	Yes	No indication	No indication	Farquhar-von Caemmerer-berry (fvcb)
OliveCan	López-Bernal et al., 2018	Yes	No	Yes	No	No indication	Farquhar-von Caemmerer-berry (fvcb)
	Moriondo et al., 2019	Yes	No	Yes	No	No	Photosynthesis-light response curve
	Buwalda et al., 1991	Yes	Yes	Yes	No indication	No indication	No indication
MaluSim	Lakso et al., 1999 Lordan et al., 2019	Yes	No	Yes	No	No	Charles-Edwards model
CLM5-Fruit-Tree model	Dombrowski et al., 2022	Yes	No	Yes	Yes	Yes	No indication
	Bevacqua et al., 2021	Yes	No indication	Yes	No indication	No indication	Photosynthesis-light response curve

The fruit tree models also differ in terms of their representation of space. Only the models of Morales et al. (2016) and López-Bernal et al. (2018) are three-dimensional and allow representing some aspects of the spatial heterogeneity, which is an important feature of agroforestry systems. However, only the model of Moriondo et al. 2019 is able to represent cropping under trees. Simulation periods are rarely presented. Depending on the model, management practices are not always taken into account (Tab. V). Some models do not represent management practices at all, such as landscape spatial scale models: Gutierrez et al. (2009) and Maselli et al. (2012). Although widely used in arboriculture, irrigation and fertilization are not necessarily represented in all models. Pruning or management of the fruit tree canopy is rarely represented: only the models by Abdel-Razik. (1989), Morales et al. (2016), López-Bernal et

al. (2018), Dombrowski et al. (2022) and Bevacqua et al. (2021) incorporate them. Fruit load management through fruit thinning, rather than by pruning, is rarely represented in the models (except for the models developed by Grossman et al. (1994) and Bevacqua et al. (2021)). In addition, only fruit quantity is represented and fruit quality is never considered.

Table V: Summary of the several aspects on the fruit trees non-fine architectural scale models.

bibliography	species	Dimension	spatial scale	pruning	irrigation	fertilisation	fruit load management	Resource competition	Fruit quality	Crops species
Grossman et al., 1994	Peach	0d	Field	No indication	No	No	Yes	No indication	No indication	No
Abdel-Razik, 1989	Olive	0d	Field	Yes	Yes	Yes	No indication	No indication	No indication	No
Gutierrez et al., 2009	Olive	2d	Landscape	No	No	No	No	No	No	No
Viola et al., 2012	Olive	2d	Field	No	Yes	No indication	No indication	No indication	No indication	No
Maselli et al., 2012	Olive	2d	Landscape	No	No	No	No	No	No	No
Morales et al., 2016	Olive	3d	Field	Yes	No	No	No	Yes	No	No
López-Bernal et al., 2018	Olive	3d	Field	Yes	Yes	No	No	Yes	No	No
Moriondo et al., 2019	Olive	2d	Field	No	Yes	No	No	No	No	Yes
Buwalda et al., 1991	Kiwi	0d	Field	No	No	No	No	No	No	No
Lakso et al., 1999	Apple	0d	Field	No	No	No	No	No	No	No
Lordan et al., 2019										
Dombrowski et al., 2022	Apple	No indication	Field	Yes	Yes	Yes	No	No	No	No indication
Bevacqua et al., 2021	Peach	0d	Field	Yes	No indication	No indication	Yes	No indication	No indication	No

The model of Moriondo et al., 2019 could be further developed to represent and simulate the functioning of fruit-based agroforestry systems. Indeed, it is the only model that integrates crops under the fruit tree. However, it lacks the representation of important cultural operations such as fertilisation, canopy management, etc. Other models, such as those of Morales et al. 2016 and López-Bernal et al. 2018, can also be developed, by integrating crops under the trees and implementing other fruit management practices.

One strong limitation of compartmental models is the time step of the simulation. Most of the models have a daily time step, which is a compromise between calculation time and simplification. Because of this time step, the effects of some climatic hazards (including frost) are difficult to model. Indeed, the number of hours during which temperature is below a threshold is important to determine frost damage

(Rodrigo, 2000; Strang et al., 1980). An hourly time step at certain key points of fruit development may be required. In the future, with the development of computer power and the widespread availability of weather data at the hourly time scale, these models could be adapted to take into account hourly weather data at least during the critical phenological stages. Another limitation of these models is that pests *sensu lato* (including diseases) are not taken into account (except one pest for the model of Gutierrez et al. (2009)). The damage caused by the pests can be very consequent and impact in particular fruit production. Induced by many factors, their consideration in the future will not be straightforward.

3.6 Diversity of plot-scale models of tree-crop associations

In the literature, various types of agroforestry models have been developed: i) allometric models, ii) no growth models of soil carbon, iii) plot scale models of tree and crop growth, iv) architectural models, v) farm decision models, vi) landscape models (Burgess et al., 2019; Luedeling et al., 2016). To represent the development of an FT-AFS, the model should be able to simulate the development of the tree in three dimensions (spatial heterogeneity of competitions between tree and crops) and take into account different cultural operations. Thus, the most relevant models to reach this goal are the plot scale models of tree and crop growth.

A comprehensive review of agroforestry models presented by Burgess et al. 2019, detailed the three plot scale models : i) Yield-Safe (Van der Werf et al., 2007 ; Graves et al. 2010), ii) WaNulCas (Van Noordwijk & Lusiana, 1999), iii) Hi-sAFe (Dupraz et al., 2019) (Tab.V). These three agroforestry models are described in Supplementary Information C. Another review of agroforestry models presented by Kraft et al. (2021) mentioned other agroforestry models (Kraft et al., 2021), such as APSIM (P. J. Smethurst et al., 2017), SCUAF (Young, 1998), EPIC (Easterling et al., 1997), SBELTS (Qi et al., 2001), WIMISIA (Mayus et al., 1999), COMP8 (P. Smethurst & Comerford, 1993), DynACof (Vezy et al., 2020), HyPAR models (Mobbs et al., 1998).

These 11 agroforestry models are compared to each other in table VI.

Table VI: Summary of the description of the different process-based agroforestry models.

Models	Dimension	Stress	Irrigation	Fertilisation	Forest tree	Fruit tree
Yield-SAFE	1	Water, light	Yes	No	Yes	No
WaNulCas	2	Water, nitrogen, light	Yes	Yes	Yes	No
Hi-sAFe	3	Water, nitrogen, light	Yes	Yes	Yes	No
APSIM	2	Water, nitrogen, light	Yes	Yes	Yes	No
SCUAF		Water, nitrogen, phosphorus		Yes	Yes	Yes
EPIC	2	Water, nitrogen, phosphorus	Yes	Yes	Yes	No
SBELTS	1		Yes	No	Yes	No
WIMISIA	2	Water, light			Yes	No
COMP8	2	Potassium and phosphorus			Yes	No

DynACof	3	Water, nitrogen			Yes	No
HyPAR		Water, nitrogen			Yes	No

In order to simulate the development of an agroforestry system including fruit trees, some models appear less adapted. Each model has its own specificities. The COMP8 model does not consider intercropping but only permanent grassing. The EPIC, Sbelts and Wimisia models are adapted to represent only windbreak agroforestry systems. The DynACof model is adapted to represent coffee-based agroforestry systems. These models seem less adapted to simulate temperate FT-AFS.

Due to its 1-dimensional nature, Yield-SAFE cannot take into account the spatial heterogeneity of competition between tree and crops. But, this model is relevant to test the productivity of agroforestry systems at a larger scale (Palma et al., 2007). The WaNuCas model is limited by its two dimensions, especially at temperate latitudes where the elevation of the sun in the sky is low. Indeed, these two dimensions effectively correspond to the assumption that the interception of light is identical on the west-east side as on the north-south side (Burgess et al., 2019 ; Hussain et al. 2016). This inaccuracy leads to an error in approximation of light interception and indirectly on photosynthates production. The APSIM model is also limited by its two dimensions. This model does not provide the capability to simulate different species in the same field. The SCUAF model does not consider different crops and tree species. The Hi-sAFe model, in three dimensions, permits reducing this approximation, and offers belowground competition in 3D, which is a key improvement for predicting water and nitrogen uptake by trees and crops.

The Hi-sAFe model seems to be the most appropriate model according to the selected criteria. This model simulates 3-dimensional systems and therefore allows for spatial heterogeneity of competitions between trees and crops to be taken into account. This model, like other agroforestry models, simulates systems over long enough periods (several years) to represent the phenomena of complementarity and competition. Finally, this model integrates some cultural operations such as irrigation, fertilisation, pruning of lower tree-branched and root-pruning. This model does not seem to be able to simulate fruit tree systems yet. The development of this model and the addition of new processes are necessary to simulate FT-AFS. However, other models such as DynaCof seem equally relevant to develop. This model could be adapted by adding mechanisms to represent temperate agroforestry systems.

4) Discussion: choosing the appropriate model for the simulation of FT-AFS

4.1 The choice of the model depends on the simulation objectives

This review shows the diversity of models that have been developed to simulate fruit tree or agroforestry systems. Each model was written for a specific context and towards specific objectives. As a result, models differ in terms of the level of detail in the simulated processes, spatial dimensions, time periods, or ability to simulate various different agricultural practices.

In order to avoid having to develop from scratch a model for each new scientific question, it should be possible to re-use/adapt existing models. But choosing the right model to start from might not be easy as models differ according to several criteria, such as the species for which they were developed and parameterized, the processes they simulate or the management operations they allow representing. Arguably, the latter two aspects are more important than the first one, because the strength of mechanistic models is their genericity: they constitute important ecophysiological processes that are

shared among fruit trees, and only the values of the parameters differ between species. Thus, the choice of a model should rather be based on the level of detail of the processes that they represent and on the type of cultural operations that they allow simulating than on the species for which it was initially developed. In other words, if the initial model is parsimonious in terms of parameters/variables/processes, then it should not be too complicated to adapt to a species that behaves similarly. The same is likely to be true if we consider tropical vs temperate models. Another important criterion for the choice of a model is of course that it must be validated against field measurements. Even when it is, adaptation to another tree species will require further validation based on observations of the new species.

Here, we propose a typology of fruit tree models according to the processes/cultural practices that they can include. This classification can then be used to choose the right model as a function of the level of detail that modellers wish for the model, according to their simulation objectives (Fig. 3). Indeed, an important rule in modelling is to stay as simple as possible, but not simpler, so the classification starts from the simplest model, and goes towards more complexity.

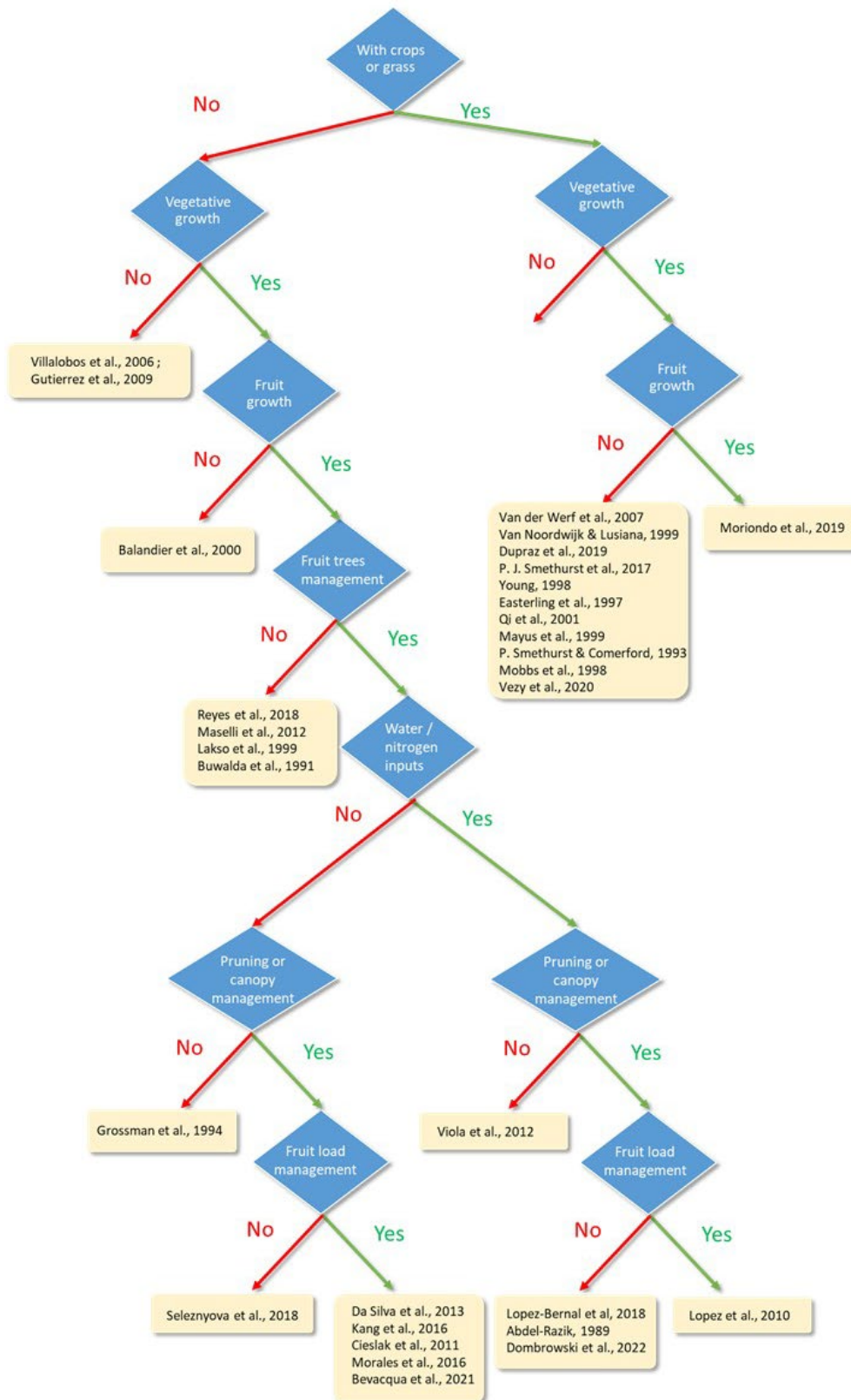


Figure 3: Choosing a fruit tree model according to the user's needs in terms of elements of the cropping system to represent. Twenty models classified according to the simulation of: i) biotic interactions with crops or grass, ii) vegetative growth, iii) fruit development, iv) fruit development, v) fruit tree management, vi) irrigation and/or fertilization, vii) pruning or canopy management, viii) fruit load management.

4.2 No existing model is able to simulate FT-AFS, but some could be improved to reach this goal

None of the reviewed models can integrate all processes to simulate agroforestry systems based on temperate fruit tree, i.e. simulate both the interactions (competition for light, water, nutrients, facilitation through buffered microclimate or increased infiltration) between trees and crops in space and time, and the development and growth of fruits and associated management. Based on the three criteria we defined (1) space in 3D to represent tree-crop interactions, 2) time with a sufficiently long time period, 3) cultural operations (considering the four most important: irrigation, fertilisation, fruit load management, pruning) taken into account, two models appear almost suitable:

- the model of Moriondo et al. (2019) partially validates two criteria. This model allows simulation of the development of an orchard associated with different crops over several years. However, the model represents this interaction in 2D only and does not consider the heterogeneity of shading on crops or grass. For the cultural operations, only irrigation is considered. The model does not integrate fertilisation, tree pruning or fruit load management.
- the Hi-sAFe model, meets completely two of the three criteria: 3D representation of space, simulation of tree growth over several years at a daily time scale, and simulates all cultural operations of the crop and some of the tree management operations. However, this model lacks the representation of the fruits and associated practices.

These two models could be enhanced by adding the missing features. For example, work is currently under progress to improve the Hi-sAFe model by adding a tree fruit compartment and the related processes (fruit setting, carbon allocation to fruits) and cultural operations (fruit load management), and by adding more types of pruning, required for the management of fruit trees (canopy trimming, canopy topping, canopy thinning). This literature review was conducted only on models elaborated on temperate species. But, other models on tropical fruit tree species exist, (such as V-Mango (Boudon et al., 2020) or physiological models of coffee or coca (Van Oijen et al., 2009),) and could partly fulfil the three criteria and or at least provide some formalisms that could be revalorized. It is also worth noting that the validity of the models should be explored, which constitutes an important criterion for the utilisation of a model. If formalisms are implemented, the model should be recalibrated and validated using independent datasets.

4.3 Other desirable features for future FT-AFS models

The vast majority of models were parameterized only for an archetypal individual of a given species and do not examine the intra-specific variability. However, due to human selection of diverse cultivars for various cropping situations and final use, the intra-specific variability in tree size, shape, fruit load, fruit size, etc. is huge. Parameterization of all the parameters on the selected cultivar would increase the reliability of the simulations (but would of course come at the price of having to measure all parameters in all cultivars). A more reasonable alternative would be to identify which parameters are most cultivar-dependent, and measure only these parameters for each cultivar, the other parameters being fixed for a given species. These cultivar-dependent parameters could be parameters linked to the adaptation to local climates (e.g. phenological parameters) or to specific commercialisation requirements (e.g. parameters driving fruit size and quality).

Indeed, fruit quality is an important aspect for fruit growers, which is often overlooked by fruit tree models (among the 21 fruit trees models described here, only the Qualitree model (Lescourret et al.,

2011) considers yield quality through the concentration of certain sugars in the fruit). Other variables concerning yield quality could be taken into account in fruit tree models such as oil content (e.g. for olive trees), concentration of certain molecules, fruit firmness, etc. (Saldaña et al., 2013).

In these models, none of them consider all pests and crop auxiliaries. Some incorporate only one pest, such as the model of Gutierrez et al by taking into account the olive fly effect. These models can still evolve to incorporate biotic components, such as pests and crop auxiliaries.

Conclusion and perspectives

Fruit tree based agroforestry systems are attractive to farmers, as the fruits of the trees provide rapidly, in a few years, an annual income, while timber tree based agroforestry systems do not provide any revenue from the tree in the short or medium term. This may explain why FT-AFS are currently more attractive and adopted by European or North American farmers than timber tree based systems (Lauri et al, 2016). But these systems have not been intensively researched nor practised, and virtual experiments are likely to help more accurately design fruit tree-based agroforestry models.

In this review, no existing model has been identified to simulate the development of a temperate FT-AFS. The literature search focused on temperate fruit trees and agroforestry models and identified 32 models with very different objectives. None of the fruit tree models meets the three criteria that we deemed most important to simulate FT-AFS ((i) 3D growth, ii) long time period, iii) management practises). However, the model of Moriondo et al. (2019) partially meets the criteria of modelling both fruit tree and crop growth, with a simulation time over several years). Similarly, none of the agroforestry models meets the three stated criteria. However, the Hi-sAFe model partially meets the criteria (fruit trees and crops growth in 3D, simulation over the life of the system, some management practices operations). In order to meet the specified criteria, these two models could be adapted by adding several processes and re-calibrating/validating the models using independent datasets. This review also provides model users with a decision support tree to guide the user to the model that meets their simulation objectives.

Models able to simulate FT-AFS could then be used to predict the system yields and ecosystem services in different pedoclimatic conditions. These models could also be used to optimise the dynamic spatial arrangements, by testing different tree density, tree-crop distances, crop rotation. By using predicted future climatic conditions, the model can also be used to explore the resilience to climate change of FT-AFS. Implementation of FT-AFS optimisation thanks to models will foster a more resilient and more sustainable horticultural production.

Bibliography

- Abdel-Razik, M. (1989). A model of the productivity of olive trees under optional water and nutrient supply in desert conditions. *Ecological Modelling*, 45(3), 179-204.
- Allen, M. T., Prusinkiewicz, P., & DeJong, T. M. (2005). Using L-systems for modeling source–sink interactions, architecture and physiology of growing trees : The L-PEACH model. *New Phytologist*, 166(3), 869-880.
- Allen, M. T., Prusinkiewicz, P., Favreau, R. R., & Dejong, T. M. (2007). L-Peach, an L-System-Based Model for Simulating Architecture, Carbohydrate Source–Sink Interactions and Physiological Responses of Growing Trees. In J. Vos, L. F. M. Marcelis, P. H. B. De Visser, P. C. Struik, & J. B.

- Evers (Éds.), *Functional-Structural Plant Modelling in Crop Production* (p. 139-150). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/1-4020-6034-3_12
- Balandier, P., Lacoïnte, A., Le Roux, X., Sinoquet, H., Cruiziat, P., & Le Dizès, S. (2000). SIMWAL : A structural-functional model simulating single walnut tree growth in response to climate and pruning. *Annals of Forest Science*, 57(5), 571-585. <https://doi.org/10.1051/forest:2000143>
- Bene, J., Beall, H., & Côté, A. (1977). *Trees, food and people : Land management in the tropics*. IDRC, Ottawa, ON, CA.
- Bentrup, G., Hopwood, J., Adamson, N. L., & Vaughan, M. (2019). Temperate Agroforestry Systems and Insect Pollinators : A Review. *Forests*, 10(11), 981. <https://doi.org/10.3390/f10110981>
- Bevacqua, D., Melià, P., Cividini, M., Mattioli, F., Lescourret, F., Génard, M., & Casagrandi, R. (2021). A parsimonious mechanistic model of reproductive and vegetative growth in fruit trees predicts consequences of fruit thinning and branch pruning. *Tree Physiology*, 41(10), 1794-1807. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpab050>
- Boudon, F., Persello, S., Jestin, A., Briand, A.-S., Grechi, I., Fernique, P., Guédon, Y., Léchaudel, M., Lauri, P.-É., & Normand, F. (2020). V-Mango : A functional-structural model of mango tree growth, development and fruit production. *Annals of Botany*, 126(4), 745-763. <https://doi.org/10.1093/aob/mcaa089>
- Brisson, N., Launay, M., Mary, B., & Beaudoin, N. (2009). *Conceptual Basis, Formalisations and Parameterization of the Stics Crop Model*. Editions Quae; 13. <http://international.scholarvox.com/book/40000894>
- Burgess, P., Graves, A., Palma, J., Dupraz, C., & van Noordwijk, M. (2019). Modelling agroforestry systems. In *Burleigh Dodds Series in Agricultural Science* (p. 209-238). Burleigh Dodds Science Publishing. <https://doi.org/10.19103/AS.2018.0041.13>
- Buwalda, J. G. (1991). A mathematical model of carbon acquisition and utilisation by kiwifruit vines. *Ecological Modelling*, 57(1-2), 43-64. [https://doi.org/10.1016/0304-3800\(91\)90054-5](https://doi.org/10.1016/0304-3800(91)90054-5)
- Charles-Edwards, D., & Thornley, J. (1973). Light interception by an isolated plant a simple model. *Annals of Botany*, 37(4), 919-928.
- Cieslak, m, Seleznyova, A. N., & Hanan, J. (2009). A functional-structural kiwifruit vine model. In *2009 Third International Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications*.
- Cieslak, M., Seleznyova, A. N., & Hanan, J. (2011). A functional-structural kiwifruit vine model integrating architecture, carbon dynamics and effects of the environment. *Annals of Botany*, 107(5), 747-764. <https://doi.org/10.1093/aob/mcq180>
- Cieslak, M., Seleznyova, A. N., Prusinkiewicz, P., & Hanan, J. (2011). Towards aspect-oriented functional-structural plant modelling. *Annals of Botany*, 108(6), 1025-1041. <https://doi.org/10.1093/aob/mcr121>
- Costes, E., Smith, C., Renton, M., Guédon, Y., Prusinkiewicz, P., & Godin, C. (2008). MAppleT : Simulation of apple tree development using mixed stochastic and biomechanical models. *Functional Plant Biology*, 35(10), 936. <https://doi.org/10.1071/FP08081>
- Da Silva, D., Han, L., & Costes, E. (2014). Light interception efficiency of apple trees : A multiscale computational study based on MAppleT. *Ecological Modelling*, 290, 45-53. 192. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.12.001>

- Da Silva, D., Qin, L., DeBuse, C., & DeJong, T. M. (2014). Measuring and modelling seasonal patterns of carbohydrate storage and mobilization in the trunks and root crowns of peach trees. *Annals of Botany*, *114*(4), 643-652. <https://doi.org/10.1093/aob/mcu033>
- Deng, Z., Guan, H., Hutson, J., Forster, M. A., Wang, Y., & Simmons, C. T. (2017). A vegetation-focused soil-plant-atmospheric continuum model to study hydrodynamic soil-plant water relations. *Water Resources Research*, *53*(6), 4965-4983. 87. <https://doi.org/10.1002/2017WR020467>
- Dollinger, J., & Jose, S. (2018). Agroforestry for soil health. *Agroforestry Systems*, *92*(2), 213-219. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0223-9>
- Dombrowski, O., Brogi, C., Hendricks Franssen, H.-J., Zanotelli, D., & Bogen, H. (2022). CLM5-FruitTree: A new sub-model for deciduous fruit trees in the Community Land Model (CLM5). *Geoscientific Model Development*, *15*(13), 5167-5193. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-5167-2022>
- Dupraz, C., Blitz-Frayret, C., Lecomte, I., Molto, Q., Reyes, F., & Gosme, M. (2018). Influence of latitude on the light availability for intercrops in an agroforestry alley-cropping system. *Agroforestry Systems*, *92*(4), 1019-1033. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0214-x>
- Dupraz, C., Lawson, G. J., Lamersdorf, N., Papanastasis, V. P., Rosati, A., & Ruiz-Mirazo, J. (2018). Temperate agroforestry : The European way. In A. M. Gordon, S. M. Newman, & B. R. W. Coleman (Éds.), *Temperate agroforestry systems* (2^e éd., p. 98-152). CABI. <https://doi.org/10.1079/9781780644851.0098>
- Dupraz, C., Wolz, K., Lecomte, I., Talbot, G., Vincent, G., Mulia, R., Bussi re, F., Ozier-Lafontaine, H., Andrianarisoa, S., Jackson, N., Lawson, G., Dones, N., Sinoquet, H., Lusiana, B., Harja, D., Domenicano, S., Reyes, F., Gosme, M., & Van Noordwijk, M. (2019). Hi-sAFe : A 3D Agroforestry Model for Integrating Dynamic Tree–Crop Interactions. *Sustainability*, *11*(8), 2293. 6. <https://doi.org/10.3390/su11082293>
- Easterling, W. E., Hays, C. J., Easterling, M. M., & Brandle, J. R. (1997). Modelling the effect of shelterbelts on maize productivity under climate change : An application of the EPIC model. *Agriculture, ecosystems & environment*, *61*(2-3), 163-176.
- Gjamovski, V., & Kiprijanovski, M. (2011). Influence of nine dwarfing apple rootstocks on vigour and productivity of apple cultivar ‘Granny Smith’. *Scientia Horticulturae*, *129*(4), 742-746. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.05.032>
- Graves, A. R., Burgess, P. J., Palma, J., Keesman, K. J., van der Werf, W., Dupraz, C., van Keulen, H., Herzog, F., & Mayus, M. (2010). Implementation and calibration of the parameter-sparse Yield-SAFE model to predict production and land equivalent ratio in mixed tree and crop systems under two contrasting production situations in Europe. *Ecological Modelling*, *221*(13-14), 1744-1756. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.03.008>
- Grisafi, F., DeJong, T. M., & Tombesi, S. (2022). Fruit tree crop models : An update. *Tree Physiology*, *42*(3), 441-457.
- Grossman, Y. L., & DeJong, T. M. (1994). PEACH : A simulation model of reproductive and vegetative growth in peach trees. *Tree Physiology*, *14*(4), 329-345. 186. <https://doi.org/10.1093/treephys/14.4.329>
- Gutierrez, A. P., Ponti, L., & Cossu, Q. A. (2009). Effects of climate warming on Olive and olive fly (*Bactrocera oleae* (Gmelin)) in California and Italy. *Climatic Change*, *95*(1-2), 195-217. 65. <https://doi.org/10.1007/s10584-008-9528-4>

- Hernández-Morcillo, M., Burgess, P., Mirck, J., Pantera, A., & Plieninger, T. (2018). Scanning agroforestry-based solutions for climate change mitigation and adaptation in Europe. *Environmental Science & Policy*, *80*, 44-52. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.11.013>
- Hussain, K., Wonglecharoen, C., Hilger, T., Ahmad, A., Kongkaew, T., & Cadisch, G. (2016). Modelling resource competition and its mitigation at the crop-soil-hedge interface using WaNuLCAS. *Agroforestry Systems*, *90*(6), 1025-1044. <https://doi.org/10.1007/s10457-015-9881-z>
- Inderjit, & Nilsen, E. T. (2003). Bioassays and Field Studies for Allelopathy in Terrestrial Plants : Progress and Problems. *Critical Reviews in Plant Sciences*, *22*(3-4), 221-238. <https://doi.org/10.1080/713610857>
- Jiménez, C. M., & Díaz, J. B. R. (2003). Statistical Model Estimates Potential Yields in Pear Cultivars ‘Blanquilla’ and ‘Conference’ before Bloom. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, *4*(128), 452-457. 193.
- Jose, S. (2009). Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: An overview. *Agroforestry Systems*, *76*(1), 1-10. <https://doi.org/10.1007/s10457-009-9229-7>
- Kang, H., Fiser, M., Shi, B., Sheibani, F., Hirst, P., & Benes, B. (2016). IMapple—Functional structural model of apple trees. *2016 IEEE International Conference on Functional-Structural Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications (FSPMA)*, 90-97. <https://doi.org/10.1109/FSPMA.2016.7818293>
- Kraft, P., Rezaei, E. E., Breuer, L., Ewert, F., Große-Stoltenberg, A., Kleinebecker, T., Seserman, D.-M., & Nendel, C. (2021). Modelling Agroforestry’s Contributions to People—A Review of Available Models. *Agronomy*, *11*(11), 2106. <https://doi.org/10.3390/agronomy11112106>
- Lakso, A. N., Wünsche, J. N., Palmer, J. W., & Grappadelli, L. C. (1999). Measurement and Modeling of Carbon Balance of the Apple Tree. *HortScience*, *34*(6), 1040-1047. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.34.6.1040>
- Lang, G. A., & Lang, R. J. (2008). VCHERRY – An Interactive Growth, Training and Fruiting Model to Simulate Sweet Cherry Tree Development, Yield and Fruit Size. *Acta Horticulturae*, *803*(803), 8.
- Lauri, P. -e., Maguylo, K., & Trottier, C. (2006). Architecture and size relations : An essay on the apple (*Malus x domestica*, Rosaceae) tree. *American Journal of Botany*, *93*(3), 357-368. <https://doi.org/10.3732/ajb.93.3.357>
- Lauri, P.-É., Barkaoui, K., Ater, M., & Rosati, A. (2019). Agroforestry for fruit trees in Europe and Mediterranean North Africa. In *Burleigh Dodds Series in Agricultural Science* (p. 385-418). Burleigh Dodds Science Publishing. <https://doi.org/10.19103/AS.2018.0041.18>
- Lawson, G. (2023). 22. Agroforestry Definitions in the New CAP (Version 1). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7828435>
- Lawson, G., Rolo, V., Huska, J., & Gosme, M. (2023). Agroforestry & Adaptation to Climate Change (Version 2). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8371908>
- Lescourret, F., Moitrier, N., Valsesia, P., & Génard, M. (2011). QualiTree, a virtual fruit tree to study the management of fruit quality. I. Model development. *Trees*, *25*(3), 519-530. 194. <https://doi.org/10.1007/s00468-010-0531-9>
- Lopez, G., Favreau, R. R., Smith, C., & DeJong, T. M. (2010). L-PEACH : A Computer-based Model to Understand How Peach Trees Grow. *HortTechnology*, *20*(6), 983-990. 187. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.20.6.983>

- López-Bernal, Á., Morales, A., García-Tejera, O., Testi, L., Orgaz, F., De Melo-Abreu, J. P., & Villalobos, F. J. (2018). OliveCan : A Process-Based Model of Development, Growth and Yield of Olive Orchards. *Frontiers in Plant Science*, *9*, 632. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00632>
- Lordan, J., Reginato, G. H., Lakso, A. N., Francescato, P., & Robinson, T. L. (2019). Natural fruitlet abscission as related to apple tree carbon balance estimated with the MaluSim model. *Scientia Horticulturae*, *247*, 296-309. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.11.049>
- Luedeling, E., Smethurst, P. J., Baudron, F., Bayala, J., Huth, N. I., van Noordwijk, M., Ong, C. K., Mulia, R., Lusiana, B., Muthuri, C., & Sinclair, F. L. (2016). Field-scale modeling of tree–crop interactions: Challenges and development needs. *Agricultural Systems*, *142*, 51-69. 18. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2015.11.005>
- Maselli, F., Chiesi, M., Brilli, L., & Moriondo, M. (2012). Simulation of olive fruit yield in Tuscany through the integration of remote sensing and ground data. *Ecological Modelling*, *244*, 1-12. 67. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.06.028>
- Mayus, M., Keulen, H. V., & Stroosnijder, L. (1999). A model of tree-crop competition for windbreak systems in the Sahel: Description and evaluation. In *Agroforestry for Sustainable Land-Use Fundamental Research and Modelling with Emphasis on Temperate and Mediterranean Applications* (p. 183-201). Springer.
- McCown, R. L., Hammer, G. L., Hargreaves, J. N. G., Holzworth, D. P., & Freebairn, D. M. (1996). APSIM : A novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research. *Agricultural Systems*, *50*(3), 255-271. [https://doi.org/10.1016/0308-521X\(94\)00055-V](https://doi.org/10.1016/0308-521X(94)00055-V)
- Mirás-Avalos, J. M., Alcobendas, R., Alarcón, J. J., Pedrero, F., Valsesia, P., Lescourret, F., & Nicolás, E. (2013). Combined effects of water stress and fruit thinning on fruit and vegetative growth of a very early-maturing peach cultivar: Assessment by means of a fruit tree model, QualiTree. *Irrigation Science*, *31*(5), 1039-1051. 196. <https://doi.org/10.1007/s00271-012-0385-6>
- Mirás-Avalos, J. M., Egea, G., Nicolás, E., Génard, M., Vercambre, G., Moitrier, N., Valsesia, P., González-Real, M. M., Bussi, C., & Lescourret, F. (2011). QualiTree, a virtual fruit tree to study the management of fruit quality. II. Parameterisation for peach, analysis of growth-related processes and agronomic scenarios. *Trees*, *25*(5), 785-799. 195. <https://doi.org/10.1007/s00468-011-0555-9>
- Mobbs, D., Cannell, M., Crout, N., Lawson, G., Friend, A., & Arah, J. (1998). Complementarity of light and water use in tropical agroforests : I. Theoretical model outline, performance and sensitivity. *Forest Ecology and Management*, *102*(2-3), 259-274.
- Morales, A., Leffelaar, P. A., Testi, L., Orgaz, F., & Villalobos, F. J. (2016). A dynamic model of potential growth of olive (*Olea europaea* L.) orchards. *European Journal of Agronomy*, *74*, 93-102. 70. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.12.006>
- Moriondo, M., Leolini, L., Brilli, L., Dibari, C., Tognetti, R., Giovannelli, A., Rapi, B., Battista, P., Caruso, G., Gucci, R., Argenti, G., Raschi, A., Centritto, M., Cantini, C., & Bindi, M. (2019). A simple model simulating development and growth of an olive grove. *European Journal of Agronomy*, *105*, 129-145. 54. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.02.002>
- Pallas, B., Da Silva, D., Valsesia, P., Yang, W., Guillaume, O., Lauri, P.-E., Vercambre, G., Génard, M., & Costes, E. (2016). Simulation of carbon allocation and organ growth variability in apple tree by connecting architectural and source–sink models. *Annals of Botany*, *118*(2), 317-330. <https://doi.org/10.1093/aob/mcw085>

- Palma, J. H. N., Graves, A. R., Bunce, R. G. H., Burgess, P. J., de Filippi, R., Keesman, K. J., van Keulen, H., Liagre, F., Mayus, M., Moreno, G., Reisner, Y., & Herzog, F. (2007). Modeling environmental benefits of silvoarable agroforestry in Europe. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *119*(3-4), 320-334. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.07.021>
- Palma, J. H. N., Graves, A. R., Crous-Duran, J., Paulo, J. A., Oliveira, T. S., Garcia de Jalon, S., & Burgess, P. (2016). *Keeping a parameter-sparse concept in agroforestry modeling while integrating new processes and dynamics: New developments in Yield-SAFE*. In 3rd European Agroforestry Conference Montpellier EURAF, Montpellier.
- Pantera, A., Burgess, P. J., Mosquera Losada, R., Moreno, G., López-Díaz, M. L., Corroyer, N., McAdam, J., Rosati, A., Papadopoulos, A. M., Graves, A., Rigueiro Rodríguez, A., Ferreiro-Domínguez, N., Fernández Lorenzo, J. L., González-Hernández, M. P., Papanastasis, V. P., Mantzanas, K., Van Lerberghe, P., & Malignier, N. (2018). Agroforestry for high value tree systems in Europe. *Agroforestry Systems*, *92*(4), 945-959. 147. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0181-7>
- Pumariño, L., Sileshi, G. W., Gripenberg, S., Kaartinen, R., Barrios, E., Muchane, M. N., Midega, C., & Jonsson, M. (2015). Effects of agroforestry on pest, disease and weed control : A meta-analysis. *Basic and Applied Ecology*, *16*(7), 573-582. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2015.08.006>
- Qi, X., Mize, C., Batchelor, W., Takle, E., & Litvina, I. (2001). SBELTS: A model of soybean production under tree shelter. *Agroforestry systems*, *52*(1), 53-61.
- Quinkenstein, A., Wöllecke, J., Böhm, C., Grünewald, H., Freese, D., Schneider, B. U., & Hüttl, R. F. (2009). Ecological benefits of the alley cropping agroforestry system in sensitive regions of Europe. *Environmental Science & Policy*, *12*(8), 1112-1121. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2009.08.008>
- Ramachandran Nair, Nair, V. D., Mohan Kumar, B., & Showalter, J. M. (2010). Carbon Sequestration in Agroforestry Systems. In *Advances in Agronomy* (Vol. 108, p. 237-307). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)08005-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)08005-3)
- Reyes, F., Pallas, B., Pradal, C., Vaggi, F., Zanutelli, D., Tagliavini, M., Gianelle, D., & Costes, E. (2018). MuSCA : A multi-scale model to explore carbon allocation in plants. *BioRxiv*, *370189*. <https://doi.org/10.1101/370189>
- Reyes, F., Pallas, B., Pradal, C., Vaggi, F., Zanutelli, D., Tagliavini, M., Gianelle, D., & Costes, E. (2020). MuSCA : A multi-scale source–sink carbon allocation model to explore carbon allocation in plants. An application to static apple tree structures. *Annals of Botany*, *126*(4), 571-585. <https://doi.org/10.1093/aob/mcz122>
- Rodrigo, J. (2000). Spring frosts in deciduous fruit trees—Morphological damage and flower hardiness. *Scientia Horticulturae*, *85*(3), 155-173.
- Rolo, V., Rivest, D., Maillard, E., & Moreno, G. (2023). Agroforestry potential for adaptation to climate change: a soil-based perspective. *Soil Use and Management*, *39*(3), 1006-1032. <https://doi.org/10.1111/sum.12932>
- Saldaña, E., Siche, R., Luján, M., & Quevedo, R. (2013). Review : Computer vision applied to the inspection and quality control of fruits and vegetables. *Brazilian Journal of Food Technology*, *16*(4), 254-272. <https://doi.org/10.1590/S1981-67232013005000031>
- Seleznova, A. N., Saei, A., Han, L., & van Hooijdonk, B. M. (2018). From field data to modelling concepts : Building a mechanistic FSPM for apple. *2018 6th International Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications (PMA)*, 1-7. <https://doi.org/10.1109/PMA.2018.8611582>

- Sievänen, R., Godin, C., DeJong, T. M., & Nikinmaa, E. (2014). Functional–structural plant models : A growing paradigm for plant studies. *Annals of Botany*, *114*(4), 599-603. 185. <https://doi.org/10.1093/aob/mcu175>
- Smethurst, P., & Comerford, N. (1993). Potassium and phosphorus uptake by competing pine and grass : Observations and model verification. *Soil Science Society of America Journal*, *57*(6), 1602-1610.
- Smethurst, P. J., Huth, N. I., Masikati, P., Sileshi, G. W., Akinnifesi, F. K., Wilson, J., & Sinclair, F. (2017). Accurate crop yield predictions from modelling tree-crop interactions in gliricidia-maize agroforestry. *Agricultural Systems*, *155*, 70-77. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.04.008>
- Smith, C., Costes, E., Favreau, R., Lopez, G., & DeJong, T. (2008). Improving the architecture of simulated trees in L-peach by integrating Markov chains and responses to pruning. *Acta Horticulturae*, *803*, 201-208. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2008.803.26>
- Somarriba, E. (1992). Revisiting the past : An essay on agroforestry definition. *Agroforestry Systems*, *19*(3), 233-240. <https://doi.org/10.1007/BF00118781>
- Strang, J. G., Lombard, P. B., Westwood, M. N., & Weiser, C. J. (1980). Effect of Duration and Rate of Freezing and Tissue Hydration on ‘Bartlett’ Pear Buds, Flowers, and Small Fruit. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, *105*(1), 102-107. <https://doi.org/10.21273/JASHS.105.1.102>
- Torralba, M., Fagerholm, N., Burgess, P. J., Moreno, G., & Plieninger, T. (2016). Do European agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem services? A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *230*, 150-161. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.06.002>
- USDA Agroforestry Strategic Framework. (2011). *USDA Agroforestry Strategic Framework, Fiscal Year 2011–2016*. 166. https://www.usda.gov/sites/default/files/documents/AFStratFrame_FINAL-Ir_6-3-11.pdf
- Van der Werf, W., Keesman, K., Burgess, P., Graves, A., Pilbeam, D., Incoll, L. D., Metselaar, K., Mayus, M., Stappers, R., van Keulen, H., Palma, J., & Dupraz, C. (2007). Yield-SAFE : A parameter-sparse, process-based dynamic model for predicting resource capture, growth, and production in agroforestry systems. *Ecological Engineering*, *29*(4), 419-433. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.09.017>
- Van Noordwijk, M. (2018). Agroforestry as part of climate change response. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *200*, 012002. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/200/1/012002>
- Van Noordwijk, M., & Lusiana, B. (1999). WaNuLCAS, a model of water, nutrient and light capture in agroforestry systems. In D. Auclair & C. Dupraz (Éds.), *Agroforestry for Sustainable Land-Use Fundamental Research and Modelling with Emphasis on Temperate and Mediterranean Applications* (Vol. 60, p. 217-242). Springer Netherlands; 22. https://doi.org/10.1007/978-94-017-0679-7_14
- Van Oijen, M., Dauzat, J., Harmand, J. M., Lawson, G., & Vaast, P. (2009). Plot-scale modelling of coffee agroforestry systems in Central America. <https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/8473>
- Vandermeer, J. H. (1989). *The ecology of intercropping*. Cambridge University Press.
- Vezy, R., le Maire, G., Christina, M., Georgiou, S., Imbach, P., Hidalgo, H. G., Alfaro, E. J., Blitz-Frayret, C., Charbonnier, F., Lehner, P., Loustau, D., & Roupsard, O. (2020). DynACof : A process-based model to study growth, yield and ecosystem services of coffee agroforestry systems. *Environmental Modelling & Software*, *124*, 104609. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104609>

- Villalobos, F. J., Testi, L., Hidalgo, J., Pastor, M., & Orgaz, F. (2006). Modelling potential growth and yield of olive (*Olea europaea* L.) canopies. *European Journal of Agronomy*, 24(4), 296-303. 32. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2005.10.008>
- Viola, F., Valerio Noto, L., Cannarozzo, M., Loggia, G. L., & Porporato, A. (2012). Olive yield as a function of soil moisture dynamics. *Ecohydrology*, 5(1), 99-107. 66. <https://doi.org/10.1002/eco.208>
- Vos, J., Marcelis, L. F. M., & Evers, J. B. (2007). Functional-structural plant modelling in crop production : Adding a dimension. *Frontis*, 1-12.
- Wang, Y., Zhang, B., & Banwart, S. A. (2017). Reduced Subsurface Lateral Flow in Agroforestry System Is Balanced by Increased Water Retention Capacity. In *Advances in Agronomy* (Vol. 142, p. 73-97). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2016.10.005>
- Wolz, K. J., & DeLucia, E. H. (2018). Alley cropping : Global patterns of species composition and function. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 252, 61-68. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.10.005>
- Young, A. (1998). *SCUAF. Version 4 : A model to estimate soil changes under agriculture, agroforestry and forestry*. Australian Centre for International Agricultural Research.
- Zahoor, S., Dutt, V., Mughal, A. H., Pala, N. A., Qaisar, K. N., & Khan, P. A. (2021). Apple-based agroforestry systems for biomass production and carbon sequestration : Implication for food security and climate change contemplates in temperate region of Northern Himalaya, India. *Agroforestry Systems*, 95(2), 367-382. <https://doi.org/10.1007/s10457-021-00593-y>

Appendix I: Basic description of the FSPM temperate fruit tree models.

The L-Peach model is an FSPM model developed by Lopez., et al in the 2000s to understand the link between carbon allocation and peach tree architecture, with various water stress intensities and fruit loads. This 3D model allows simulating the growth and yield of a peach tree over several years. As input to the model, environmental variables are required such as daily solar radiation, daily maximum and minimum temperature. It is composed of four parts: i) tree architecture, ii) functional organs, iii) carbon allocation, iv) cultural operations. To constitute the peach tree architecture, the model is based on L-systems and Markovian concepts. To represent different organs, this model includes five aerial compartments: i) leaves, ii) fruits, iii) flowers, iv) buds, v) stem segments. The model formalisms allow representing various mechanisms: i) growth, ii) maintenance respiration, iii) carbohydrate storage, iv) carbohydrate remobilization. To simulate the effect of cultural operations on tree architecture, two cultural operations are considered: i) pruning (C. Smith et al., 2008), ii) fruit load management: thinning (Allen et al., 2005, 2007; Da Silva, Qin, et al., 2014; Lopez et al., 2010).

The QualiTree model was developed by Lescourret et al. (2011), also on peach species. The goal of this model is to represent the development of a fruit tree according to various cultural practices. This model is relevant to evaluate the impact of different cropping systems on tree architecture and yield quantity/quality. QualiTree is a mechanistic model based on carbon allocation in the plant, on tree management and permits to predict fruit quality. For carbon allocation, it is composed of different compartments: structural roots, fine roots, wood older than 1 year and production units. The tree is divided in “production units” composed of fruit, young leaves and wood less than one-year-old. Through a source-sink approach, the model simulates carbon assimilation by photosynthesis, carbon fluxes in the plant, carbon allocation to the various compartments and mobilization of reserve carbon. The simulation of the tree development is only possible on a part of the crop cycle, i.e. between flowering and the fruit growth end. The model integrates most of the cultural operations, such as fruit load management

(thinning), pruning, irrigation and tree management (Lescourret et al., 2011; Mirás-Avalos et al., 2011, 2013). Some elements are missing in this model, such as fertilization. The main limitation of QualiTree, as well as the other FSPM models, is its temporal dimension. Indeed, this model cannot simulate the growth of a tree over several years.

The L-Kiwi model was developed in the 2000s by Cieslak, et al, on the same concept that L-Peach,. This FSPM model is a 3D model whose objective is to represent the growth of the plant. The L-Kiwi model was used to better understand the influence of the distance between sink and source organs on the dynamics of carbon allocation in the plant. This model visualizes the phenomena of competition for carbon between several organs. It is composed of four parts: i) plant architecture, exogenous factors, carbon dynamics and growth regulation. At the architectural level, it is composed of metameres, nodes, different organs (leaves, fruits). It also integrates exogenous environmental factors (distribution of light radiation and air temperature) and the management of the plant (size and management system). Indeed, carbon is firstly synthesized by the plant during photosynthesis. Secondly, it is transported to the different carbon compartments and can also be stored. This model integrates a single cultivation operation: pruning (M Cieslak et al., 2009; M. Cieslak, Seleznyova, & Hanan, 2011; M. Cieslak, Seleznyova, Prusinkiewicz, et al., 2011).

The FSPM model (Apple) was created for apple trees (Seleznyova et al., 2018). This model, based on the formalisms of the Kiwifruit vine model, aims at representing the apple tree architecture. This Apple model was designed to explore the concentration of carbohydrate in the different compartments and the accumulation of starch in the fruits (Seleznyova et al., 2018) as a function of distance to roots. Some new formalisms were added, such as the rootstock (an important element to include for grafted trees)(Seleznyova et al., 2018).The rootstock can play an important role in growth, entry into production, fruit quality, fruiting potential and more generally on the development of the root system (Fallahi et al., 2002; Lauri et al., 2006)./

The MappleT model was developed by Costes, et al in the 2010s to represent the architectural development of apple trees as a function of pruning and thinning. This model, based on L-systems, associates both stochastic and biomechanical approaches. It represents the topology of the apple tree according to a stochastic model based on probability laws. The geometry of the apple tree, represented by a biomechanical model, allows to simulate the development of branches and fruits growth. At flowering time, the model calculates the number of flowers. Each flower becomes one fruit or dies. This formalism permits to simulate fruit load management techniques. During the crop cycle, biomass is sent to the fruit and allows to simulate the development of the fruit over time (Costes et al., 2008; Da Silva, Han, et al., 2014; Pallas et al., 2016).

The IMapple model was developed by Kang., et al in 2016 to understand the link between development of apple trees and the management practises (such as pruning and fruit load management: thinning) (Kang et al., 2016). This FSPM model was based on formalisms of the L-Peach model. The tree is composed of a trunk and branches (internodes). At the end of the internodes, other organs are connected: leaves, buds in lateral and terminal position, flowers and fruits. Allocation of carbohydrates in the plant is based on gradients between source and sink organs. Four modules compose this model: i) photosynthesis, ii) growth, iii) branching, iv) flowering. This model also integrates two cultural operations: i) pruning, ii) fruit load management: thinning at flowering time. The user selects directly the branch or the flowers to be removed. It was developed on the Golden Delicious variety (Kang et al., 2016).

The MUSCA model was developed by Reyes et al., in 2018 and used to infer the impact of the topological scale on the simulated carbon allocation. While generic, this model was adapted to apple

tree development, and it represents the development of a tree based on carbon allocation and tree growth over a single growing season. It uses a radiation transfer model called RATP (Sinoquet et al., 2001) and the plant structure is composed of Multiscale Tree Graph (MTGs). These MTGs can refer to quantitative information (geometry and age of the component) or qualitative information (type of component and connection). The carbon allocation to the fruit compartment is then calculated based on different formalisms and allometric relationships (Reyes et al, 2018, 2020).

The SIMWAL model has also been developed on walnut trees to represent their development over time. The tree is composed of several compartments: the trunk, the branches, the stems, the fine roots, the coarse roots and the taproot. One cultural operation is coded: pruning. The limitation of this model is that it considers only vegetative development: fruits are not taken into account (Balandier et al., 2000) and calculation times were so high that it proved not possible to simulate a tree for more than some days.

The VCHERRY model was described by Lang G.A and Lang R.J in 2008. This model has able to represent the development and the fruit production of a cherry tree. The model user can complete several inputs, as cultivar, climate conditions, rootstock and other parameters. This model takes also into account different cultivation operations, like pruning cuts, spur thinning (fruit load management technical), etc. (Lang, 2008; Lang & Lang, 2008).

Appendix II: Basic description of the non-fine architectural scale temperate fruit tree models.

Grossman and Dejong model: In 1993, Grossman and Dejong developed a compartment-based model for peach trees. This model can simulate the allocation of carbohydrates in peach trees as a function of three drivers: i) the sink strength of the different compartments, ii) the distance between the sources and sinks (compartments), iii) carbohydrate available for growth in the compartments. The model formalisms were based on the assumption that the peach tree is optimally irrigated and fertilized. The model consists of a limited number of variables: fruit, leaf, stem, branch, trunk and root pools. This model considers daily climatic variables, such as maximum and minimum air temperature. Each day, it calculates the daily carbohydrate assimilation. These carbohydrates are reduced by maintenance respiration. The remaining carbohydrates feed the reserve compartment. Subsequently, the model computes the sink strength of each compartment (Grossman & DeJong, 1994). This model on peach trees allows the simulation of vegetative growth and fruit production. On the other hand, it does not consider the different cultural operations whose management can change the growth and architecture of the tree, as well as its production.

Abdel-Razik model: The researcher Abdel-Razik is the first scientist to propose a model on olive fruit tree, capable of simulating growth and olive production (**Abdel-Razik, 1989**). This model, with a daily time step, is a compartmental model and is composed of two main modules: climatic and biological sub-models. The climatic module considers in inputs: light radiation, photoperiod, mean sky cover and temperatures. The biological sub-model includes nine distinct compartments: leaves exposed to direct sunlight, shaded leaves, current year branches, roots, fruits, structural organs of the olive tree such as old branches, roots and trunk and non-structural carbon reserves. The model represents the biomass of each compartment, considering the production of photosynthates (photosynthesis), use of energy (respiration) and allocation of photosynthates to the different compartments. This model also examines water and nitrogen status of the tree by calculating a fraction of the tree's optimum what?. The model calculates the amount of radiation available to the plant at a daily time step. For photosynthesis, it distinguishes different situations depending on the arrangement of the leaves in the canopy and the cloud cover. Three situations can be simulated: i) leaves exposed to the sun with clear weather, ii) leaves in the shade with clear weather, iii) leaves with cloudy weather (Goudriaan & Laar, 1978). It calculates maintenance respiration per compartment per day. Subsequently, net photosynthate production is

calculated as the difference between the gross photosynthetic rate minus the maintenance respiration rate. The net photosynthates quantity is used to predict the growth of the plant. The model calculates the maximum growth demand for each compartment. This expected demand per organ is converted into photosynthate demand. Besides, pruning is considered as a fixed input to the model and reduces the biomass of the tree. It also integrates irrigation and fertilization (N, P, K).

Gutierrez et al., model: In 2009, a group of researchers built a model capable of simulating both the olive trees development and yields but also the consequences of olive fly (*Bactrocera oleae* G.) attacks on yield (Gutierrez et al., 2009). This model was based on a pre-existing olive tree model (the one described above), but also on pre-existing models of olive fly. In this model, the LAI approach is used to determine the light energy intercepted by olive trees. This is converted into the quantity of photosynthates, using the RUE. The assimilates are allocated to the different compartments of the olive tree, according to partitioning coefficients. Moreover, allocation of photosynthates to fruits depends on the different phenological stages. The model also calculates the development of olive flies at different stages of development. Thus, the model can simulate the dynamic development of the olive tree and the olive fly and their interaction. This model proposes as simulation outputs, the olive yield, the dynamics of the olive flies and the percentage of attacked fruits (Gutierrez et al., 2009).

Viola et al., model: A paper published by Viola., et al. (2012) presents a model capable of simulating olive tree biomass and the yields obtained in response to soil water resources dynamics. This model is based on the assumption that the limiting factor for the growth of the olive tree is water. Other factors, such as nutrient availability, diseases, cultural operations are considered negligible. It works in two steps: 1) computation of processes under optimal water conditions and 2) modifications due to water limitation. Evapotranspiration and assimilation are estimated without water stress, then remaining soil moisture is evaluated. Evapotranspiration and carbon assimilation are then computed as a function of soil moisture by a non-linear equation (Viola et al., 2012).

Maselli et al., model: In 2012, Maselli et al proposed a new model capable of simulating olive yields at field scale based on remote sensing techniques and standard weather data. These new approaches grant the possibility to simulate olive orchards and improve predictions of net carbon production per hectare (Maselli et al., 2012). Firstly, olive tree canopy (at a very local scale) must be determined using very high resolution spatial image techniques (Ikonos and landsat ETM+ images). Olive tree canopy data is coupled with local pedoclimatic data to obtain Gross primary production (GPP) of olive trees using the C-fix model. The C-fix model allows simulating photosynthesis using the absorbed fraction of the PAR, deduced from the estimation of the canopy. This model considers the hydric conditions of the plot. Subsequently, the GPP data itself is coupled with the BIOME-BGC model data, obtaining the net primary production (NPP) per hectare. The BIOME-BCG model is used to simulate the storage and fluxes of carbon, water and nitrogen in ecosystems. The BIOME-BCG model requires climate and environmental data as well as parameters describing ecosystem characteristics as inputs. To use this model for olive trees, a parameterization step was necessary (White et al., 2000). These NPP data are then coupled with olive trees phenological stages parameters (beginning and end of the growing season) to obtain the olive yield. This model, also focused on the simulation of olive yields, does not consider the other carbon compartments nor the partitioning coefficients. Therefore, production irregularity, which impacts significantly fruit production (Lavee, 2006), is not considered in this model.

Morales et al., model: In 2016, Morales et al presented a new model capable of simulating growth and yield in olives (Morales et al., 2016). This models computes light radiation absorption, at daily time step, by using in part another model, named MAESPA (Duursma & Medlyn, 2012). This model allows calculating absorption of light radiation, photosynthesis and transpiration per tree. These various calculations use radiative transfer and physiology of the leaves. MAESPA allows generating a daily

pool of photosynthesis. This pool is allocated to respiration and growth. The carbon allocated to growth is distributed according to partitioning coefficients between different organs: leaves, branches, fine roots, structural roots and fruits. The partitioning coefficients consider the phenology of olive trees. This model allows representing pruning, in high density orchards, as a reduction of the leaf area density and volume of the trees.

OliveCan model: In 2018, López-Bernal et al published a paper on OliveCan model, which can simulate the development, growth and the yield of olive trees. OliveCan model is composed of three parts: water balance, carbon balance and cultural operations. Water and carbon balances are interdependent and require soil and climate data (López-Bernal et al., 2018; Mairech et al., 2020). The main mechanisms of this model are calculated at daily time steps. Some processes, such as water uptake, photosynthesis, maintenance respiration and temperature accumulation, are calculated at an intraday time step (with an interval of 30 min). The water balance is divided into two spatial zones in the plot: dry soil and wet soil due to localized irrigation. This division implies that irrigation affects only the wet soil and that the dry soil is only moistened by precipitation. In this module, runoff, soil water evaporation, root uptake and drainage are represented in each soil type. Besides, each soil type is separated vertically into several layers defined by the user. Vertical water flows are represented. However, lateral flows cannot be represented. To calculate roots' water uptake, OliveCan uses the model developed by Garcia-Tejera et al. (2017) to define water uptake as a function of soil type, canopy evapotranspiration and carbon assimilation. Carbon balance of the model allows simulating the growth and development of an olive tree. First, OliveCan calculates a daily pool of photosynthates using the SPAC (soil-plant-atmospheric-continuum) model (Deng et al., 2017). These photosynthates are allocated to growth or maintenance respiration and divided into different compartments or organs: leaves, shoots (stems of maximum 3 years), branches, fine roots, structural roots and fruits. This allocation is performed using fixed partitioning coefficients depending on the phenology of the olive tree. The fruit development module considers the phenomena of irregularity of production and thermal stress. In the crop operation module, the model can represent tillage, irrigation, harvesting and pruning. The user must indicate the irrigation and harvesting dates beforehand. At harvest time, a conversion of fruit biomass into oil yield is performed. As for pruning, it is represented by removing a fraction of the LAI.

Moriondo et al., model: In 2019, Moriondo et al proposed an olive tree simulation model capable of simulating olive tree phenology, biomass accumulation and yield. It also considers various environmental stresses including water stress (Moriondo et al., 2019). This model, with a daily time step, integrates development of an olive tree in an agroecosystem and considers plant cover below the trees. This model includes a phenological sub-model, the year being divided into stages when carbon allocation is different. PAR and LAI allow the model to estimate the daily potential increase in biomass. This potential is reduced according to the different stresses and is allocated to the various compartments: leaves, fruits and stems. The model also considers different cultural practices, such as planting density, plant cover and tillage.

Buwalda et al., model: On Kiwis, only one model has been developed: Kiwifruit (Buwalda, 1991). The goal of this model is to understand allocation of carbon in the different compartments. It represents photosynthesis and carbon production. The carbon is allocated to different compartments: stems, fruits, trunk, fine roots and structural roots. This model allows simulating yield and vegetative development according to fruit load and branch density, by fruit load management practices (Buwalda, 1991).

Lakso et al., model : Lakso et al. (1995) modelled the carbon balance of apple trees. This model calculates a quantity of photosynthates produced during each day. These are then allocated to different compartments (fruits, leaves and wood). It allows to estimate fruit yield but also the number of fruits

produced. However, this model does not integrate any cultural operation (Lakso et al., 1999; Lordan et al., 2019).

CLM5-FruitTree model: In 2022, Dombrowski et al., (2022) published a paper presenting a new fruit tree model: the CLM5-FruitTree model. Initially, this model was developed to simulate the exchange of water, energy and nitrogen between the soil and the atmosphere. The version adapted to fruit tree represents in addition the growth and yield of a fruit orchard and includes a carbon and nitrogen allocation module, the phenology of the fruit tree, etc. This model integrates also some cultural operations, such as fertilization and pruning of the fruit tree (also a fruit load management practice) (Dombrowski et al., 2022).

Bevacqua et al., model: In 2021, Bevacqua et al., (2021) published a paper about the mechanistic model able to simulate the development of a peach tree. This model simulates the vegetative and reproductive growth according to different cultivation operations (like fruit thinning and branch pruning) (Bevacqua et al., 2021).

Appendix III: Basic description of some agroforestry models: WaNulCas, Yield-sAFe and Hi-sAFe models.

The WaNulCas agroforestry model is a two-dimensional daily dynamic model that was built by Van Noordwijk and Lusiana (1998). The goals of this model are to simulate the development of different agroforestry systems with different spacings between trees and between trees and crops. It can represent up to three associated plants (trees or crops). It discretizes space according to four zones of increasing distance from the tree trunk (in case of dispersed trees) or the tree line (in case of alley cropping), and four layers of increasing depth in the soil. It simulates the development of plants (trees and crops) as a function of water, nitrogen and light availability. This model calculates, with a daily time step, production of photosynthates, which is reduced according to the different stresses. Moreover, different cultural operations are taken into account such as pruning, irrigation and fertilization (Van Noordwijk & Lusiana, 1999). The model has been calibrated mainly for tropical agroforestry systems, such as maize-chili-intercropping with *Leucaena leucocephala* hedgerows (Hussain et al., 2016) and for legume species (*Tephrosia candida* and *Crotalaria paulina*)(Walker et al., 2007). This model has been used to test for example tree fallow – crop rotation, to test different options of tree spacing, to understand the root system growth, to test different options to increase productivity of rubber plantation, etc. (Cahyo et al., 2016; Van Noordwijk, 2011).

The Yield-Safe agroforestry model is a non-spatial dynamic model working at the daily time step that was developed by van der Werf et al. (2007). The goal of this model is to simulate development of an agroforestry system (composed of one tree species associated with one crop species) according to resources competition dynamics. It consists of only seven variables: i) tree biomass, ii) tree leaf area, iii) number of shoots per tree, iv) crop biomass, v) crop leaf area, vi) heat sum, vii) soil water content. Competition for light and water are considered, and impact the growth and development of tree and crop. Moreover, different cultural operations are represented, such as pruning of forest trees and thinning (reduction of the number of trees per hectare)(Van der Werf et al., 2007). The model has been calibrated for temperate forest tree species (holm oak, stone pine, poplar, hybrid walnut, wild cherry) (Keesman et al., 2011). This model has been used to test the effect of different tree density and soil depths on tree and crop yield (Graves et al., 2010), the effect of different tree densities, tree species and geographical locations within Europe on ecosystem services (Palma et al., 2007), or to identify which agricultural zones should be targeted by national policies to optimize carbon sequestration potential of tree planting (Palma et al., 2014).

The Hi-sAFe agroforestry model is a dynamic 3-D model with a daily time step that was developed by Dupraz et al in the years 2000s (Dupraz et al., 2019). The goal of this model is to simulate the development, growth and yield of trees and crops in agroforestry systems according to the partitioning of three resources: water, nitrogen and light. It can represent any number of tree species, associated with up to two species of crops (one main crop, and a secondary crop along the trees row or around the tree stem). Space is represented as a grid of cells for crops in the horizontal plane, as a stack of volume elements for the soil in each cell (with 3D spatially explicit architecture of the coarse roots of the tree), and the tree canopy is represented by simple geometrical 3D shapes (cone for the trunk and ellipsoid for the crown). It incorporates different cultural operations: irrigation, fertilization, pruning of forest trees, stand thinning (reduction of the number of trees per hectare). The model has been calibrated for temperate forest tree species (hybrid walnut, poplar, wild cherry). This model has been used to test the effect of tree density, tree row orientation and latitude on light availability for the underlying crop (Dupraz, Blitz-Frayret, et al., 2018) and to understand the mechanisms of resilience to climate change of agroforestry systems (Huo et al., 2021; Reyes et al., 2021).

3) Les questions scientifiques associées à la thématique de recherche

Afin d'évaluer les performances agronomiques et environnementales des systèmes agroforestiers à base d'oliviers, deux approches sont combinées dans la thèse : une approche de modélisation (évaluation ex-situ) et une approche participative. Pour l'approche de modélisation, le modèle agroforestier Hi-sAFe a été choisi. D'après la revue de littérature effectuée, ce modèle semble être l'un des modèles les plus adaptés (bien que des aspects soient manquants) pour l'évaluation des performances agronomiques et environnementales de systèmes agroforestiers à base d'oliviers. Ce modèle permet de simuler le développement d'arbres et de cultures intercalaires sur une même parcelle. Il permet d'effectuer des simulations sur le long terme au pas de temps journalier et présente quelques opérations culturales. En revanche, ce modèle n'est pas capable de simuler des arbres fruitiers, dont les oliviers. Afin de répondre à la problématique de recherche, le modèle Hi-sAFe devra être adapté aux arbres fruitiers et sera par la suite utilisé pour évaluer les performances des systèmes agroforestiers.

La thèse explore divers aspects de l'évaluation des performances des systèmes agroforestiers en répondant à des questions spécifiques :

1. Comment adapter le modèle agroforestier Hi-sAFe pour simuler les arbres fruitiers, notamment les oliviers ?
2. Quels systèmes diversifiés à base d'oliviers peuvent être co-conçus avec les acteurs pour améliorer les performances agronomiques et environnementales des oliveraies ?
3. Quelles sont les performances agronomiques et environnementales des deux systèmes co-conçus avec les acteurs : l'un associant oliviers et légumineuses, et l'autre associant oliviers, laitues et une rotation triennale de blé, d'orge et de pois d'hiver ?
4. Face au changement climatique, quelle sera la résilience des systèmes oléicoles traditionnels et agroforestiers ?

Ces questions scientifiques précises guident le projet de recherche dans l'évaluation des performances des systèmes agroforestiers à base d'oliviers. Ces questions sont explorées dans cinq chapitres qui composent la partie Résultats du manuscrit. La question n°1 est traitée dans les chapitres 4 et 5, tandis que les questions 2, 3 et 4 sont abordées respectivement dans les chapitres 6, 7 et 8. L'ensemble de ces résultats est ensuite discuté dans le chapitre 9 (Discussion générale).

PARTIE II
Matériels & Méthodes

Chapitre 3 : L'évaluation par modélisation des systèmes agroforestiers à base de fruitiers

Ce troisième chapitre illustre la méthode et les outils utilisés pour répondre à la problématique et aux questions scientifiques (énumérées dans les chapitres 1 et 2), en combinant deux approches complémentaires. Tout d'abord, une approche de modélisation a été mise en place en adaptant le modèle Hi-sAFe aux arbres fruitiers, notamment aux oliviers. Ensuite, une approche participative a été utilisée pour intégrer des connaissances techniques et concrètes dans la thèse. Enfin, les deux approches ont été combinées pour évaluer, avec le modèle, des systèmes co-conçus lors de l'approche participative, et évaluer, avec les acteurs, la pertinence des résultats de simulation.

La première partie de ce chapitre aborde la présentation du modèle Hi-sAFe, son fonctionnement, ainsi que la démarche d'adaptation utilisée pour adapter ce modèle aux oliviers.

La deuxième partie met en évidence la démarche de constitution d'un réseau d'acteurs oléicoles, rassemblant des experts techniques et des professionnels du secteur, afin de partager leurs expériences et leur savoir-faire. Cette collaboration s'est révélée essentielle pour le développement des systèmes diversifiés à base d'oliviers. Dans le même contexte, la démarche de co-conception et de co-évaluation des systèmes diversifiés à base d'oliviers est détaillée.

La troisième partie mentionne la démarche d'évaluation des systèmes agroforestiers par modélisation.

En somme, ce chapitre met en avant une méthode qui allie la modélisation et l'approche participative pour répondre à la problématique posée.

1) L'approche de modélisation

A) Présentation du modèle Hi-sAFe : version 4.1 (avant modification)

a) Description générale

Hi-sAFe est un modèle agroforestier mécaniste développé depuis 2002 dans le cadre du projet européen SAFE (Silvoarable Agroforestry For Europe). Il fonctionne à un pas de temps journalier et a pour objectif de comprendre le fonctionnement des systèmes agroforestiers en prédisant leur développement à long terme. Hi-sAFe permet de tester ces systèmes dans différents contextes pédoclimatiques et selon différents itinéraires techniques. Ce modèle fonctionne par couplage d'un modèle arbre (sAFe-Tree) avec un modèle de culture existant : le modèle STICS (Simulateur multiDisciplinaire pour les Cultures Standard) (Brisson et al., 2009, 2002; Dupraz et al., 2019). Ce couplage est détaillé dans la partie 3.1.A.j.

Le modèle repose sur deux hypothèses principales : la productivité des systèmes agroforestiers dépend de l'acquisition hétérogène de ressources par les arbres et les cultures dans l'environnement, et l'interaction entre les arbres et les cultures est régie par la plasticité aérienne, souterraine et phénologique des plantes. Hi-sAFe peut simuler des systèmes agroforestiers en 3D en fonction des interactions entre les arbres et les cultures pour l'eau, l'azote et la lumière, ainsi que la plasticité aérienne et souterraine de l'architecture des arbres en fonction de la disponibilité des ressources. Les simulations sont effectuées sur toute la durée de vie du système, de la plantation à la fin de vie, au pas de temps journalier. Les données d'entrée du modèle sont, outre la description du sol et les données climatiques journalières, la

description des itinéraires techniques. Le modèle prend ainsi en compte l'effet de certaines opérations culturales d'arbres forestiers telles que le cernage racinaire, l'élagage des branches basses, ainsi que les principales opérations effectuées pour les cultures, telles que le travail du sol, le semis, la fertilisation, l'irrigation, la fauche et la récolte (Dupraz et al., 2019).

b) La scène simulée

Le modèle Hi-sAFé simule une scène rectangulaire, qui peut être reproduite à l'infini dans toutes les directions (possible grâce à la symétrie torique) (Figure 24). Cette scène peut inclure un ou plusieurs arbres et l'espace est discrétisé en trois dimensions. Le plan horizontal de la scène est divisé en cellules, et chaque cellule appartient soit à la zone de culture principale (allée cultivée si les arbres sont alignés, zone du pied de l'arbre si les arbres sont dispersés), soit à la zone gérée différemment (Linéaire Sous-Arboré ou zone protégée au pied de l'arbre). Le sol est représenté par une à cinq couches d'épaisseurs variables, chacune présentant des propriétés homogènes. Les couches sont composées de plusieurs voxels, qui représentent une unité de volume (unité de discrétisation souterraine) (Dupraz et al., 2019; Talbot, 2012).

La résolution spatiale du modèle peut être choisie par l'utilisateur, mais il convient de noter que le modèle est sensible à ce choix, bien que cette sensibilité n'ait pas été étudiée. Dans les simulations, par défaut, les cellules sont discrétisées en carrés de 1 m avec des voxels de 20 cm d'épaisseur.

Pour décrire la scène, l'utilisateur doit renseigner plusieurs paramètres dont notamment :

- La position de la scène : latitude et longitude ;
- Les espèces (arbres et cultures) ainsi que leur position sur la scène ;
- Un descriptif du sol (jusqu'à cinq couches) qui comprend principalement les proportions d'argile, de limon et de sable, la proportion volumique de cailloux, la profondeur des couches, etc.

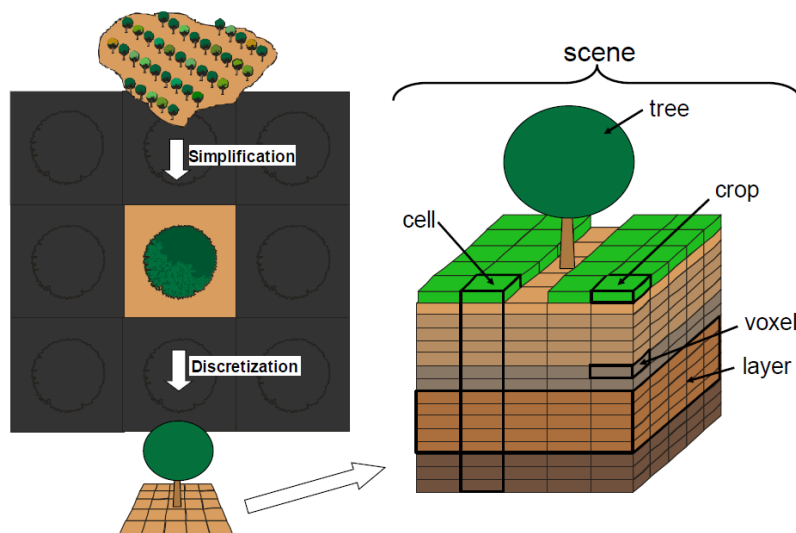


Figure 24 : Représentation schématique de la scène simulée par le modèle Hi-sAFé (source : Dupraz et al., 2019)

c) Le template de simulation et ces fichiers d'entrées

Le modèle Hi-sAFé a besoin de plusieurs fichiers d'entrées, qui permettent de paramétrer le modèle en fonction des besoins de l'utilisateur (Figure 25) :

1. Un fichier .pld qui contient la description et l'initialisation du sol et des arbres ;
2. Un fichier .wth qui contient les données météorologiques quotidiennes ;
3. Un fichier .sim qui contient l'initialisation de la simulation, des cultures et des opérations culturales des arbres ;
4. Un fichier .tree (un par espèce d'arbre) qui contient les paramètres décrivant les espèces d'arbres (morphologie, phénologie, réponse au stress, etc.) ;
5. Un fichier .plt (un par espèce de culture intercalaire) qui contient les paramètres décrivant la culture intercalaire (morphologie, phénologie, réponse au stress, etc.) ;
6. Un fichier .tec (un par espèce de culture intercalaire) qui contient l'itinéraire technique pour la culture intercalaire.

Ces fichiers sont regroupés dans un template de simulation, qui comprend également deux fichiers de paramètres généraux : hisafe.par et stics.par.

Le modèle Hi-sAFe est exécuté sur la plateforme Capsis4 (lien de téléchargement du modèle : <https://www1.montpellier.inra.fr/wp-inra/hi-safe/>), et les résultats de la simulation peuvent être facilement visualisés avec le package hisafer développé sur R (disponible sur www.github.com/kevinwolz/hisafer).

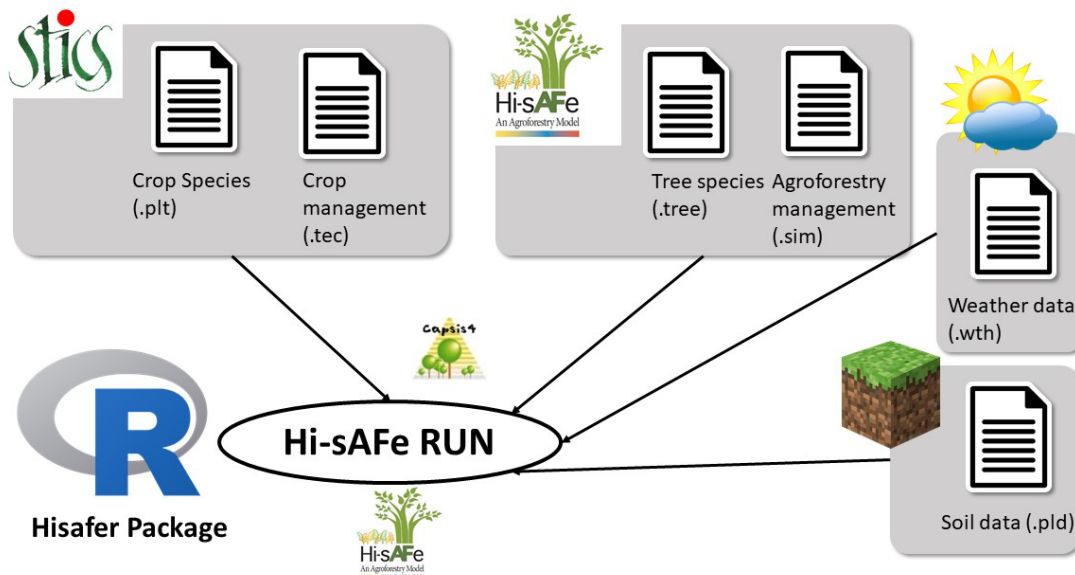


Figure 25 : Représentation schématique des fichiers d'entrées du modèle Hi-sAFe

d) La représentation de l'arbre : fichier .tree

Composé de 90 paramètres, le fichier .tree comprend des paramètres décrivant l'architecture de l'arbre, la phénologie et l'allocation de carbone. Ces 90 paramètres ont été paramétrés, calibrés et vérifiés pour trois espèces forestières : le noyer hybride, le peuplier et le merisier.

L'architecture de l'arbre

Le modèle simplifie l'arbre sous forme de deux formes géométriques simples : une ellipsoïde pour le houppier de l'arbre et un cylindre pour le tronc. La représentation de l'architecture aérienne de l'arbre repose sur sept relations allométriques (Figure 26) (Dupraz et al., 2019; Talbot, 2012) :

1. Hauteur – DBH (Diameter at Breast Height) ;
2. Surface foliaire – DCB (Diameter at Crown Base) ;
3. Surface foliaire - volume du houppier ;

4. DCB – DBH ;
5. Volume du tronc - DBH – hauteur ;
6. Biomasse de la souche - biomasse du tronc ;
7. Volume des branches - volume du houppier.

Ces relations permettent de décrire la forme de l'arbre de manière simplifiée, mais suffisamment précise pour les besoins de simulation.

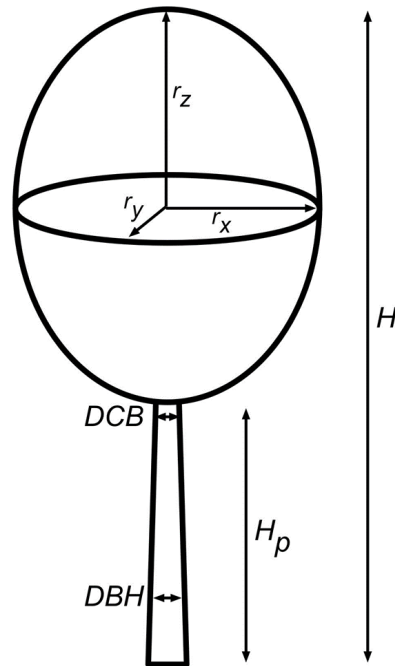


Figure 26 : Représentation schématique des parties aériennes d'un arbre dans Hi-sAFe, où H correspond à la hauteur, DBH au diamètre du tronc à hauteur de poitrine (m), DCB au diamètre du tronc à la base du houppier (m), r_x et r_y aux rayons horizontaux et verticaux du houppier (Source : Grégoire Talbot)

La phénologie

La phénologie des arbres est modélisée en cinq stades distincts : i) la levée de la dormance, ii) le débourrement des bourgeons, iii) la fin de l'expansion foliaire, iv) le début de sénescence foliaire, v) la fin de sénescence foliaire.

L'allocation de carbone

L'arbre est constitué de différents compartiments de carbone : les feuilles, les branches, le tronc, la souche, les racines de structure et les racines fines (Figure 27). Chaque jour, l'arbre synthétise un pool de carbone par la photosynthèse, qui peut être réduite par les stress hydriques et azotés. Ce carbone est alloué à la croissance ou est stocké dans le compartiment de réserve de carbone (le carbone labile), selon la phénologie. Pour le carbone alloué à la croissance, un équilibre fonctionnel permet d'allouer le carbone soit dans les compartiments aériens, soit dans les compartiments souterrains. Pour les compartiments aériens, le carbone est alloué dans les compartiments des feuilles, des branches, du tronc et de la souche lors de l'expansion foliaire et sinon dans les compartiments des branches, du tronc et de la souche. Si le carbone est alloué dans les compartiments souterrains, un équilibre fonctionnel entre les racines de structure et les racines fines permet d'allouer le carbone dans l'un ou dans l'autre compartiment. Le modèle prend en compte la sénescence des feuilles et des racines, réduisant ainsi chacun de ces deux pools. Le stress anoxique est également intégré au modèle, tout comme le cernage racinaire, et peut réduire la quantité de carbone dans les racines fines et de structure. L'élagage des branches basses des arbres forestiers est également implémenté dans le modèle et impacte la quantité de carbone dans les compartiments de carbone des branches et des feuilles.

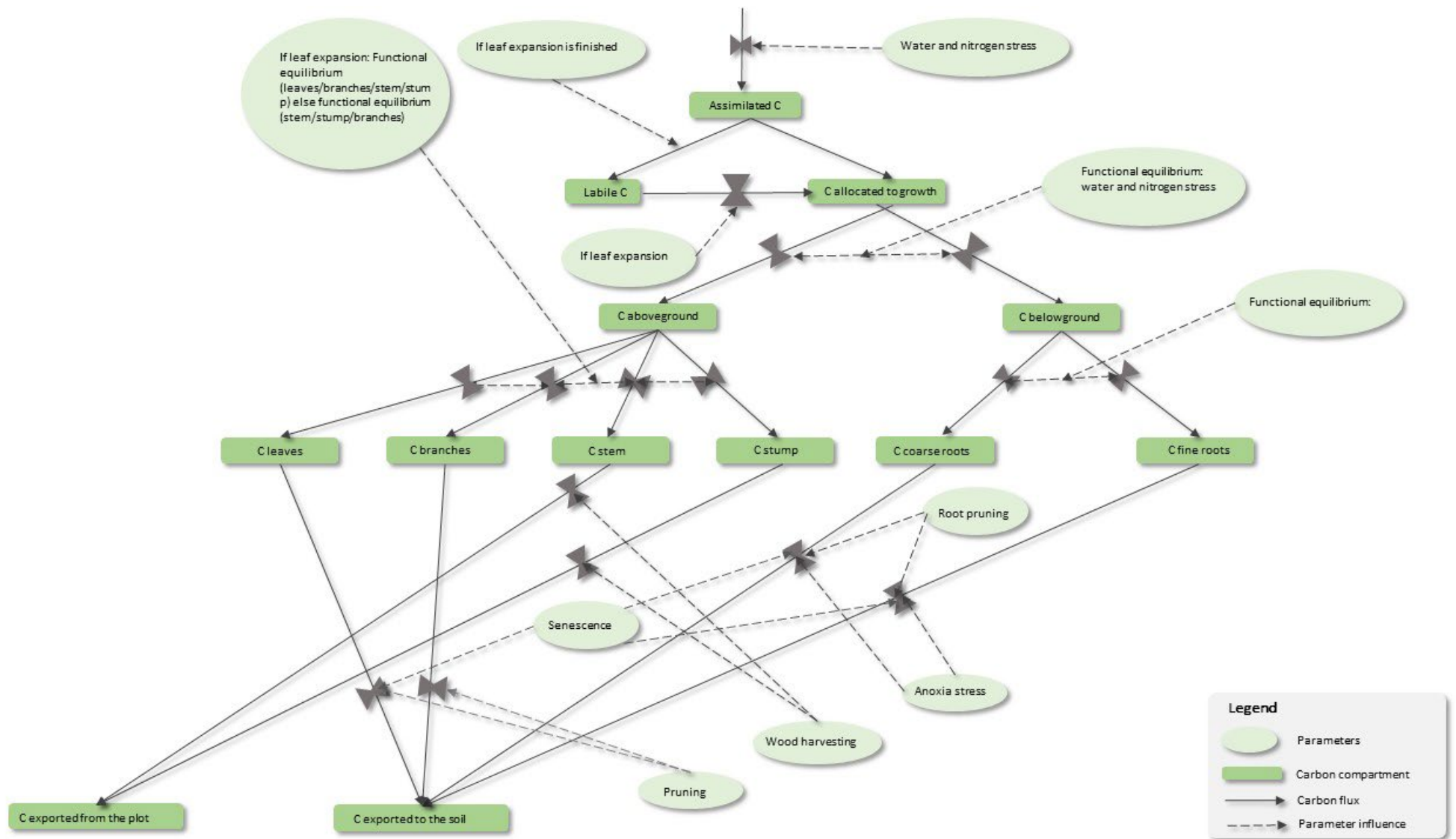


Figure 27 : Représentation schématique de l'allocation de carbone de l'arbre dans le modèle Hi-sAFe

Le système racinaire

Comme mentionné précédemment, l'équilibre fonctionnel aérien/souterrain varie en fonction des stress hydriques et azotés, permettant ainsi une augmentation de l'allocation de carbone au système racinaire pendant les périodes de sécheresse. Le système racinaire des arbres se compose de racines de structure et de racines fines. La colonisation de nouveaux voxels par les racines fines est pilotée par un automate voxellaire. Le fonctionnement de l'automate voxellaire se divise en deux étapes : la prolifération et la colonisation. La colonisation se produit lorsque le cumul de carbone investi dans les voxels pour faire des racines fines atteint un seuil proportionnel à la distance entre le voxel parent et un autre voxel. Ce seuil est ajusté en fonction de la vitesse de progression globale du système racinaire et peut varier en fonction de la préférence de l'espèce pour le développement horizontal ou vertical (Dupraz et al., 2019; Talbot, 2012). Les racines de structure sont ensuite mises en place pour relier les deux voxels, lorsque la densité de racines fines du voxel colonisé atteint un certain seuil. Dans le package hisafer, une fonction est disponible pour visualiser l'architecture des racines de structure de l'arbre à une date spécifique.

e) La représentation des conditions pédoclimatiques et du design du système agroforestier : fichiers .pld et .wth

Le fichier météorologique comprend les données météorologiques journalières sur la durée et la période de simulation. Cette base de données comprend neuf variables :

- La température maximale (°C) ;
- La température minimale (°C) ;
- L'humidité relative maximale (%) ;
- L'humidité relative minimale (%) ;
- La radiation lumineuse (MJ m^{-2}) ;
- Les précipitations (mm) ;
- La vitesse moyenne du vent (m s^{-1}) ;
- La profondeur de la nappe phréatique (m) ;
- La concentration en CO_2 dans l'atmosphère (ppm).

Le fichier de description de la parcelle comprend des paramètres sur la description du sol et du design agroforestier :

- La localisation de la parcelle (latitude, altitude, orientation du nord, etc.) ;
- Le type de système agroforestier (alignement ou arbres isolés) et distance entre la culture et l'arbre (largeur ou rayon de la zone non cultivée au pied de l'arbre) ;
- Le sol (albédo, ratio C/N, pH, etc.) ;
- Les paramètres impactant les processus liés à l'eau dans le sol (nappes phréatiques, drainage, etc.) ;
- Les paramètres impactant les processus liés à l'azote dans le sol (matière organique, dénitrification, etc.) ;
- La description des cinq couches de sols (pourcentage de sable, de limon, profondeur, etc.) ;
- L'initialisation de l'arbre (localisation, hauteur à la plantation, largeur du houppier à la plantation, date de plantation, etc.).

f) La représentation des cultures intercalaires : fichiers .plt et .tec

Pour représenter le développement et la productivité des cultures intercalaires, l'utilisateur doit en amont des simulations compléter les fichiers .plt et .tec en fonction de ses besoins de simulation.

Le fichier .plt est composé d'environ 270 paramètres décrivant la phénologie de la culture, sa réponse aux différents stress, ses besoins, etc. Les valeurs de ces paramètres ont été calibrés et vérifiés pour plusieurs cultures : la luzerne, l'orge, le blé, la laitue, la fétuque, le lin, l'herbe, le maïs, la moutarde, le pois, la pomme de terre, le colza, le raygrass, le sorgho, le soja, la betterave sucrière, la canne à sucre, le tournesol, la tomate, la vigne, l'orge d'hiver, le pois d'hiver. Les valeurs sont également disponibles pour un sol nu, sans végétaux.

Le fichier .tec est composé d'environ 115 variables décrivant l'itinéraire technique de la culture (semis, irrigation, fertilisation, récolte, etc.). Il est très spécifique d'un système de culture donné à un autre et peut même varier d'année en année pour une même culture. Néanmoins, un exemple de fichier .tec est fourni pour chaque culture afin d'aider l'utilisateur à paramétrer son itinéraire technique.

g) L'initialisation de la simulation : le fichier .sim

Le fichier .sim permet d'initialiser la simulation et d'indiquer la rotation de culture que l'utilisateur souhaite réaliser avec les arbres. Ce fichier comprend 32 paramètres fixant la date de début de la simulation, la rotation de culture, la symétrie torique et les opérations culturales de l'arbre (élagages des branches, éclaircissage du nombre d'arbres et le cernage racinaire).

h) La représentation du cycle de l'eau et de l'azote

Le modèle Hi-sAFé intègre les processus clés des cycles de l'eau et de l'azote. Pour le cycle de l'eau, il prend en compte les flux suivants : précipitation, interception par le feuillage, écoulement sur le tronc d'arbre, infiltration dans le sol, drainage, évaporation du sol, extraction par les arbres et les cultures, transpiration des arbres et des cultures, ruissellement et remontée d'eau des nappes aquifères (Figure 28).

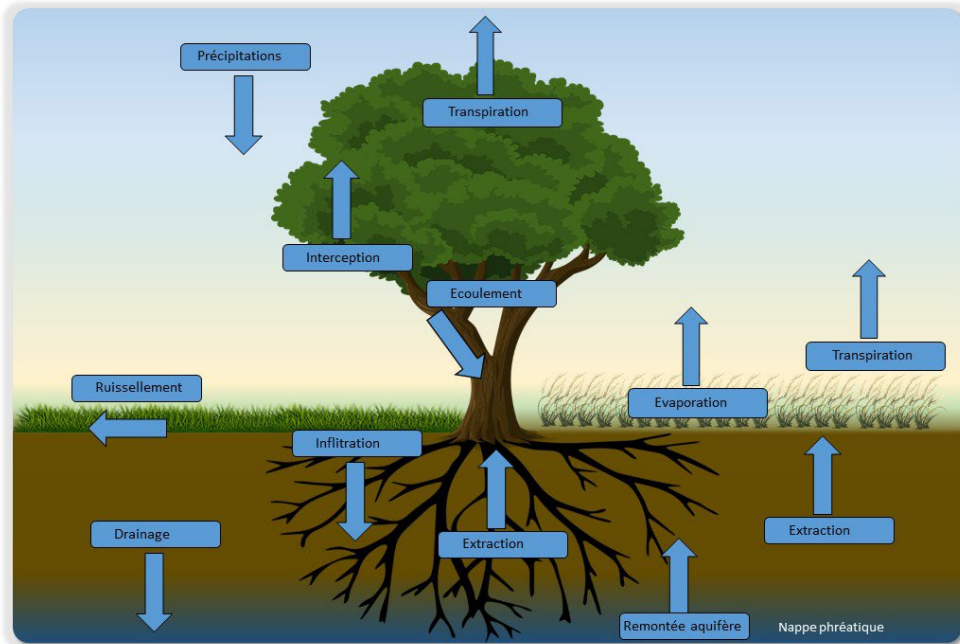


Figure 28 : Représentation schématique du cycle de l'eau représenté dans le modèle Hi-sAF

Pour le cycle de l'azote, le modèle considère également plusieurs flux, tels que l'apport de fertilisants, et le dépôt (sec ou humide), la remobilisation, la minéralisation, l'extraction par les arbres et les cultures, la lixiviation de l'azote, la décomposition des feuilles et des racines, etc. (Figure 29).

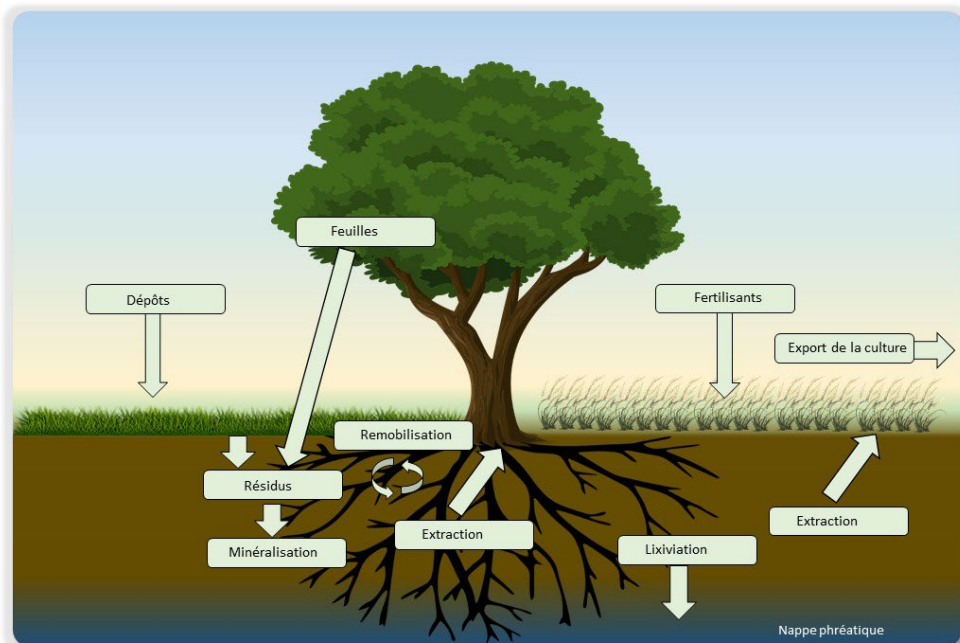


Figure 29 : Représentation schématique du cycle de l'azote représenté dans le modèle Hi-sAF

i) Les sorties du modèle

Toutes les variables intermédiaires calculées par le modèle peuvent potentiellement être utilisées comme variables de sortie, à condition d'être ajoutées à un profil d'export de données. Cependant, généralement, on utilise des profils d'exports classiques qui couvrent la majorité des besoins habituels pour interpréter les simulations de Hi-sAFe :

- Le profil « climat » (24 variables de sortie) pour interpréter les données climatiques ;
- Le profil « arbre » (114 variables de sortie) pour interpréter le développement et la croissance de l'arbre ;
- Le profil « plot » (135 variables de sortie) pour interpréter l'évolution du sol, des flux d'eau et d'azote à l'échelle de l'ensemble de la scène ;
- Le profil « cells » (166 variables de sortie) pour interpréter l'évolution du système en fonction des différentes cellules de la scène simulée ;
- Le profil « voxels » (78 variables de sortie) pour interpréter l'évolution du système en fonction des différents voxels de la scène simulée.

Le package Hisafer disponible sur R permet l'analyse des données des profils. Des fonctions dédiées sont disponibles pour faciliter l'interprétation et la visualisation des données à l'aide de graphiques. Les utilisateurs peuvent bien entendu développer leurs propres scripts pour analyser les sorties du modèle.

j) Le couplage du modèle tree (Hi-sAFe) avec le modèle STICS

Hi-sAFe est un modèle résultant du couplage étroit entre SAFE-Tree, un modèle de croissance des peuplements d'arbres espacés, et STICS, un modèle de culture semi-mécaniste (Brisson et al. (2002)). Au début de la simulation, SAFE-Tree initialise les caractéristiques des arbres, tandis que STICS initialise les paramètres du sol et de la culture. L'hétérogénéité spatiale de la parcelle est représentée via de multiples instanciations de STICS, une pour chaque cellule de la grille découpant l'espace.

Ensuite, la modélisation de la croissance des arbres et des cultures se déroule quotidiennement, et ce dans les trois dimensions de l'espace. Le processus de couplage se déroule quotidiennement de la manière suivante :

- SAFE-Tree récupère les variables climatiques, ce qui permet de modifier :
 - l'interception de la lumière par les arbres,
 - l'interception/évaporation de la pluie sur les feuilles des arbres, ainsi que la redistribution d'une partie des précipitations qui coulent le long du tronc (stem flow)
 - la demande en eau des arbres.
- Ensuite, STICS modélise le développement de la culture en prenant en compte l'influence des arbres, notamment l'interception de la lumière directe et diffuse, de la pluie et le ruissellement le long des troncs d'arbres, dans chaque cellule de la scène.
- La demande en eau des cultures est ensuite transmise à SAFE-Tree, qui exécute des modules de compétition pour l'eau et l'azote, puis ajuste la phénologie des arbres.
- STICS modélise ensuite, après avoir pris en compte les prélèvements d'azote et d'eau par les arbres calculés par SAFE-Tree, les transferts verticaux d'eau et d'azote dans le sol, la croissance racinaire des cultures intercalaires, ainsi que les contraintes liées à l'azote et à l'eau pour les plantes.

- Enfin, la teneur en azote dans le sol est transmise par STICS à SAFE-Tree.

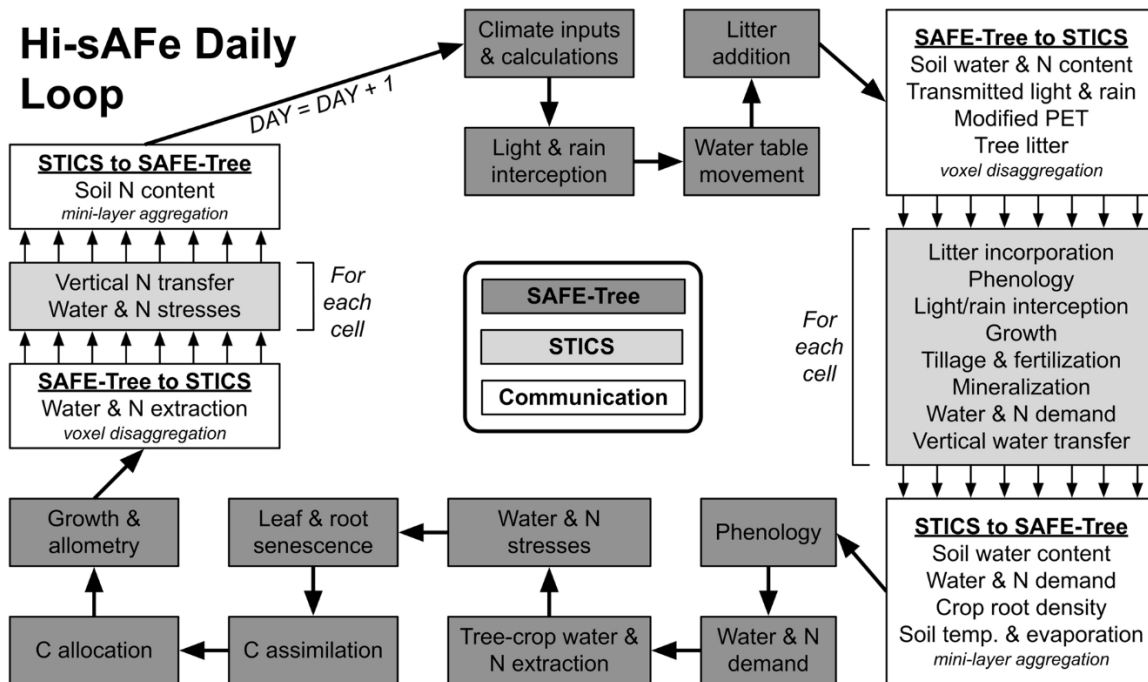


Figure 30 : représentation schématique du couplage de modèle entre SAFE-Tree et STICS (source : Dupraz et al 2019)

k) Les limites du modèle

Le modèle Hi-sAFe, comme tout modèle, est une simplification de la réalité et présente des limites. L'une des principales limites du modèle est le nombre d'espèces d'arbres disponibles, limité à seulement trois arbres forestiers. Le modèle ne possède pas les formalismes pour représenter le développement et la productivité d'arbres fruitiers. Le modèle présente également d'autres limites, telles que l'effet brise-vent des arbres, l'impact des ravageurs sur les plantes, l'érosion des sols, et les méthodes de conduite / de taille spécifiques qui leur sont appliqués, les animaux (élevage) et leurs interactions avec le système, ainsi que les arbustes. En ce qui concerne la photosynthèse, le modèle ne prend pas en compte l'effet de la température et de l'âge des feuilles. De plus, il ne peut représenter que des arbres à feuilles caduques.

De plus, du fait que Hi-sAFe soit un modèle complexe pour modéliser les systèmes agroforestiers, les résultats des simulations sont difficilement interprétables. Il est donc essentiel de faire un réel effort de synthèse pour que les résultats soient compréhensibles par tous les acteurs impliqués (Dupraz et al., 2019; Grimm, 1994; Van Nes and Scheffer, 2005).

B) L'adaptation du modèle Hi-sAFe aux arbres fruitiers, dont les oliviers

La modélisation des performances agronomiques et environnementales des systèmes agroforestiers à base d'oliviers nécessite une adaptation du modèle Hi-sAFe. Celui-ci n'est en effet pas adapté pour simuler la production d'arbres fruitiers, notamment les oliviers qui sont des arbres à feuilles persistantes. L'adaptation se déroule en plusieurs étapes qui correspondent aux grandes étapes dans le processus de modélisation : recherche et implémentation de nouveaux formalismes,

paramétrisation des paramètres relatifs aux oliviers, analyse de sensibilité du nouveau module, calibration des paramètres non paramétrables et validation du modèle (également nommé vérification du modèle). Ce cycle correspond au processus classique de modélisation (Brisson et al., 2003; Jakeman et al., 2006; Whisler et al., 1986) (Figure 31).

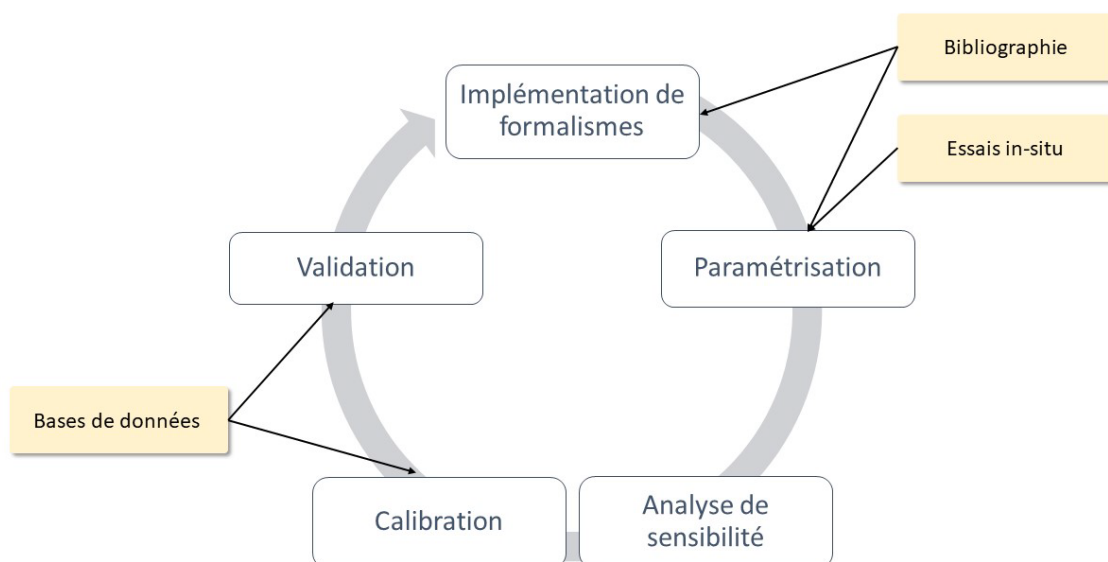


Figure 31 : Représentation schématique des grandes étapes dans le processus de modélisation

L'implémentation de formalismes

La première étape de l'adaptation consiste à identifier les besoins et à éditer la liste des nouveaux formalismes nécessaires pour répondre à ces besoins. Des études existantes peuvent aider à écrire les équations nécessaires pour modéliser les processus identifiés. Ensuite, ces formalismes sont intégrés à l'architecture générale du modèle. Pour les modèles complexes, il est recommandé d'utiliser un schéma conceptuel pour visualiser les compartiments et les flux. Les algorithmes et équations pour ces formalismes sont ensuite codés en JAVA dans le modèle Hi-sAFe (Figure 32). Dans mon travail, les discussions auprès des producteurs ont également orienté les choix des formalismes à implémenter dès la première année de thèse.

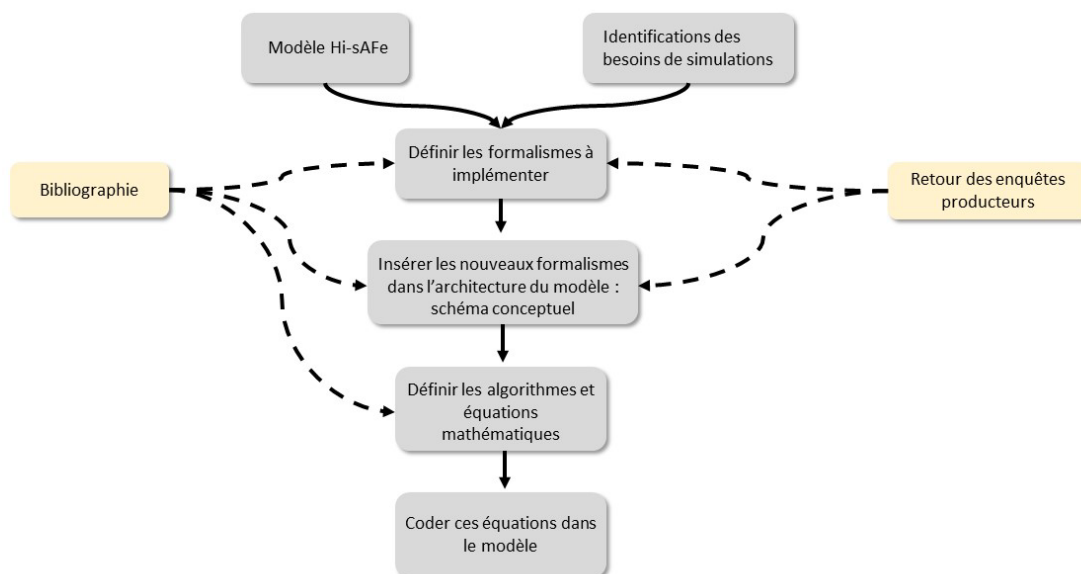


Figure 32 : Représentation schématique des grandes étapes dans le processus d'implémentation de formalismes dans un modèle

Les formalismes utilisés pour la modélisation ne sont pas spécifiques aux oliviers, mais plutôt génériques pour les arbres fruitiers et les arbres à feuilles persistantes. Plusieurs ajouts de formalismes sont effectués : i) les cohortes de feuilles, ii) le compartiment de carbone des fruits.

Les oliviers sont des arbres à feuilles persistantes qui présentent jusqu'à trois générations de cohortes de feuilles, qui ont des sensibilités différentes aux stress environnetaux. La dynamique de surface foliaire en cours d'année impacte directement le processus de photosynthèse et donc l'assimilation de photosynthétats. Celle-ci impacte l'allocation de carbone dans la plante et donc la croissance et la productivité de la plante. Ainsi, une dynamique de cohorte de feuille a été implémentée dans le modèle. Les détails sont présentés dans l'article « Upgrading the Hi-sAFe agroforestry model for fruit trees. Application to Olive tree » (Chapitre 5 – partie 2).

La part de carbone allouée aux fruits est non négligeable chez les arbres fruitiers, et de plus les producteurs sont bien évidemment intéressés par l'impact de la culture en agroforesterie sur le rendement en olives. Le compartiment de carbone du modèle Hi-sAFe a donc été complété pour ajouter un compartiment de carbone dans les fruits. De plus, certaines opérations culturales aux arbres fruitiers ont été implémentées dans le code, comme l'irrigation, la fertilisation, le management du volume du houppier, etc. Des détails sont présentés dans l'article « Upgrading the Hi-sAFe agroforestry model for fruit trees. Application to Olive tree » (Chapitre 5 – partie 2).

La paramétrisation

Une étape importante pour l'ajout de toute nouvelle espèce au modèle, et a fortiori si on a dû ajouter de nouveaux formalismes, consiste à identifier les valeurs des paramètres pour cette espèce. Cette paramétrisation peut être faite de différentes façons : réutilisation directe de paramètres obtenus dans la littérature (pour les paramètres qui sont inclus dans des formalismes déjà publiés), utilisation de données mesurées (pour les paramètres dont le sens biologique est évident et facilement mesurable) ou calibration (estimation de la valeur des paramètres qui permet aux données de sorties du modèle de s'approcher au mieux des données observées).

Une étude bibliographique a été réalisée en utilisant Google Scholar, Web of Science et les bases de données INRAE (Figure 34).

Dans la littérature, quelques modèles sur l'olivier existent et trois d'entre eux proposent des valeurs de paramètres. Certains formalismes et valeurs de paramètres ont été récupérés de ces travaux de recherche. Le modèle OliveCan, de López-Bernal et al. (2018), a été parfaitement documenté et des valeurs de paramètres sont disponibles dans le rapport des données complémentaires (López-Bernal et al., 2018). Le modèle de l'olivier de Morales et al. (2016) a également été décrit dans un article. Quelques valeurs sont également disponibles dans les données complémentaires (Morales et al., 2016). Le modèle de Moriondo et al. (2019) propose également quelques données (Moriondo et al., 2019). Ces résultats sont présentés dans le chapitre 5.

Les paramètres facilement mesurables sont déterminés à l'aide de mesures sur le terrain ou d'essais. Ainsi, les paramètres des équations allométriques ont été estimés à partir de mesures de morphologie des oliviers effectuées en France et en Italie. Chaque relation allométrique est représentée par une équation distincte (Tableau VI). La valeur des paramètres des différentes équations allométriques est présentée dans le chapitre 4 – partie 1.

Tableau VI : Les équations allométriques décrivant la morphologie de l'arbre dans le modèle Hi-sAFe. DBH (Diameter at Breast Height) et DCB (Diameter at Crown Base)

Relations allométriques	Nombre de paramètres	Equations
height vs. DBH	2	$height = a \times DBH^b$
CrowArea vs. DBH	2	$crowArea = a \times DCB^b$
Stem volume, DBH and Height	3	$volume = \exp(a) \times DBH^b \times height^c$
DCB vs. DBH	1	$DCB = DBH \times \min\left(1, \left(1 + \frac{(1.3 - PH)}{H}\right)^{\frac{1}{COEFF}}\right)$ Où H = tree height, PH = tree pruned height
Leaf area vs. crownVolume	2	$leafArea = a \times crownVolume^b$

Les paramètres de ces équations ont été calibrés à l'aide de mesures (Tableau VII) réalisées sur des oliviers non taillés et non soumis à une compétition lumineuse, localisés en France dans la région de Montpellier (Figure 32) et en Italie dans la région de Pérouse (Figure 34). Au total, 55 arbres ont été mesurés (22 en France et 33 en Italie).

Tableau VII : Liste des variables mesurées sur le terrain pour calibrer certaines équations allométriques

Paramètres mesurés	Unité
Localisation	Coordonnées GPS
Distance de plantation (dans le cas d'un verger)	M
Schéma de plantation (dans le cas d'un verger)	Carré, quinconce ou autre
Irrigation	Oui / non
Profondeur de la nappe perchée	M
Hauteur de l'arbre	m
DSL (circonférence à la base du tronc)	cm
Nombre de troncs	-
Hauteur de la base de la première charpentièr	cm

Circonférence du tronc à 80 cm	cm
DCB (circonférence à la base des branches)	cm
DBH (circonférence à 130 cm)	cm
Proportion du houppier contrôlé par DBH	%
Rayon du houppier en direction du sud	m
Rayon du houppier en direction de l'est	m
Rayon du houppier en direction du nord	m
Rayon du houppier en direction de l'ouest	m
Hauteur de la branche la plus haute au sud	m
Hauteur de la branche la plus haute à l'est	m
Hauteur de la branche la plus haute au nord	m
Hauteur de la branche la plus haute à l'ouest	m
Indice de compétition par les arbres voisins	Echelle de 1 à 5 (0 = pas de compétition et 5 = compétition importante)



Figure 33 : Carte de répartition des oliviers non taillés mesurés en France pour calibrer les relations allométriques



Figure 34 : Carte de répartition des oliviers non taillés mesurés en Italie pour calibrer les relations allométriques

Deux autres essais ont également été effectués sur le domaine INRAE de Melgueil (DIASCOPE) pour identifier des valeurs de paramètres du module fruit. La méthodologie de ces deux essais est présentée dans l'article « Parametrization of an agroforestry model: from forest trees to olive trees », publié en 2023 dans *Acta horticulturae*.

Les valeurs des paramètres (issues des données de littérature, des essais expérimentaux ou des mesures des équations allométriques) sont présentées dans l'article « Upgrading the Hi-sAFe agroforestry model for fruit trees. Application to Olive tree » (Chapitre 5 – partie 2).

L'analyse de sensibilité

Une analyse de sensibilité a été réalisée pour identifier les paramètres les plus influents sur les sorties du modèle. Cette analyse implique des choix tels que la sélection des paramètres à analyser, les gammes de variations associées ainsi que les variables de sortie à étudier. Cette analyse permet d'identifier les paramètres "sensibles" pour les variables de sortie sélectionnées, qui doivent être finement ajustés pour améliorer la précision du modèle (Figure 35). Les choix d'application de l'analyse de sensibilité (des paramètres, des gammes de variations, des variables de sorties) sont présentés dans l'article « Upgrading the Hi-sAFe agroforestry model for fruit trees. Application to Olive tree » (Chapitre 5 – partie 2 – Tableau VII). Les résultats de l'analyse de sensibilité sont également présentés dans cet article.

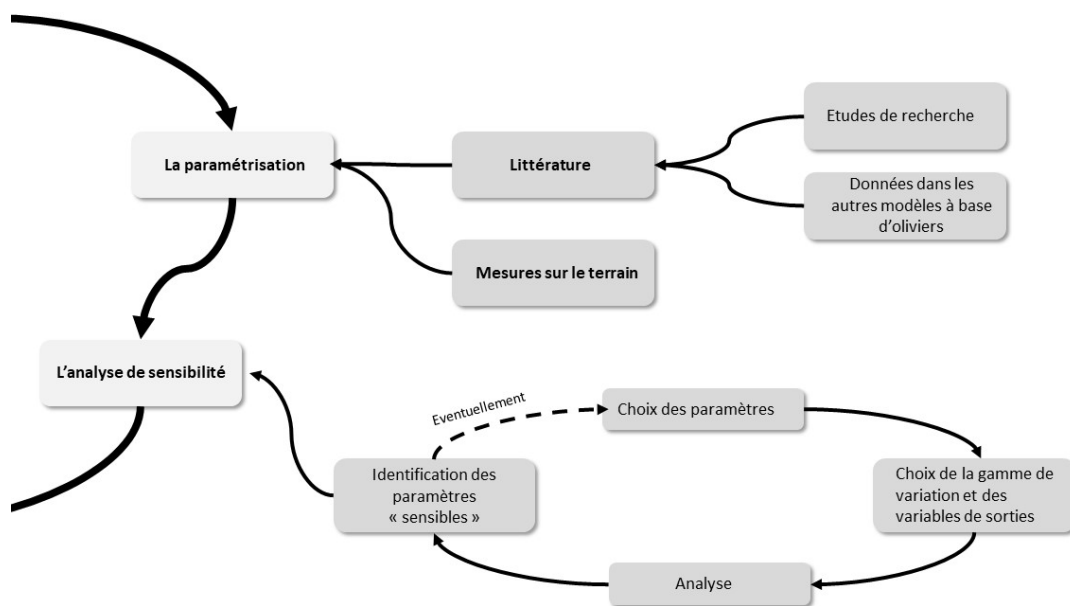


Figure 35 : Représentation schématique des grandes étapes dans le processus de paramétrisation et d'analyse de sensibilité des paramètres d'un modèle agronomique

La calibration

Une calibration permet d'obtenir les valeurs de paramètres qui ne sont pas mesurables directement, soit, car ils n'ont pas un sens biologique clair, soit, car on manque de données. Elle implique des choix tels que la sélection des paramètres à calibrer, les gammes de variation associées, les variables de sortie à comparer et le nombre de simulations. L'objectif de la calibration est donc d'ajuster certains paramètres (ceux qui n'ont pu être paramétrés précédemment dans la partie paramétrisation) afin que les variables de sorties simulées soient le plus proche possible des variables mesurées sur le terrain.

La liste des paramètres sélectionnés est disponible dans l'article « Upgrading the Hi-sAFe agroforestry model for fruit trees. Application to Olive tree » (Chapitre 5 – partie 2 – Tableau IX).

Les variables de sorties que j'ai choisies pour calibrer le modèle (et donc pour lesquelles l'objectif était d'obtenir la plus petite différence entre les données simulées et observées) sont des variables de morphologie des oliviers et de productivité des oliviers. Des détails sont présentés dans l'article « Upgrading the Hi-sAFe agroforestry model for fruit trees. Application to Olive tree » (Chapitre 5 – partie 2). Le choix de ces variables est directement lié aux données observées disponibles dans la base de données.

Une base de données pré-existante à la thèse a été utilisée pour la calibration. Ces données ont été récoltées sur une parcelle d'oliviers du domaine INRAE de Melgueil (DIASCOPE). Concernant cette base de données, des informations complémentaires (parcelle, itinéraires techniques, variables observées, etc.) sont disponibles dans l'article « Upgrading the Hi-sAFe agroforestry model for fruit trees. Application to Olive tree » (Chapitre 5 – partie 2).

Dans un premier temps, j'ai généré 7 000 combinaisons de valeurs de paramètres à l'aide de la méthode d'échantillonnage hypercube latin (LHS). La méthode LHS permet de garantir une sélection bien répartie des valeurs des paramètres dans l'espace multidimensionnel. Dans un second temps, je devais lancer 7 000 simulations (une simulation par combinaison de valeurs de paramètres). En sachant qu'une simulation met approximativement 30 minutes à tourner sur un ordinateur de bureau (Intel Core i7-8665U CPU, 1.90 GHz, 16.0 Go de RAM), l'ordinateur classique ne convient pas. En effet, il aurait fallu attendre 3 500 heures, soit près de 146 jours, pour obtenir les résultats des 7 000 simulations.

C'est pour cette raison que j'ai décidé d'utiliser le cluster de calcul¹ hébergé par Muse de l'Université de Montpellier en raison de sa puissance de calcul. Ce supercalculateur a permis de passer de 146 jours de simulations à une semaine de simulations, les simulations pouvant se faire en parallèle : cela signifie que 21 simulations étaient lancées en simultanément sur 21 cœurs du cluster (il fallait que le nombre de simulations soit divisible par le nombre de cœurs utilisés, or, je ne pouvais utiliser que quelques cœurs disponibles sur le cluster, celui-ci étant utilisé par beaucoup de personnes).

Dans un troisième temps, j'ai rapatrié les résultats des 7 000 simulations sur mon ordinateur afin d'analyser les différentes combinaisons de paramètres et leurs résultats. Cette étape est également très chronophage et nécessite de nombreuses heures de transfert.

Mon objectif était de sélectionner les combinaisons de valeurs de paramètres pertinentes avec le plus faible RMSE_p (Root-Mean-Square Error of prediction). Le RMSE_p est l'indice le plus couramment utilisé en modélisation et représente l'erreur de prédiction quadratique moyenne. Cette mesure est calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$RMSE_p = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Valeur\ simulée\ i - Valeur\ observée\ i)^2}$$

Où n correspond au nombre de variables de sortie

En d'autres termes, j'ai confronté les variables simulées aux variables observées issues de la base de données de l'olivieraie du domaine INRAE de Melgueil (DIASCOPE). Cette analyse est effectuée avec un script de calibration, lancé sur R. La meilleure simulation (au RMSE_p le plus faible) est analysée en détail pour vérifier le bon fonctionnement du modèle avec ces valeurs de paramètres (Figure 36). En calculant le RMSE_p pour chaque combinaison de paramètres, j'ai ainsi pu sélectionner la combinaison correspondant au RMSE_p le plus faible tout en vérifiant la cohérence des variables de sorties qui n'étaient pas prises en compte dans la calibration (j'ai vérifié que les valeurs des variables n'étaient pas aberrantes).

Des compléments d'informations ainsi que les résultats sont disponibles dans l'article « Upgrading the Hi-sAFe agroforestry model for fruit trees. Application to Olive tree » (Chapitre 5 – partie 2).

¹ <https://meso-lr.umontpellier.fr/>

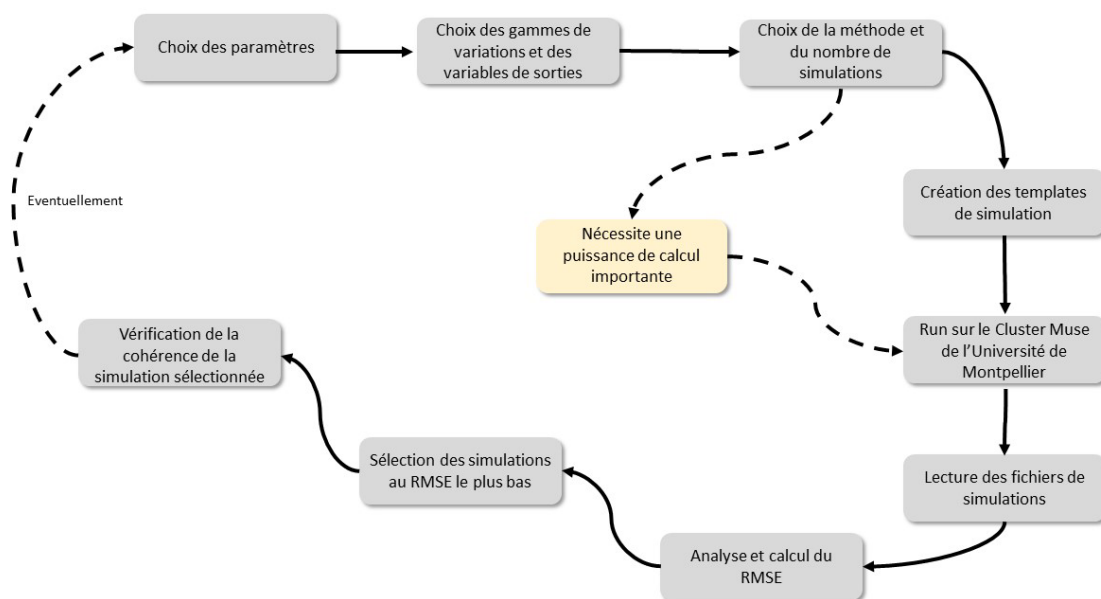


Figure 36 : Représentation schématique des grandes étapes dans le processus de calibration des paramètres d'un modèle agronomique

La validation

Après la réalisation de simulations avec le modèle, il est primordial de valider ses résultats en utilisant d'autres bases de données afin de garantir leur fiabilité et de vérifier que le modèle ne soit pas sur-calibré. Par conséquent, deux autres bases de données différentes sont utilisées pour vérifier le modèle et comparer les données simulées avec les données observées. Afin d'évaluer la qualité du modèle, l'indice RMSEp est encore utilisé et doit rester le plus faible possible.

En plus de ces vérifications, des experts en oléiculture italienne, française et tunisienne, ont été sollicités pour évaluer la qualité de certaines variables de sortie du modèle. Ces experts ont une expérience solide dans le domaine et leur validation renforce la confiance dans le modèle. La validation par des experts est une étape cruciale qui permet de guider les recherches futures et d'améliorer les formalismes pour garantir une plus grande fiabilité des résultats. Cette étape contribue également à s'assurer que le modèle est pertinent pour les besoins de simulation actuels et peut être utilisé pour explorer les performances environnementales et agronomiques des systèmes agroforestiers à base d'oliviers.

Des compléments d'informations ainsi que les résultats sont disponibles dans l'article « Upgrading the Hi-sAFé agroforestry model for fruit trees. Application to Olive tree » (Chapitre 5 – partie 2).

De cette façon, le modèle est soumis à un processus rigoureux d'évaluations et de vérifications pour s'assurer qu'il est fiable et utile pour la recherche et la pratique en oléiculture (Figure 37).

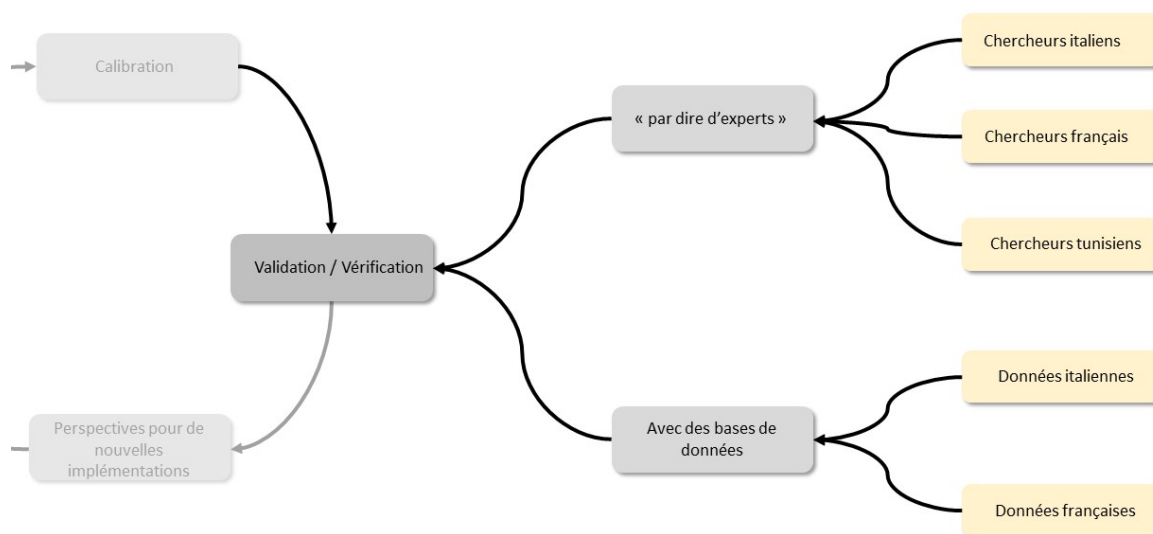


Figure 37 : Représentation schématique des grandes étapes dans le processus de validation / vérification du modèle Hi-sAFé

La modélisation et l'adaptation d'un modèle sont des processus continus qui requièrent une évolution constante afin de corriger les erreurs et d'ajouter de nouvelles fonctionnalités. De ce fait, tout travail de modélisation nécessite de fixer une version à utiliser, qui est jugée acceptable pour répondre aux questions posées, et de s'y tenir même si de nouvelles versions sont développées en cours de travail, au risque sinon de devoir recommencer indéfiniment à remettre à jour les simulations à chaque changement de version. Ainsi, la version utilisée pour réaliser les simulations présentées dans cette thèse est la version 4.2.1955 du modèle Hi-sAFé, basée sur la version 8.5 du modèle STICS et la version 1.2.6 de la plateforme Capsis.

2) L'approche participative

L'approche participative que j'ai suivie s'inscrit dans un contexte particulier qu'il est nécessaire de connaître pour comprendre sa place dans ma thèse. Initialement, mon travail de thèse devait s'appuyer sur une démarche participative portée, dans le cadre du WP1 du projet Biodiversify par une Ingénieure de Recherche INRAE. Dans le cadre de ma thèse, qui s'inscrivait en théorie uniquement dans le WP4 du même projet, je devais récupérer les résultats de l'atelier de co-conception, simuler les systèmes co-conçus, et fournir les sorties de simulations qui devaient servir de base à l'atelier de co-évaluation. Mais suite à une restructuration des missions de l'ingénieure, ce travail n'a pas été effectué car aucune des personnes impliquées dans le projet n'a pu prendre rapidement en charge ce travail. En voyant cette situation qui n'évoluait pas, en anticipant le temps nécessaire pour constituer un réseau d'acteurs et en examinant le diagramme de Gantt de ma thèse (qui prévoyait que l'atelier de conception aurait eu lieu lors de ma première année de thèse), j'ai pris la décision stratégique de reprendre ces missions. Cette décision n'a pas été évidente et a été très mal acceptée par les chercheurs français du WP1 du projet Biodiversify. Un doctorant n'étant pas censé porter une telle mission dans un projet international, mais c'était une décision nécessaire pour assurer la pertinence de mes simulations vis-à-vis des attentes de la profession. Sachant que je

n'avais pas toutes les compétences dans cette thématique, je me suis rapproché d'experts en approche participative pour bénéficier de leurs conseils tant sur la constitution du réseau d'acteurs que sur l'organisation des ateliers participatifs. De plus, afin de monter en compétences rapidement sur les ateliers, je me suis immergé dans la bibliographie sur les approches participatives, notamment le manuel de facilitation rédigé par l'équipe du Lisode. J'ai également eu la chance de participer en tant qu'observateur à un atelier de co-conception porté par l'UERI de Gotheron. Ce socle de connaissance acquis m'a permis d'organiser, et de gérer les ateliers de co-conception et de co-évaluation des résultats. J'ai commencé à monter un réseau d'acteurs dans l'urgence afin d'avoir des acteurs de la filière oléicole, pour bénéficier de leurs connaissances pour me guider dans mon travail de modélisation et évaluer, avec eux, les sorties du modèle. Je n'espérais pas pouvoir réunir plus d'une demi-douzaine de personnes, mais ma démarche a plu aux acteurs et le réseau s'est étoffé au fur et à mesure. Les oléiculteurs ont parlé de ma démarche aux conseillers agricoles et aux responsables de FranceOlive (Association Française Interprofessionnelle de l'Olive). J'ai gagné en visibilité et le réseau s'est agrandi. Finalement, plus de 20 personnes ont manifesté leur intérêt pour mon projet et j'ai pu organiser les deux ateliers prévus dans le cadre du WP1 du projet Biodiversify. Malheureusement, au vu du décalage temporel du début de la démarche et du fait que je n'ai pas suivi exactement le même protocole que les autres cas d'étude du projet BIODIVERSIFY, mon travail n'a pas pu être valorisé dans le WP1.

A) La constitution et l'évolution du réseau d'acteurs

Afin de constituer un réseau d'acteurs potentiellement intéressés par la diversification des oliveraies, des acteurs oléicoles ayant des activités professionnelles diverses ont été contactés par email et/ou téléphone, notamment des oléiculteurs, des confiseurs, des chercheurs, des conseillers agricoles, des représentants de l'Association Française Interprofessionnelle de l'Olive² (FranceOlive), le directeur agronomique d'une coopérative agricole (Figure 38).

² <https://afidol.org/>

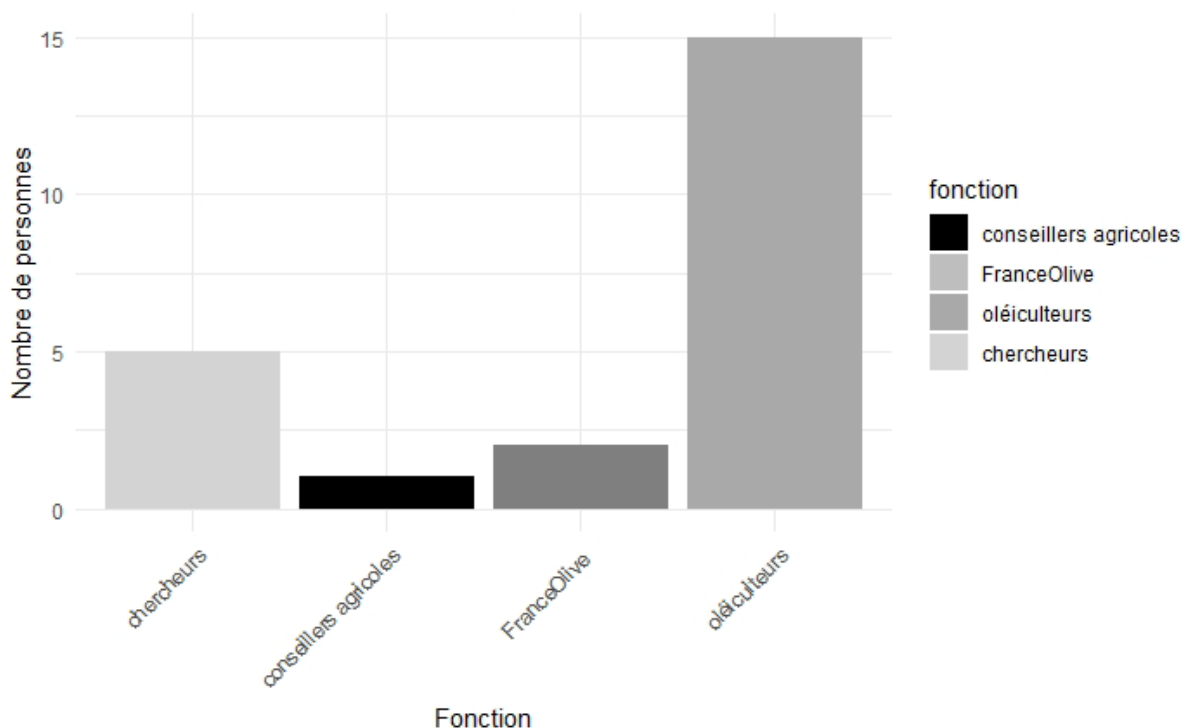


Figure 38 : Graphique de la répartition du nombre de personnes du réseau d'acteurs par activité professionnelle

Les coordonnées des acteurs sont identifiées sur Internet, notamment sur les sites de l'Institut Technique Oléicole, de FranceOlive, du CTIFL (Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes) et INRAE. Quant aux oléiculteurs, leurs coordonnées ont été obtenues à partir de leurs sites de vente en ligne ainsi que par l'intermédiaire des acteurs de FranceOlive présents sur leur site. Grâce à un effet « boule de neige », certains acteurs ont pu fournir les contacts d'autres acteurs.

Afin d'optimiser la participation des acteurs aux ateliers de co-conception et de co-évaluation, ceux-ci sont sélectionnés dans un rayon de 1h45 autour de Montpellier pour faciliter leurs déplacements. Au total, 68 acteurs ont été contactés, et 23 d'entre eux ont montré leur intérêt pour la démarche et se sont déclarés prêts à participer selon leurs disponibilités (Figure 39). Quatre acteurs ont refusé par manque de temps, tandis que les autres n'ont simplement pas répondu à la demande.

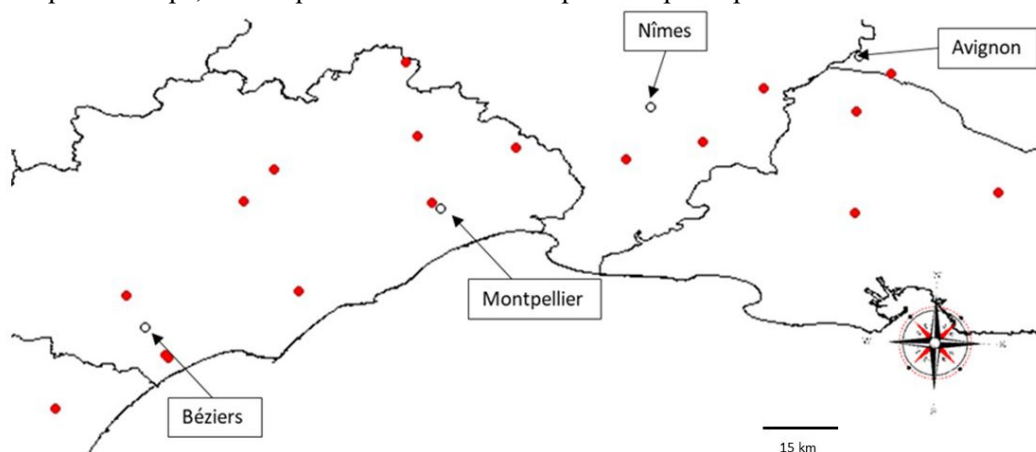


Figure 39 : Carte de répartition des différents acteurs intéressés pour participer aux ateliers de co-conception. Les ateliers participatifs ont été organisés à Montpellier

Le réseau d'acteurs impliqués dans la démarche s'est élargi au fil du temps et des discussions entre acteurs de la filière (Figure 40). L'intérêt des professionnels a grandi avec le temps. Ainsi, suite à une sollicitation, le 4 avril 2022, j'ai présenté la démarche à l'UPPO de l'Hérault (Union des Producteurs et Professionnels de l'Oliviers de l'Hérault), ce qui a suscité l'intérêt de nouveaux oléiculteurs pour participer aux ateliers. Le premier atelier de co-conception a eu lieu le 8 juin 2022. De nouveaux acteurs ont manifesté leur intérêt pour rejoindre le réseau d'acteurs en vue de participer à l'atelier suivant. Enfin, un atelier de co-évaluation des systèmes co-conçus a été organisé le 5 avril 2023.

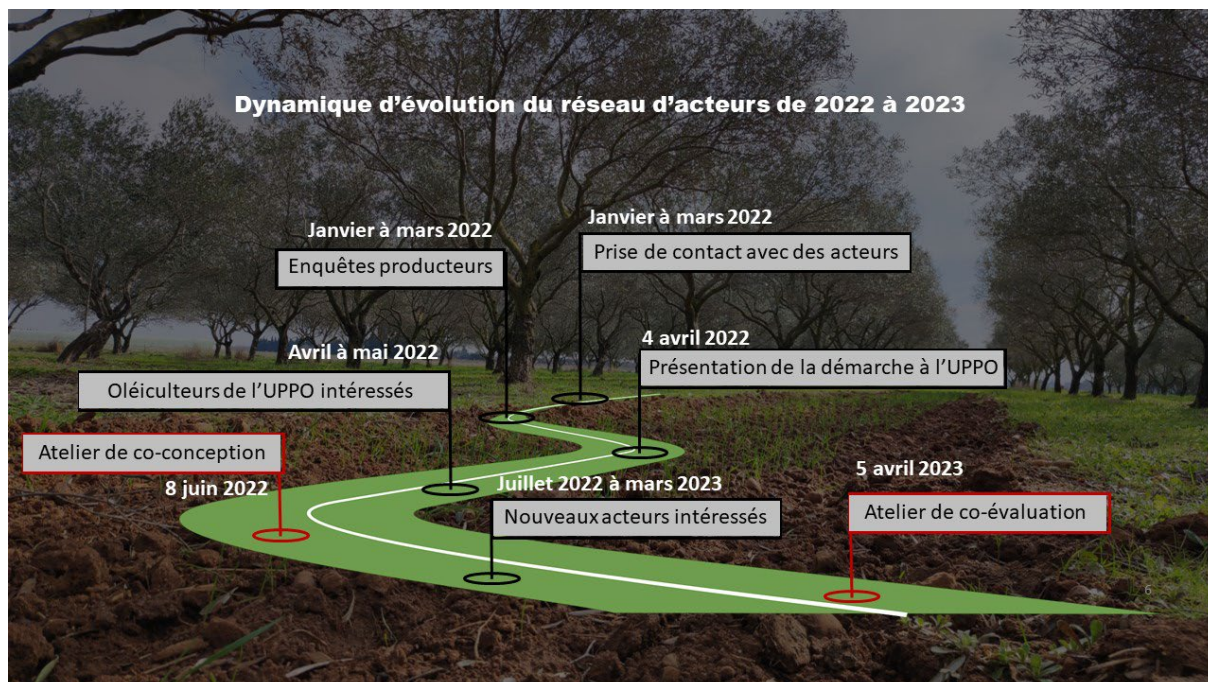


Figure 40 : Représentation schématique de la dynamique d'évolution du réseau d'acteurs entre 2022 et 2023. UPPO (Union des Producteurs et Professionnels de l'Oliviers de l'Hérault)

B) La rencontre individuelle des acteurs

Les acteurs intéressés par la démarche ont été rencontrés individuellement entre janvier et mars 2022 afin de : i) favoriser l'engagement des acteurs, ii) identifier des systèmes oléicoles innovants, iii) identifier des pistes à explorer pour de futures simulations. Les échanges avec les acteurs ont également permis de comprendre les différentes opérations culturales dans les oliveraies, telles que la taille, la gestion de l'inter-rang, l'irrigation, la fertilisation, la récolte, la lutte contre les bioagresseurs. Elles ont également permis d'identifier les défis auxquels sont confrontés les oléiculteurs. En amont des rencontres, j'ai préparé un questionnaire semi-directif afin d'orienter les discussions et d'emmener les acteurs à réfléchir à la notion de diversification des oliveraies.

Suite à ces discussions avec les professionnels, j'ai réalisé des fiches de présentation de chaque système diversifié mis en place ou imaginé par chaque acteur, mais au vu des normes RGPD, ces fiches nominatives ne sont pas diffusables telles quelles. Cela n'impacte pas la compréhension de la suite du travail de thèse car ces systèmes n'ont pas de lien direct avec l'atelier de co-conception ou de co-évaluation. Néanmoins, des discussions sont en cours pour valoriser ce travail annexe dans l'un des WP du projet Biodiversify.

C) L'organisation de l'atelier de co-conception

Afin de préparer l'atelier de co-conception, des réunions ont été organisées avec deux experts scientifiques en démarche participative, mes directeurs de thèse, les collègues choisis pour être rapporteurs de chaque sous-groupe et moi-même. Nous avons défini le cadre de l'atelier ainsi que son déroulement (objectifs, outils, acteurs, problématiques, ordre du jour, lieu, droit à l'image, intervenants, etc.). Suite à ces quatre réunions de planification, un ordre du jour et une invitation ont été envoyés aux acteurs précédemment rencontrés.

L'atelier de co-conception s'est déroulé le mercredi 8 juin, de 10h à 17h au Domaine de Restinclières (Figure 41). La matinée a été consacrée aux visites des parcelles expérimentales du Domaine de Restinclières et l'après-midi a été consacré à l'atelier de co-conception et à la présentation de l'outil d'évaluation (le modèle Hi-sAFé). Le choix du Domaine de Restinclières n'est pas anodin et a été longuement discuté lors de la préparation de cet atelier. Nous avons décidé de choisir ce domaine pour deux raisons : i) un lieu neutre qui évite la création de jeux de pouvoir entre les acteurs (ce qui aurait pu être le cas si l'atelier s'était déroulé chez un producteur), ii) sur le domaine de Restinclières, il existe plusieurs parcelles agroforestières. Ce lieu permettait d'organiser sur la matinée des visites de parcelles déjà existantes (mais sans oliviers) pour favoriser les échanges sur cette thématique.



Figure 41 : Photographie d'un sous-groupe de travail sur la co-conception de systèmes agroforestiers à base d'oliviers. © N. Barbault

L'objectif de cet atelier de co-conception était de réfléchir à la diversification des oliveraies et de co-concevoir un système de culture. Étant donné le nombre d'acteurs, l'atelier a été divisé en trois sous-groupes, constitués de manière à avoir des groupes hétérogènes, mais ayant des compositions comparables en termes de représentation des différentes professions. Chaque sous-groupe comprenait ainsi au minimum sept personnes, dont cinq acteurs (un conseiller agricole, un chercheur et trois oléiculteurs), un chercheur de l'Unité pour retranscrire les idées intéressantes et un facilitateur. Le facilitateur a quatre principales missions : i) assurer la participation de tous les acteurs, ii) encourager la compréhension mutuelle, iii) faciliter l'émergence de solutions partagées, iv) inciter les acteurs à prendre des initiatives (Penvern et al., 2018; Von Korff et al., 2013).

Afin d'optimiser les bénéfices de l'atelier de co-conception, les acteurs des trois sous-groupes travaillaient sur la même thématique principale : la diversification des oliveraies. Les sous-thématiques qui ont été traitées par les acteurs sont : i) les plantes de service et ii) les cultures intercalaires (Figure 42). Suite aux réunions de préparation, le choix s'est porté sur :

- Les plantes de services. En effet, lors des discussions avec les acteurs, un certain nombre d'entre eux m'ont rapporté le prix élevé et en hausse des engrais. Ainsi, il nous a semblé judicieux de travailler sur les plantes de service, permettant notamment d'augmenter la fertilité des sols.
- Les cultures intercalaires. En effet, lors des discussions avec les acteurs, un certain nombre d'entre eux m'ont rapporté leur volonté de diversifier leurs productions. Ainsi, il nous a semblé judicieux de travailler sur la diversification par des cultures intercalaires.

Le 1^{er} sous-groupe travaillait sur cette question : Comment diversifier une oliveraie avec des plantes de service ? En réponse aux différentes problématiques, les objectifs étaient d'imaginer un système capable d'augmenter la fertilité des sols et l'infiltration de l'eau et de diminuer l'érosion des sols.

Les sous-groupes 2 et 3 travaillaient sur cette question : Comment diversifier la production d'une oliveraie ? En réponse aux différentes problématiques, les objectifs étaient d'imaginer un système capable d'augmenter la fertilité des sols, l'infiltration de l'eau, et la productivité totale du système, ainsi que de diminuer l'érosion des sols.

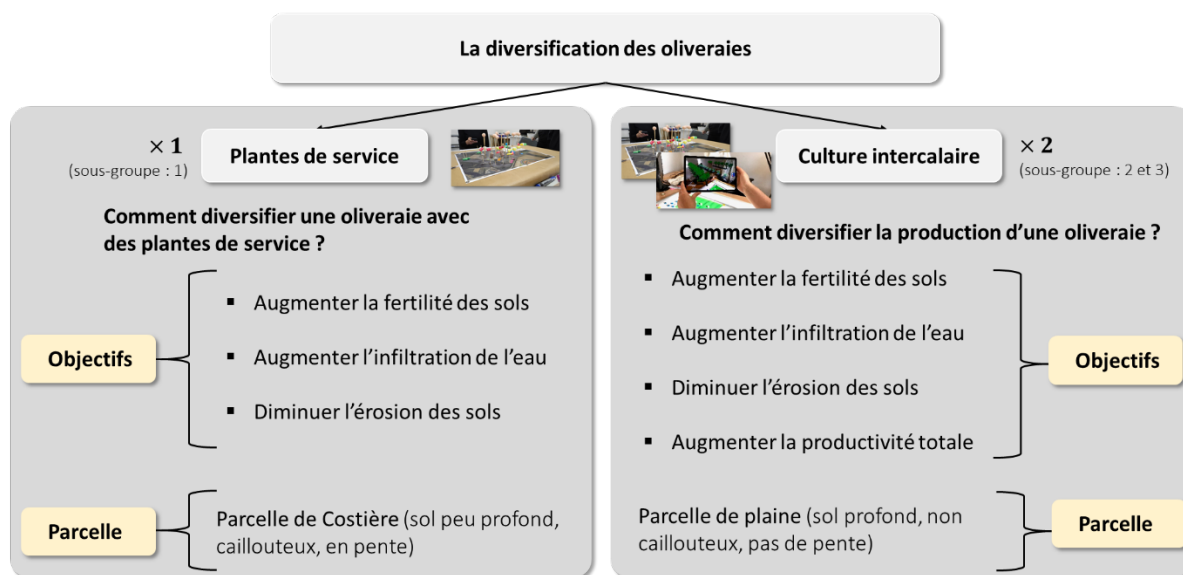


Figure 42 : Représentation schématique des objectifs de l'atelier dans le cadre de la diversification des oliveraies

Comme support à la co-conception, deux outils ont été utilisés lors de l'atelier : i) un support de conception 3D modulable (plateau en polystyrène), ii) un plateau magnétique associé à la visualisation par la réalité augmentée.

Le support de conception 3D modulable est constitué d'un plateau en polystyrène, de pics en bois et de boulettes à base d'amidon de maïs. Cet outil est totalement modulable (couleur, hauteur et assemblage), son appropriation est facile et permet de représenter visuellement une idée de conception de système en direct (Figure 43).



Figure 43 : Photographie d'un plateau de co-conception 3D modulable. © N. Barbault

Dans l'un des groupes, l'atelier a été l'occasion de tester le prototype d'un nouvel outil de visualisation par la réalité augmentée. Cet outil repose sur l'utilisation d'un plateau avec différents pions de couleurs et d'une application de visualisation disponible sur téléphone et/ou tablette (Figure 44). Il permet aux acteurs de visualiser leur système de culture selon l'encombrement spatial des plantes ainsi que leurs ombres (Lemière et al., 2022). Pour un groupe de six acteurs, seules trois tablettes étaient disponibles afin de minimiser la perte d'attention des acteurs due à cet outil et favoriser les échanges entre acteurs.



Figure 44 : Photographie de l'outil de visualisation (réalité augmentée) permettant de visualiser l'encombrement spatial des différentes espèces ainsi que leurs ombres portées. © M. Gosme

De même que précédemment, le choix des outils a été discuté minutieusement lors des quatre réunions de planification. En amont de l'organisation de l'atelier, j'avais été invité par une chercheuse experte en co-conception de systèmes à base de plantes pérennes, à l'un de ses ateliers de co-conception qui s'est tenu à l'INRAE de Gotheron. Lors de cette après-midi, je me suis familiarisé avec un outil de co-conception, à savoir le support de conception 3D modulable (plateau en polystyrène). De plus, suite à notre discussion avec les experts en co-conception, le choix de l'outil s'est porté vers le plateau pour son aspect modulable et sa facilité à représenter visuellement un système. En parallèle, j'avais échangé avec Laetitia Lemièrre qui développe un outil de visualisation (par la réalité augmentée) des systèmes co-conçus (Lemièrre 2023). Laetitia m'ayant démontré le potentiel de tels outils, j'ai décidé d'expérimenter cet outil dans l'un des sous-groupes. Bien sûr, ce choix d'outil a été validé lors des réunions de planification.

D) L'organisation de l'atelier de co-évaluation

De même que l'atelier de co-conception, l'atelier de co-évaluation a été minutieusement préparé pour fixer les objectifs, les acteurs, le déroulement, le contenu présenté et l'organisation de l'atelier.

L'atelier de co-évaluation des systèmes modélisés suite à l'atelier de co-conception s'est déroulé le mercredi 5 avril de 10h à 16h30 au domaine INRAE de Melgueil (DIASCOPE) (Figure 45). La matinée a été consacrée à la visite de la parcelle oliviers-céréales du Domaine Expérimental, tandis que l'après-midi a été réservé à la présentation des résultats de simulations (obtenus avec le modèle Hi-sAFé) et à l'atelier de co-évaluation.

Le choix du domaine INRAE de Melgueil (DIASCOPE) pour accueillir cet atelier a été fait car : i) c'est un lieu neutre, ii) sur le domaine INRAE de Melgueil (DIASCOPE), il existe une parcelle agroforestière avec des oliviers et une rotation de culture intercalaire. Ce lieu permettait d'organiser sur la matinée une visite de la parcelle agroforestière avec une présentation des résultats expérimentaux par l'équipe sur place, ce qui a permis de favoriser les échanges sur cette thématique l'après-midi lors de la co-évaluation des systèmes.



Figure 45 : Photographie de la visite de la parcelle olivier-céréales avec les acteurs lors de l'atelier de co-évaluation. © N. Barbault

L'objectif de l'atelier de l'après-midi était de réfléchir à l'évaluation agronomique et socio-économique de deux systèmes co-conçus : un système avec la diversification par des plantes de services, olivier-légumineuse, et un système avec la diversification des oliveraies : olivier-rotation (pois d'hiver, orge, blé) -laitue.

Pour permettre une participation optimale de tous les acteurs, l'atelier était divisé en trois sous-groupes, chacun comprenant sept personnes dont un conseiller agricole, un chercheur, trois oléiculteurs, un organisateur pour retranscrire les idées émergentes ainsi qu'un facilitateur.

Après une présentation des résultats de simulations des deux systèmes co-conçus, les acteurs ont été répartis en deux groupes pour travailler sur l'évaluation sociotechnique d'un système. Au cours de l'atelier, les participants ont été invités à réfléchir à la viabilité du système diversifié et à identifier ses points forts et ses points faibles, en prenant en compte l'évolution du système sur une période de plus de 20 ans. Ils ont également dû considérer les différentes structures d'exploitation qui pourraient adopter le système, ainsi que les améliorations à apporter pour faciliter son adoption, notamment en termes d'aspect temporel et des trois dimensions de la durabilité (agronomique, environnementale et sociotechnique).

En plus des discussions, deux questionnaires ont été distribués lors de la présentation des résultats de simulation dans le but d'obtenir leurs perceptions des systèmes oléicoles actuels et des systèmes oléicoles diversifiés. Cette initiative aurait dû permettre d'élargir la compréhension globale du groupe sur les différents systèmes oléicoles, tout en intégrant les points de vue individuels de chaque participant dans la discussion collective. Cependant, pour des raisons d'organisation, les questionnaires n'ont pas été remplis correctement. Les résultats ne sont donc pas exploitables et ne seront pas présentés dans le manuscrit.

3) L'évaluation par modélisation de différents systèmes agroforestiers à base d'oliviers sous climats actuel et futur

Les évaluations des performances des systèmes agroforestiers à base d'oliviers sont réalisées par modélisation à l'aide du modèle Hi-sAFe, aussi bien dans les conditions climatiques actuelles que futures. Pour le climat actuel, deux systèmes co-conçus lors de l'atelier de co-conception sont évalués. Quant au climat futur, un système agroforestier composé d'oliviers et d'une rotation triennale de blé, d'orge et de pois d'hiver est évalué.

Pour ces deux évaluations, un processus en plusieurs étapes est suivi, tel qu'illustré dans la figure ci-dessous (Figure 46). Tout d'abord, une question de recherche est définie. Ensuite, un plan d'expérimentation, composé de plusieurs modalités, est établi. Les systèmes de culture co-conçus précédemment sont ensuite adaptés aux capacités de simulation de la version 4.2 du modèle Hi-sAFe. Une fois cette étape accomplie, les templates de simulations sont créés et complétés, puis les simulations sont lancées avec la version 4.2. Les résultats des simulations sont ensuite analysés en utilisant différentes variables de sortie, et les modalités sont également comparées. Les résultats sont ensuite discutés, en prenant en compte des données issues de la littérature et des limites du modèle. Cette discussion ouvre de nouvelles perspectives de recherche et sert de base pour poser de nouvelles questions de recherche, qui pourront être évaluées à leur tour par modélisation.

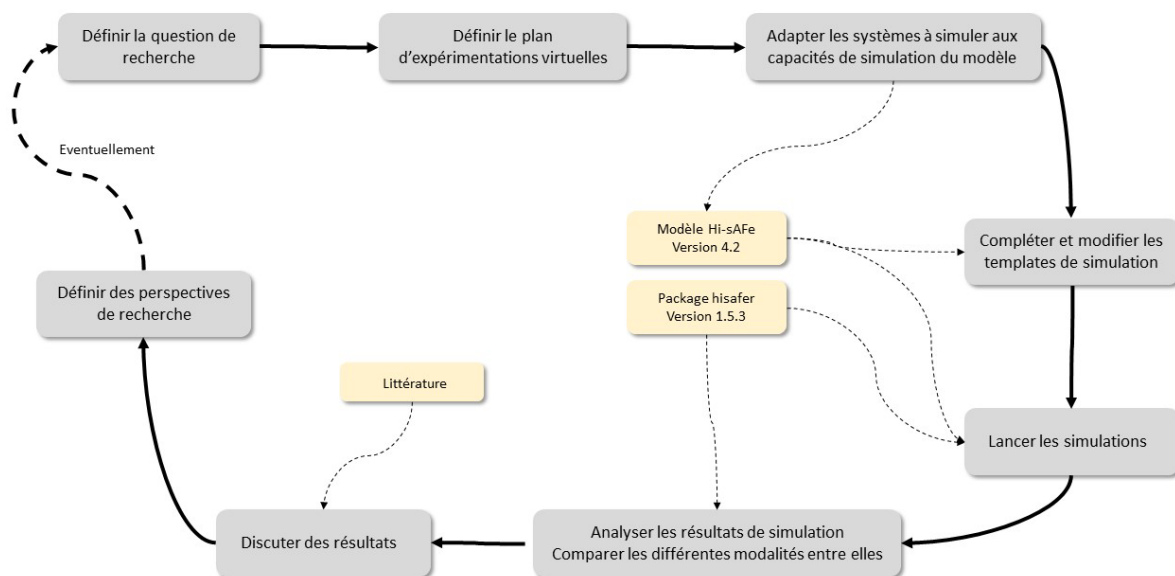


Figure 46 : Représentation schématisée des grandes étapes dans le processus d'évaluation des performances agronomiques et environnementales de systèmes agroforestiers à base d'oliviers

Bibliographie du chapitre 3

Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., 2003. An overview of the crop model STICS. *Eur. J. Agron.* 18, 309–332. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00110-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00110-7)

Brisson, N., Launay, M., Mary, B., Beaudoin, N., 2009. *Conceptual Basis, Formalisations and Parameterization of the Stics Crop Model*. Editions Quae, Paris.

Brisson, N., Ruget, F., Gate, P., Lorgeou, J., Nicoulaud, B., Tayot, X., Plenet, D., Jeuffroy, M.-H., Bouthier, A., Ripoche, D., 2002. STICS: a generic model for simulating crops and their water and nitrogen balances. II. Model validation for wheat and maize. *Agronomie* 22, 69–92. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00110-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00110-7)

Dupraz, C., Wolz, K., Lecomte, I., Talbot, G., Vincent, G., Mulia, R., Bussière, F., Ozier-Lafontaine, H., Andrianarisoa, S., Jackson, N., Lawson, G., Dones, N., Sinoquet, H., Lusiana, B., Harja, D., Domenicano, S., Reyes, F., Gosme, M., Van Noordwijk, M., 2019. Hi-sAFe: A 3D Agroforestry Model for Integrating Dynamic Tree–Crop Interactions. *Sustainability* 11, 2293. <https://doi.org/10.3390/su11082293>

Grimm, V., 1994. Mathematical models and understanding in ecology. *Ecol. Model.* 75, 641–651. [https://doi.org/10.1016/0304-3800\(94\)90056-6](https://doi.org/10.1016/0304-3800(94)90056-6)

Jakeman, A.J., Letcher, R.A., Norton, J.P., 2006. Ten iterative steps in development and evaluation of environmental models. *Environ. Model. Softw.* 21, 602–614. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2006.01.004>

Lemière, L., Jaeger, M., Subsol, G., Gosme, M., 2022. Graphs theory applied to agroforestry system design. Poster H10. In : *En transition vers un monde viable*. Québec : Université de Laval-IUAF-ICRAF, Résumé, 1 p. Congrès mondial d'agroforesterie, Québec, Canada.

- López-Bernal, Á., Morales, A., García-Tejera, O., Testi, L., Orgaz, F., De Melo-Abreu, J.P., Villalobos, F.J., 2018. OliveCan: A Process-Based Model of Development, Growth and Yield of Olive Orchards. *Front. Plant Sci.* 9, 632. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00632>
- Morales, A., Leffelaar, P.A., Testi, L., Orgaz, F., Villalobos, F.J., 2016. A dynamic model of potential growth of olive (*Olea europaea* L.) orchards. *Eur. J. Agron.* 74, 93–102. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.12.006>
- Moriendo, M., Leolini, L., Brilli, L., Dibari, C., Tognetti, R., Giovannelli, A., Rapi, B., Battista, P., Caruso, G., Gucci, R., Argenti, G., Raschi, A., Centritto, M., Cantini, C., Bindi, M., 2019. A simple model simulating development and growth of an olive grove. *Eur. J. Agron.* 105, 129–145. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.02.002>
- Penvern, S., Chieze, B., Simon, S., 2018. Trade-offs between dreams and reality: Agroecological orchard co-design. Presented at the Proceedings 13th European IFSA Symposium, pp. 1–5.
- Talbot, G., 2012. L'intégration spatiale et temporelle du partage des ressources dans un système agroforestier noyers-céréales: une clef pour en comprendre la productivité? Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, France.
- Van Nes, E.H., Scheffer, M., 2005. A strategy to improve the contribution of complex simulation models to ecological theory. *Ecol. Model.* 185, 153–164. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2004.12.001>
- Von Korff, Y., Dionnet, M., Imache, A., Geney, C., Rougier, J.-E., Leteurtre, E., Dolinska, O., 2013. Manuel de facilitation.
- Whisler, F., Acock, B., Baker, D., Fye, R., Hodges, H., Lambert, J., Lemmon, H., McKinion, J., Reddy, V., 1986. Crop simulation models in agronomic systems. *Adv. Agron.* 40, 141–208. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60282-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60282-5)

PARTIE III

Résultats

Chapitre 4 : L'adaptation du modèle Hi-sAFé aux oliviers : la paramétrisation

La première partie de ce chapitre présente la paramétrisation des équations allométriques qui conditionnent les dimensions de l'arbre.

La deuxième partie met en avant les résultats des expérimentations menées sur l'unité expérimentale INRAE de Melgueil, DIASCOPE. Deux essais ont été réalisés pour identifier deux valeurs de paramètres qui n'étaient pas discutées dans la littérature. Les résultats de ces expérimentations ont été présentés lors du Congrès International d'Horticulture à Angers en 2022, sous forme d'une communication orale. Ces résultats ont ensuite été publiés sous forme d'article dans *Acta Horticulturae* (ACL, revue indexée dans le WOS). Dans le chapitre suivant, chapitre 5, l'ensemble de la démarche d'adaptation du modèle est présenté. Cette démarche inclut l'implémentation, la paramétrisation, l'analyse de sensibilité, la calibration et la vérification du modèle.

1) La paramétrisation des équations allométriques régissant les dimensions de l'olivier

A) L'équation allométrique : DBH vs. Hauteur

Les paramètres de l'équation DBH (diamètre du tronc à hauteur de poitrine) vs. Hauteur a été calibrée à partir des dimensions de 55 oliviers non taillés et peu soumis à une compétition pour les ressources, mesurés en France et en Italie.

$$\text{Hauteur (DBH)} = a \times \text{DBH}^b$$

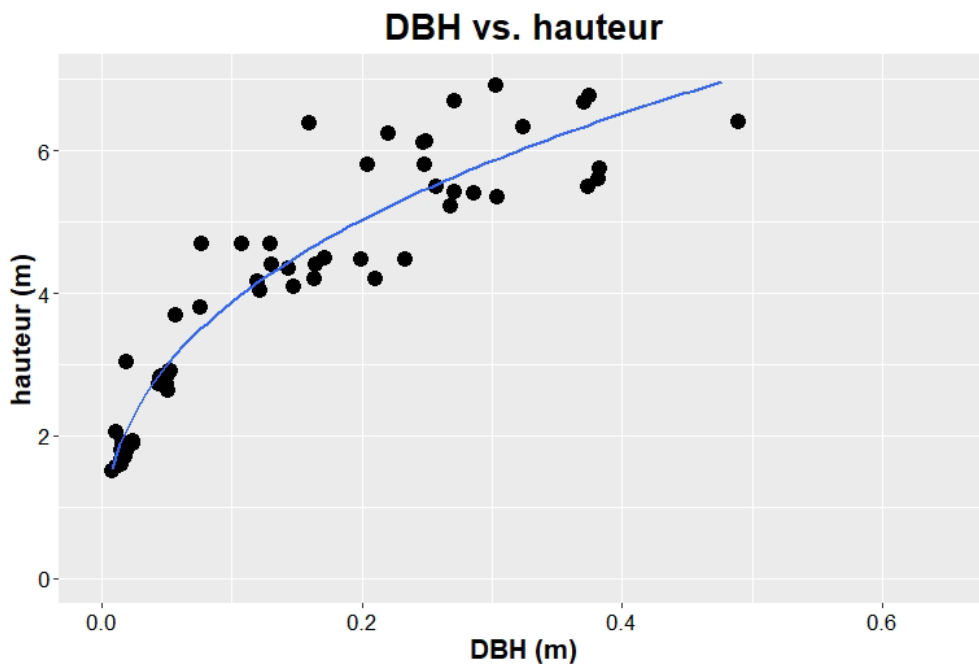


Figure 47 : Graphique de DBH en fonction de la hauteur pour 55 oliviers

Les paramètres a et b de l'équation sont estimés respectivement à 9.67 et à 0.39 (Figure 47).

B) L'équation allométrique : Surface foliaire vs. DCB

Les paramètres de l'équation Surface foliaire vs. DCB (diamètre du tronc à la base du houppier) a été calibrée à partir des dimensions de 55 oliviers non taillés et peu soumis à une compétition pour les ressources, mesurés en France et en Italie.

$$\text{Surface foliaire (DCB)} = a \times \text{DCB}^b$$

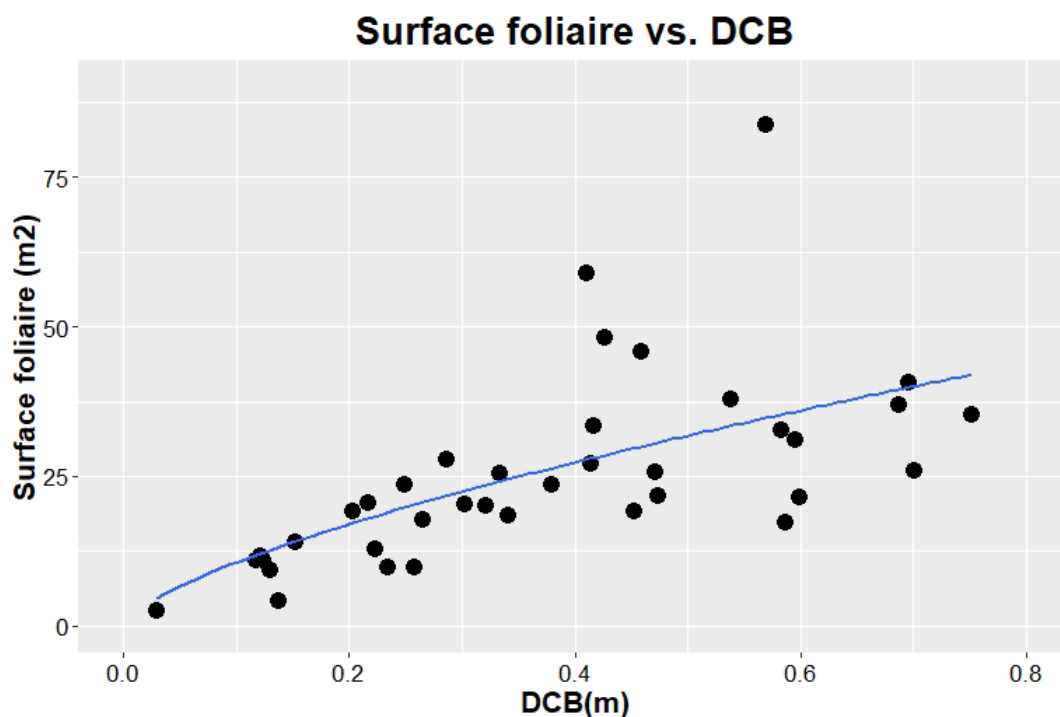


Figure 48 : Graphique de la Surface foliaire en fonction de DCB pour 55 oliviers

Les paramètres a et b de l'équation sont estimés respectivement à 51.73 et à 0.69 (Figure 48).

C) L'équation allométrique : Volume du tronc - DBH - Hauteur

L'équation Volume du tronc - DBH - Hauteur est calibrée à partir des dimensions de 42 oliviers, non taillés et peu soumis à une compétition pour les ressources, mesurés en France et en Italie. La calibration a été réalisée sur un nombre limité d'oliviers, car certaines mesures nécessaires pour quantifier le volume du tronc n'étaient pas réalisables sur tous les oliviers, en particulier les jeunes oliviers.

$$\text{Volume du tronc (DBH, Hauteur)} = e^a \times \text{DBH}^b \times \text{Hauteur}^c$$

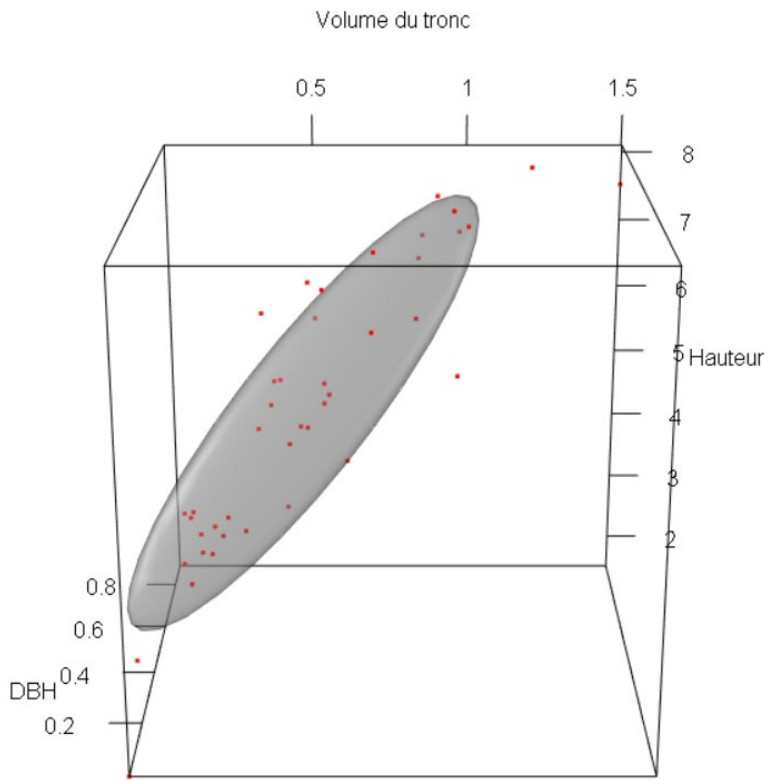


Figure 49 : Graphique de DBH et volume du tronc en fonction de la hauteur pour 42 oliviers (graphe 1/2)

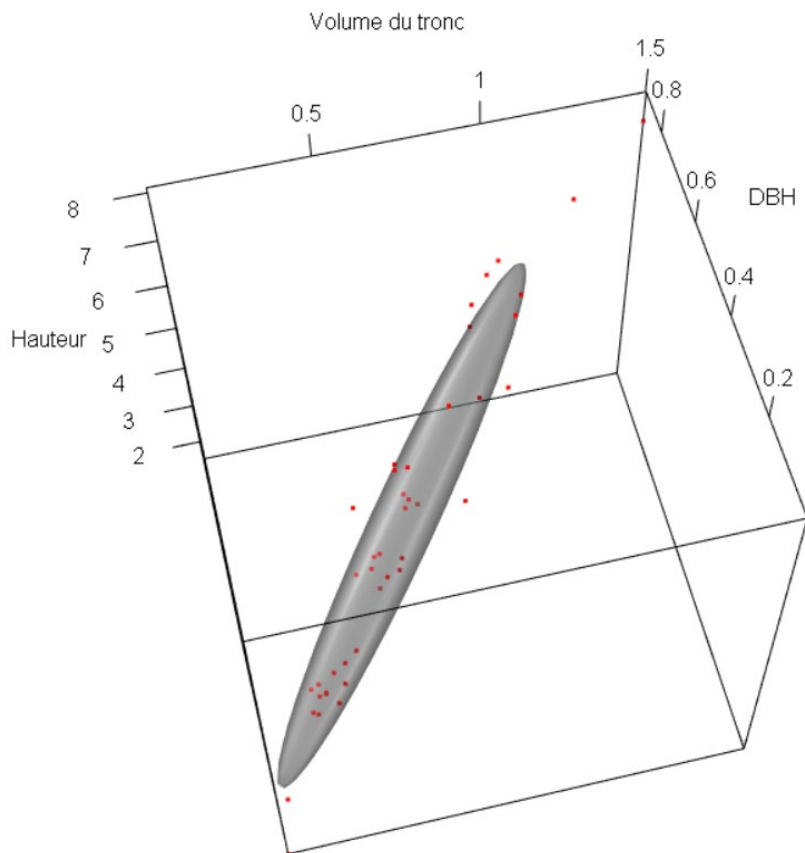


Figure 50 : Graphique de DBH et volume du tronc en fonction de la hauteur pour 42 oliviers (graphe 2/2)

Le paramètre a est fixé à l'aide du solveur Excel à -1.27. La valeur des paramètres b et c sont estimés respectivement à 0.72 et 0.81 (Figure 49 et Figure 50).

D) L'équation allométrique : DCB vs. DBH

L'équation DCB vs. DBH est calibrée à partir des dimensions de 42 oliviers, non taillés et peu soumis à une compétition pour les ressources, mesurés en France et en Italie. La calibration a été réalisée sur un nombre limité d'oliviers, car certaines mesures nécessaires pour quantifier le volume du tronc n'étaient pas réalisables sur tous les oliviers, en particulier les jeunes oliviers.

$$DCB (DBH, PH, H) = DBH \times \min\left(1, \left(1 + \frac{(1.3 - PH)^{COEFF}}{H}\right)\right)$$

Où H = tree height, PH = tree pruned height

La valeur du paramètre correspond à 2.14. Cependant, sur certains oliviers, le tronc ne se poursuit pas jusqu'à 1.20 m de hauteur, ce qui a nécessité une mesure alternative de la circonférence des charpentières à cette hauteur. Cette méthode de mesure alternative a introduit des imprécisions dans les données, et pour y remédier, les circonférences DSL (circonférence à la base du tronc) à 80 cm et DBH ont été lissées pour obtenir des valeurs cohérentes avec la réalité.

E) L'équation allométrique : Surface foliaire - Volume du houppier

L'équation surface foliaire - volume du houppier a été calibrée à partir des dimensions de six oliviers : trois oliviers ont été mesurés lors d'un essai à Manguio et trois autres oliviers ont été mesurés à Clapiers. Ces données ont été complétées par des données issues de la littérature et du manuscrit de thèse de Melanie Häusler (Häusler et al., 2014), qui ont mesuré des oliviers dans un verger non irrigué à Monte de Outeirinho. Dans cette base de données, la surface foliaire totale de l'arbre (en m²) et le volume de la couronne des oliviers (en m³) ont été estimés (Figure 51). De plus, d'autres données sont fournies dans un article de Brunori et al. (2017) (Brunori et al., 2017)

$$surface\ foliaire\ (volume\ du\ houppier) = a \times volume\ du\ houppier^b$$

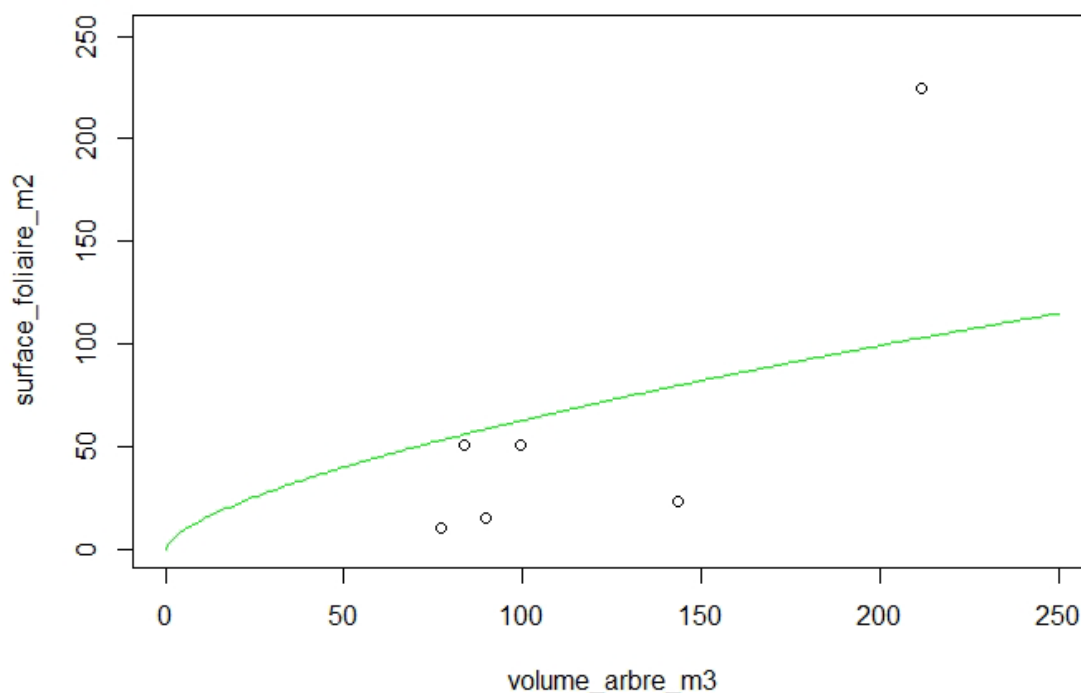


Figure 51 : Graphique de la Surface foliaire en fonction du volume du houppier pour six oliviers mesurés à Manguio et Clapiers

La courbe verte a été sélectionnée pour calibrer les paramètres de cette équation. Les valeurs retenues pour les paramètres sont $a = 6.88$ et $b = 0.52$.

Bibliographie de la partie 4.2

Brunori, A., Dini, F., Cantini, C., Sala, G., La Mantia, T., Caruso, T., Marra, F.P., Trotta, C., Nasini, L., Regni, L., Proietti, P., 2017. Biomass and volume modeling in *Olea europaea* L. cv “Leccino.” *Trees* 31, 1859–1874. <https://doi.org/10.1007/s00468-017-1592-9>

Häusler, M., Ferreira, M.I., Conceição, N., 2014. Assessment of vegetation parameters in olive trees in the region of alentejo: a comparison of direct and indirect methods. *Acta Hort.* 407–414. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1038.49>

2) Les valeurs des paramètres mesurées au Domaine expérimental d’INRAE de Manguio

A) Résumé de l’article

Cet article présente deux essais menés à INRAE de Manguio (Domaine de Melgueil, DIASCOPE) visant à estimer deux valeurs de paramètres qui ne sont pas identifiables dans la littérature. Les résultats de ces essais ont été présentés lors d’une communication orale au congrès international d’horticulture à Angers en 2022.

Le premier essai a été réalisé en 2021 dans une oliveraie de 19 ans dans le domaine expérimental d'INRAE. L'objectif était d'identifier le nombre maximal de fruits par m² de surface foliaire et d'estimer la quantité maximale d'allocation de carbone des fruits par m² de surface foliaire. Trois génotypes à forte charge en fruits ont été étudiés, issus d'une descendance ('Arbequina' x 'Oliviere'). Les variables mesurées comprenaient le nombre de fruits par arbre, la matière sèche de 100 fruits, la circonférence de toutes les branches, la surface foliaire moyenne d'une feuille (estimée par le logiciel Winfolia®) et le nombre de feuilles sur les branches sélectionnées à des positions différentes dans l'arbre. À partir de différentes relations allométriques, la surface foliaire par arbre a été calculée pour les trois arbres. Les arbres étaient hétérogènes en termes de nombre de feuilles, de surface foliaire totale et de nombre de fruits, même s'ils avaient une charge en fruits élevée basée sur une expertise visuelle. Pour chaque arbre, le nombre total de fruits a été estimé. Le nombre maximal de fruits par m² de surface foliaire variait de 760 à 1 356 fruits/m², permettant d'estimer le nombre maximal de fruits par m² de surface foliaire à 1 356. Ce paramètre est crucial dans le modèle pour initier chaque année le nombre de fruits, qui est ensuite réduit par un indice de stress carboné pour tenir compte des phénomènes d'irrégularité de production.

Le deuxième essai, mené également en 2021 dans une oliveraie de Mauguio, avait pour objectif d'identifier l'allocation maximale de carbone par fruit et par jour, ainsi que la dynamique d'allocation de carbone aux fruits. Trois variétés ('Leccino', 'Cypressino' et 'Manzanille') ont été étudiées, avec trois oliviers sélectionnés par variété. Chaque semaine après la nouaison des fruits, 10 olives par arbre ont été récoltées et pesées. Les olives ont été séchées dans une étuve jusqu'à obtenir une masse sèche constante, et la quantité de carbone a été calculée. Le poids sec des fruits a augmenté avec le temps. La variété 'Manzanille' avait un poids sec de fruit plus élevé, avec 13,77 g par fruit en moyenne, par rapport aux fruits des deux autres variétés, avec 9,3 g et 10,09 g en moyenne pour les variétés 'Leccino' et 'Cypressino', respectivement. Les valeurs sont similaires à celles obtenues par d'autres études antérieures. La valeur maximale d'allocation de carbone varie entre chaque variété. Les variétés d'olives 'Leccino', 'Cypressino' et 'Manzanille' ont été évaluées pour leur allocation maximale de carbone par fruit et par jour, donnant respectivement les valeurs de $3,92 \times 10^{-3}$ g, $4,36 \times 10^{-3}$ g et $7,29 \times 10^{-3}$ g de carbone/olive/jour. Cette valeur est considérée comme un paramètre variétal important pour réguler la taille des fruits en fonction de la charge de l'arbre. Bien que 'Leccino' et 'Cypressino' soient très similaires, une différence significative a été observée pour la variété 'Manzanille'. Dans notre modèle, nous avons choisi la valeur maximale de $7,29 \times 10^{-3}$ g de carbone/olive/jour pour ce paramètre crucial qui régit l'allocation de carbone aux olives, afin d'éviter des tailles disproportionnées de fruit en cas de faible charge.

B) Article publié dans *Acta horticulturae*

Barbault N., Dupraz C., Lauri P.E. and Gosme M. (2023). Parametrization of an agroforestry model: from forest trees to olive trees. *Acta Hort.* 1366, 211-218
DOI: 10.17660/ActaHortic.2023.1366.24

Parametrization of an agroforestry model: from forest trees to olive trees

N. Barbault, C. Dupraz, P.E. Lauri, M. Gosme
INRAE UMR ABSys, Montpellier, France

Abstract

The conventional cultivation of olive trees can lead to environmental degradations such as soil erosion and loss of biodiversity. Agroforestry systems could bring solutions to these environmental degradations. A simulation model able to represent the growth and interactions between olive trees and annual crops would be useful to rapidly test and evaluate innovative olive-based agroforestry systems without the need for space and time-consuming field experiments. The Hi-sAFe model simulates agroforestry systems in three dimensions according to interactions between forest trees and annual crops for water, nitrogen and light. However, this model was developed and parameterised only for forest trees and not for fruit trees whose balance between the vegetative and the fruit organs is crucial. Two main adaptations were made to the model to simulate olive-based agroforestry systems: the addition of a fruit-setting module and the carbon allocation module adaptation. Here, we present the experimental estimation of two important parameters of these modules, both at tree scale: the maximum number of fruits m^{-2} leaf area and the maximum daily carbon allocation to fruits. The maximum fruit load per olive trees was estimated at 1356 fruits per m^2 leaf area using three genotypes of an ‘Arbequina’ × ‘Oliviere’ progeny. To determine the maximum daily carbon allocation to fruits, we hypothesized a cultivar effect. For these reason, nine olive trees, of three cultivars (‘Leccino’, ‘Cypressino’ and ‘Manzanille’), with a low fruit load were selected from the three cultivars, and samples of fruits were dry-weighted every week for 12 weeks during fruit growth. The maximum daily carbon allocation to fruits (g carbon olive $^{-1}$ day $^{-1}$) varied significantly between ‘Leccino’ and ‘Cypressino’ (3.9×10^{-3} and 4.3×10^{-3} , respectively) and ‘Manzanille’ (7.3×10^{-3}). The value of these two parameters not identifiable in the literature can be set to 1356 fruits m^{-2} of leaf area (maximum number of fruits m^{-2} leaf area) and at 7.3×10^{-3} g carbon olive $^{-1}$ day $^{-1}$ (maximum daily carbon allocation to fruits).

Keywords: innovative systems, Hi-sAFe model, carbon allocation, leaf area, fruit, agroforestry

INTRODUCTION

In the case of olive tree, *Olea europaea* L., three main cropping systems dominate: traditional or extensive (140 trees ha^{-1}), semi-intensive (up to 400 trees ha^{-1}) and intensive (up to 2500 trees ha^{-1}) (Loumou and Giourga, 2003; Russo et al., 2016). These systems can, in some cases, lead to environmental impacts including soil erosion and loss of biodiversity (Gómez et al., 2009; Milgroom et al., 2007). One of the solutions to environmental degradation and loss of diversity may be biodiversified systems, such as agroforestry systems.

Agroforestry systems are defined as a set of agricultural practices that combine trees with crops and/or livestock. These systems can maximise production per land unit area, increasing the total yield of the system (tree and crop products) by up to 30% compared to the rotation of agricultural plots on one side and the reforestation of an agricultural plot on the other (Dupraz and Liagre, 2011). In these systems, trees are mostly of forest origin, like walnut and poplar trees. Fruit trees are currently seen as a strongly added value to agroforestry and in these systems, the main crop is often the fruit tree instead of forest trees (Pantera et al., 2018). Indeed, 11% of the total European agroforestry area is composed of fruit trees especially olive and apple trees (Lauri et al., 2019).

To test and evaluate different agroforestry systems, the dynamic-3D and mechanistic model Hi-sAFe has been developed. The model is based on two assumptions: i) the productivity of agroforestry systems depends on the acquisition of heterogeneous resources by trees and crops in

the environment, and ii) the interaction between trees and crops is governed by the aerial, subterranean and phenological plasticity of plants. The Hi-sAFe model is able to simulate agroforestry systems according to interactions between trees and crops for water, nitrogen and light. Simulations are performed over the entire life of the system: from planting to tree harvest (Dupraz et al., 2018, 2019; Reyes et al., 2021). Currently, this model is parameterised only for three tree species: poplars, hybrid walnuts and wild cherry. The Hi-sAFe model is not adapted to simulate fruit trees like olive trees and no relevant model has been found in the literature to simulate agroforestry systems including fruit trees. To adapt the Hi-sAFe model to fruit trees, several formalisms have been added to it to simulate the growth and yield of olive trees: a phenological scale describing fruit phenology, a modification of leaf senescence allowing evergreen foliage, a balance between the fruit and vegetative compartments and carbon allocation to the fruit compartment.

In the literature, some values are available for parametrisation, but experimental design and/or measurement units are not always detailed. Consequently, experiments were conducted in 2021 at INRAE in Mauguio to found the required values for the model parametrization.

In this article, we will focus on some basic architectural parameters that are necessary to represent fruit trees and we will discuss the parameterisation of maximal fruit number $m-2$ leaf area and maximum daily carbon allocation per fruit.

MATERIALS AND METHODS

New formalisms added to Hi-sAFe to incorporate fruits

Hi-sAFe model is composed of several input variables: i) weather, ii) soil description, iii) crop description, iv) tree description, v) tree and crop technical itinerary description. For tree description, 127 parameters were required and separated on different modules (Table 1). Some parameters were specific to fruit trees and the other were parameterized and calibrated for olive trees.

Table 1. Summary of number of parameters per module within Hi-sAFe model.

Tree module parameters	Number of parameters	parameterized (P), calibrated (C), measured (M)	Generic formalisms or fruit tree formalisms
Generic	3	P + M	Generic
Phenology	11	P	Generic
Light	12	P + C	Generic
Microclimate	4	P + C	Generic
C allocation	34	P + C + M	Generic
Roots	13	P + C	Generic
Water repartition	7	P + C	Generic
Fruit compartment	27	P + C + M	Fruit tree

Each day, a daily amount of carbon is assimilated by the tree. Depending on the phenological stage, the carbon can be allocated to the labile carbon compartment (i.e. the carbon reserve) or to growth (Figure 1).

The carbon allocated to growth is distributed according to the above-ground and below-ground carbon equilibrium. The carbon allocated to the aerial compartments is distributed to four compartments: leaves, branches, stump and stem. In addition, a fruit module is implemented to simulate fruit trees, including the fruit carbon compartment. The fruit carbon allocation module is based on two formalisms (Figure 1): 1) the number of fruits and flowers, 2) the carbon partitioning to fruits and flowers. This module is initialised by a variable: the initial net number of flowers. This variable is calculated according to the leaf area (maximal fruit number $m-2$ leaf area) and the labile carbon reserves of the tree. At the time of flowering, this number of initial flowers decreases with both heat (Koubouris et al., 2009) and cold stresses (Barranco et al., 2005). This number can also be reduced by a cultural practice, called fruit thinning. At the time of flowering, the number of initial flowers is divided by the duration of flowering. Consequently, a daily number of flowers appears at the time of flowering (number of flowers days⁻¹). For the carbon allocation to the flower and fruit compartment, a carbon sink is calculated. The latter is computed as a function of a carbon allocation parameter to the fruit compartment and as a function of the maximum daily carbon allocation per fruit. According to Villalobos et al. (2006), 50% of the carbon allocation to the aerial compartment is allocated to the fruit compartment in a fruitful olive tree. The fruit compartment becomes the priority for carbon allocation. Therefore, two carbon sink variables are calculated: i) the daily carbon available to fruit based on the coefficient of Villalobos et al. (2006), and ii) the maximum daily fruit growth. The minimum value of these two sinks corresponds to the carbon allocated to the fruit compartment.

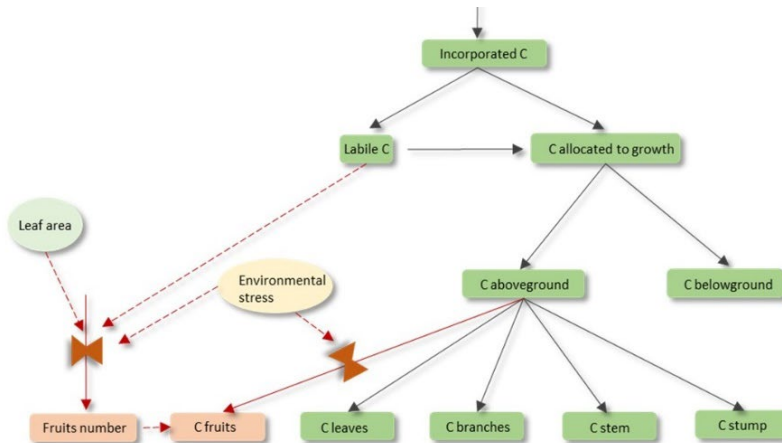


Figure 1. Conceptual scheme of carbon (C) allocation module in the Hi-sAFe model.

In this fruit compartment, two most important parameters must be measured to parameterize this model: the maximal fruit number m^{-2} of leaf area and the maximal daily fruit growth.

Parameterisation of the fruit carbon allocation

Two experiments were conducted to parametrise the model. The first experiment was carried out in an 19 year old olive grove at INRAE’s experimental domain in Mauguio, in the South of France, in 2021. The goal of this experiment was to identify the maximal fruit number m^{-2} leaf area and to estimate the maximal quantity of fruit carbon allocation m^{-2} leaf area. This experiment was carried out on three genotypes with a high fruit load (estimated the maximal number of fruits m^{-2} of leaf area) issued from a progeny (‘Arbequina’ × ‘Oliviere’). For each genotype, eight production units (i.e. the part of the branch bearing fruits, Figure 2; Chol et al., 2011) were identified in bottom and top positions within the tree. To test, the position effect in the number of leaves in the olive tree (top or bottom position), a multiple linear model (leaf ~circumference + position) was used.

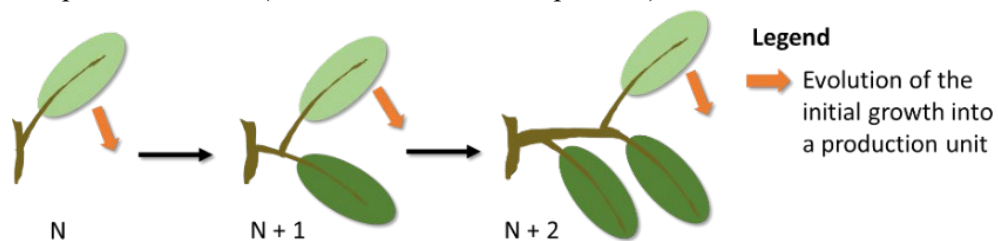


Figure 2. Distinction and evolution over time of initial growth (clear green) to production units (dark green) in the olive tree.

In this experiment, some variables were measured: number of fruits $tree^{-1}$, dry matter of 100 fruits, circumference of all branches, sample of individual leaf area (estimated by Winfolia® software), number of leaves on selected branches. Other variables were estimated including the number of fruits m^{-2} leaf area and the maximal quantity of fruits carbon allocation m^{-2} leaf area (Figure 3).

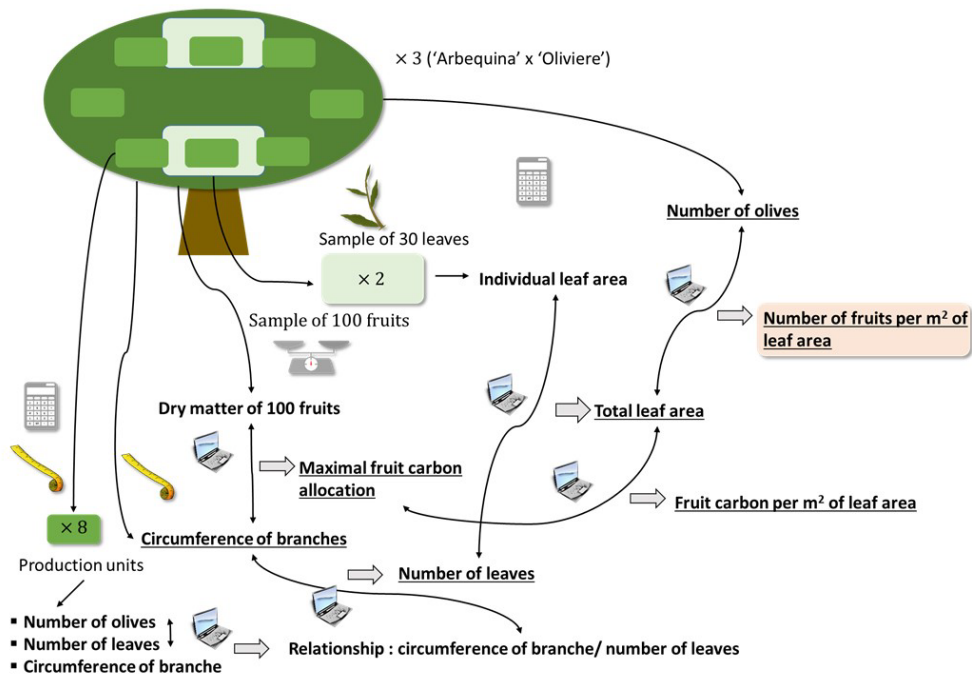


Figure 3. Protocol of the experiment to determine the number of fruits per m² of leaf area. To determine leaf area, Winfolia[®] software was used. The underlined variables are those calculated at the tree level, the others are calculated at the leaf production unit level.

The second experiment was carried out in another olive grove of the same experimental domain in Manguio (France), in 2021. The goal of this experiment was to identify the maximum carbon allocation per fruit and per day, and to identify the dynamic of carbon allocation to fruits. This experiment was carried out in three cultivars: 'Leccino', 'Cypressino' and 'Manzanille'. For each cultivar, three olive trees with a low fruit load (to avoid fruit to fruit competition) were selected by expert opinion. Every week after fruit setting, 10 olives tree⁻¹ were harvested. These olives were weighed to record their fresh weight (FW). The olives were placed into an oven at 70°C until a constant dry mass was reached. The olive dry mass was converted into olive carbon quantity by a constant ratio 0.42 (Brisson et al., 2009). The dynamics of carbon content as a function of time since flowering was approximated with a linear relationship with an intercept at 0.

Statistical analyses

For the first experiment, a linear model was used to test the relation between number of leaves and circumference (with a significance level of 5%) as a function of leaves position: circumference and intercept. To determine the effect of genotype on leaf area, a Kruskal-Wallis test was used. For the second experiment, ANOVA was used to test the effect of tree cultivar on the slope of olive dry matter against time.

RESULTS AND DISCUSSION

Maximal fruit number per m² leaf area

The single leaf area of the production units of three olive trees varied from 2.74 to 3.72 cm². The correlation between the circumference and the number of leaves was positive (p-value <0.001; Figure 4).

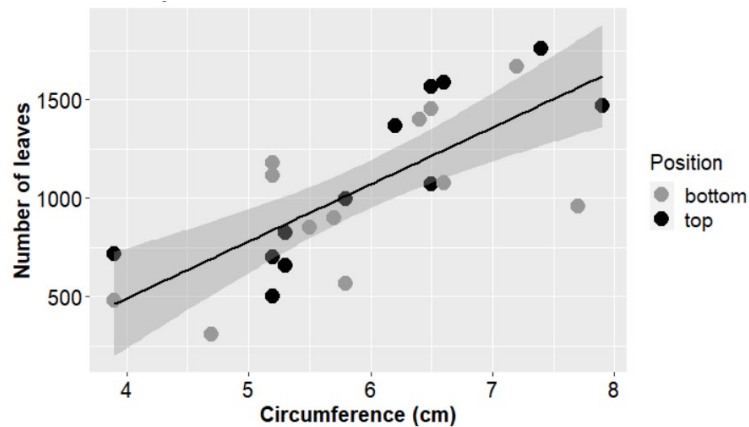


Figure 4. Linear relation between the circumferences of the production units (see Figure 1) and their number of leaves for three trees of a progeny of ‘Arbequina’ x ‘Oliviere’. Each value represents a production unit per tree at different positions within the trees (bottom in grey color and top in black color). No significant differences between position in tree canopy were observed (multiple linear model (leaves ~ circumference + position), p-value = 0.55) and a unique equation was generated. Linear equation: $Y = -663.79 + 288.98x$ (p-value < 0.001).

Based on this relationship, the leaf area per tree was computed for the three collected trees (Table 2).

Table 2. Main variables calculated to estimate the maximal fruit number per m² of leaf area in a progeny (‘Arbequina’ x ‘Oliviere’). Significant differences in leaf area according to genotype (olive tree number) (Kruskal-Wallis test, p-value = 2.33×10^{-5}).

Olive tree code	Number of leaves	Average leaf area of one leaf (cm ²)	Total leaf area (m ²)	Number of olives	Dry matter (g for 100 fruits)	fruits per m ² leaf area (fruits m ⁻²)	Fruit Carbon per m ² leaf area (g C m ⁻²)
G8	55021	2.74	15.07	19906	51.47	1356	293.25
J17	27012	3.72	10.04	6826	69.83	706	207.01
K43	70835	3.24	22.93	26240	60.50	1172	297.86

The three olive trees, although with a same fruit-load based on a visual expertise, were heterogeneous in terms of number of leaves, total leaf area and number of fruits. Leaf area and number of olives tree-1 could vary by a factor of two and four, respectively. The quantity of fruit carbon m⁻² leaf area vary by a factor of less than two. It is likely that these numbers of olives kg-1 were related to a high load if we compare to results of the number of olives kg-1 of medium load trees that vary between 188 at 356 fruits (‘Gemlik’) (Uylaser et al., 2008).

The maximal fruit m⁻² of leaf area, allow initiating the number of fruits tree-1 and this parameter was parameterised at 1356 fruits m⁻² leaf area (G8 genotype).

To illustrate, the maximal fruit number m⁻² leaf area parameter is very important parameters, and allows to estimating the fruits tree-1 (Figure 5).

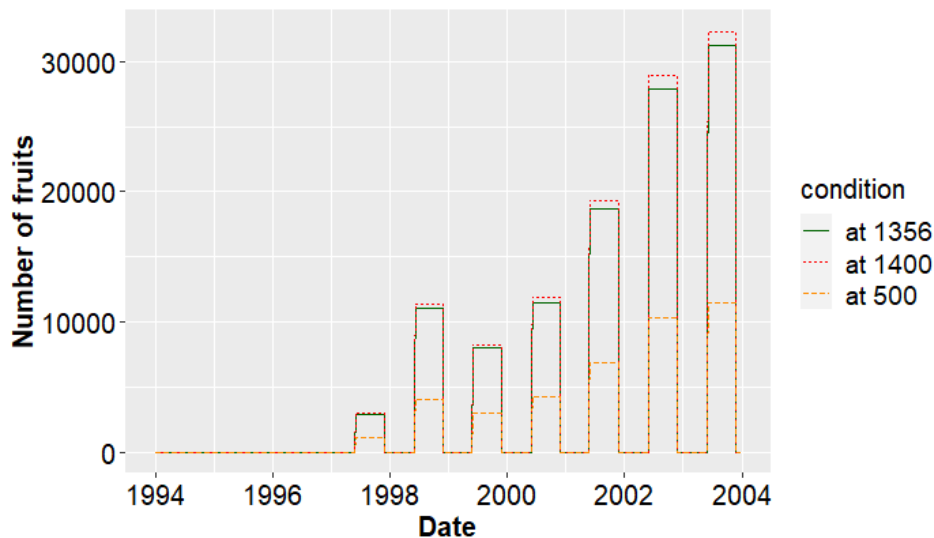


Figure 5. Modelling results: fruits number of olive tree in comparison with different values for the maximal fruit number per m^2 leaf area parameter.

Maximum daily carbon allocation per fruit

The fruit dry mass increased with time. The ‘Manzanille’ cultivar had larger fruit dry weight, with 13.77 g fruit⁻¹, in comparison with fruits of the other two cultivars, with 9.3 and 10.09 g for ‘Leccino’ and ‘Cypressino’ cultivars, respectively (Figure 6). These values are similar to the ones obtained by Giuffrè (2017) on ‘Leccino’ and by Hartmann (1948) on ‘Manzanille’, although in this latter case no clear indication of fruit load is given.

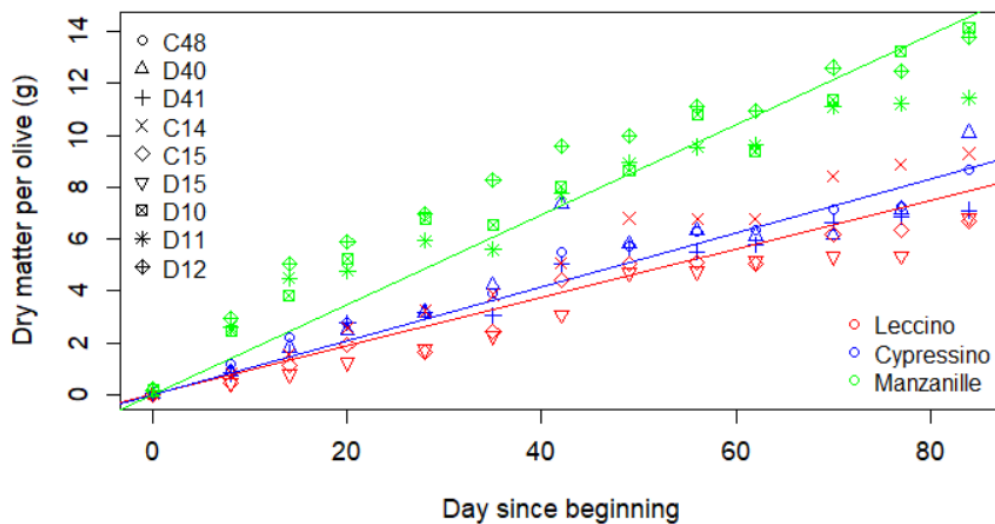


Figure 6. Seasonal pattern of dry matter in olives of three varieties (‘Leccino’, ‘Manzanille’ and ‘Cypressino’). Each point is a single value measured on a batch 10 olives per tree. Significant effect of variety on the slope of olive dry matter against time (ANOVA, $p\text{-value} = 3.90 \times 10^{-5}$).

The maximum carbon allocation value varied between each cultivar. The maximum carbon allocation per fruit and per day was calculated at 3.92×10^{-3} , 4.36×10^{-3} and 7.29×10^{-3} g carbon/olive/day for ‘Leccino’, ‘Cypressino’ and ‘Manzanille’ cultivar, respectively.

This parameter can thus be considered as a varietal parameter. ‘Leccino’ and ‘Cypressino’ were very similar, but a difference exists for ‘Manzanille’. However, this experiment was carried out only in one year and one geographical location. To confirm these values further experiments should be carried out.

CONCLUSION AND PERSPECTIVES

To adapt this model to olive trees, a number of formalisms have been added and the ranges of the parameters were identified. Experiments were carried out on olive trees to determine two parameters: the maximal fruit number $m-2$ leaf area and the maximal daily carbon allocation per fruit. The values obtained for these parameters were estimated at 1356 for the maximal fruit number $m-2$ leaf area parameter and 7.29×10^{-3} for the maximal daily carbon allocation per fruit parameter.

This model could also be used to further analyze the productivity of agroforestry systems. For example, a recent article analyzed wheat yield obtained on an almond/wheat agroforestry system (Zhang et al., 2022). Although wheat yield is impacted by the shape and position of the trees, we consider that canopy porosity, not taken into account in Zhang et al., (2022) study, should also be considered. In the Hi-sAFe model, fruit tree pruning decreasing leaf density could be used to identify optimal canopy porosity to increase the yield of the agroforestry system.

In perspectives, once parameterized and calibrated, the Hi-sAFe model will be used to test and evaluate different agroforestry systems based on olive trees. Co-design workshops are currently organized with different stakeholders (olive growers, agricultural advisors, researchers) with the objective to design innovative systems. These systems co-constructed will be tested and evaluated according to different agronomic outputs (fruit yield, fruit weight, oil content) and different environmental outputs (water runoff, nitrogen leaching, water infiltration, nitrogen mineralization). Their sustainability will also be evaluated using IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) climate projections.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank M. Delalande and P. Sartre for the use of a plot of olive trees in INRAE’s experimental domain in Mauguio.

Literature cited

- Barranco, D., Ruiz, N., Campo, M.G. (2005). Frost Tolerance of Eight Olive Cultivars. *HortScience* 40, 558–560.
- Brisson, N., Launay, M., Mary, B., Beaudoin, N., (2009). Conceptual Basis, Formalisations and Parameterization of the Stics Crop Model. Editions Quae, Paris.
- Chol, P., Lauri, P., Moutier, N., (2011). Growing Fruit Trees: Novel Concepts and Practices for Successful Care and Management. Norton Ed., USA, pp. 209–225.
- Dupraz, C., & Liagre, F. (2011). *Agroforesterie, des arbres et des cultures*. 2ème éditions. Editions France Agricole.
- Dupraz, C., Blitz-Frayret, C., Lecomte, I., Molto, Q., Reyes, F., & Gosme, M. (2018). Influence of latitude on the light availability for intercrops in an agroforestry alley-cropping system. *Agroforestry Systems*, 92(4), 1019-1033.
- Dupraz, C., Wolz, K., Lecomte, I., Talbot, G., Vincent, G., Mulia, R., Bussière, F., Ozier-Lafontaine, H., Andrianarisoa, S., Jackson, et al. (2019). Hi-sAFe: A 3D Agroforestry Model for Integrating Dynamic Tree–Crop Interactions. *Sustainability*, 11(8), 2293.
- Giuffrè, A. M. (2017). Biometric evaluation of twelve olive cultivars under rainfed conditions in the region of Calabria, South Italy. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 29(9), 696-709.
- Gómez, J. A., Álvarez, S., & Soriano, M.-A. (2009). Development of a soil degradation assessment tool for organic olive groves in southern Spain. *CATENA*, 79(1), 9-17.
- Hartmann, H. T. (1948). Growth of Olive Fruit. *Econ Bot* 2, 341-362.

- Koubouris, G.C., Metzidakis, I.T., Vasilakakis, M.D. (2009). Impact of temperature on olive (*Olea europaea* L.) pollen performance in relation to relative humidity and genotype. *Environ. Exp. Bot.* 67, 209–214.
- Lauri, P.-É., Barkaoui, K., Ater, M., & Rosati, A. (2019). Agroforestry for fruit trees in Europe and Mediterranean North Africa. In *Burleigh Dodds Series in Agricultural Science* (p. 385-418). Burleigh Dodds Science Publishing.
- Loumou, A., & Giourga, C. (2003). Olive groves: "The life and identity of the Mediterranean". *Agriculture and Human Values*, 20, 87-95.
- Milgroom, J., Auxiliadora Soriano, M., Garrido, J. M., Gómez, J. A., & Fereres, E. (2007). The influence of a shift from conventional to organic olive farming on soil management and erosion risk in southern Spain. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 22(1), 1-10.
- Pantera, A., Burgess, P. J., Mosquera Losada, R., Moreno, G., López-Díaz, M. L., Corroyer, N., McAdam, J., Rosati, A., Papadopoulos, A. M., Graves, et al. (2018). Agroforestry for high value tree systems in Europe. *Agroforestry Systems*, 92(4), 945-959.
- Reyes, F., Gosme, M., Wolz, K. J., Lecomte, I., & Dupraz, C. (2021). Alley Cropping Mitigates the Impacts of Climate Change on a Wheat Crop in a Mediterranean Environment : A Biophysical Model-Based Assessment. *Agriculture*, 11(4), 356.
- Russo, C., Cappelletti, G., Nicoletti, G., Di Noia, A., & Michalopoulos, G. (2016). Comparison of European Olive Production Systems. *Sustainability*, 8(8), 825.
- Uylaser, V., Tamer, C. E., İncedayı, B., Vural, H., & Çopur, Ö. U. (2008). The quantitative analysis of some quality criteria of Gemlik variety olives. *J Food, Agric Environ*, 6(3-4), 26-30.
- Villalobos, F. J., Testi, L., Hidalgo, J., Pastor, M., & Orgaz, F. (2006). Modelling potential growth and yield of olive (*Olea europaea* L.) canopies. *European Journal of Agronomy*, 24(4), 296-303.
- Zhang, W., Xie, H., Han, S.-A., Wang, M., Pan, M.-Q., Qiao, X., & Li, L. (2022). Effect of tree form on wheat yield via changing microenvironment in almond–wheat intercropping. *Agroforestry Systems*, 96(2), 387-406.

Chapitre 5 : L'adaptation du modèle Hi-sAFe aux arbres fruitiers : analyse de sensibilité, calibration et vérifications

Ce chapitre 5 présente un article à soumettre dans *Environmental Modelling and Software* qui décrit la nouvelle version du modèle Hi-sAFe adaptée aux oliviers. Cet article reprend les grandes étapes dans le processus d'adaptation d'un modèle à une nouvelle espèce, à savoir l'implémentation de formalismes, la paramétrisation, l'analyse de sensibilité, la calibration et la vérification du modèle (Figure 52).

1) Résumé de l'article

Pour implémenter les formalismes nécessaires à la modélisation de l'olivier, deux modules ont été ajoutés : le module fruits et le module de cohorte de feuilles. Ces formalismes sont essentiels, car l'olivier est un arbre fruitier à feuilles persistantes, et ils n'étaient pas inclus dans le modèle de base.

- Pour modéliser la production d'arbres fruitiers, le module "fruit" a été développé pour intégrer l'allocation de carbone aux fruits, le nombre de fruits, ainsi que l'impact de différents stress abiotiques sur la production de fruits. Ce module permet d'estimer le rendement en fruits ainsi que le rendement en huile.
- Pour modéliser les arbres à feuilles persistantes, différentes cohortes de feuilles ont été implémentées, chacune correspondant à une année de végétation. Chaque cohorte vieillit indépendamment des autres, permettant ainsi d'appliquer les processus liés à l'âge, tels que la sénescence, l'activité photosynthétique et la sensibilité aux contraintes hydrique et azotée, à chaque groupe séparément. Pour l'olivier, notre modèle permet la gestion de trois cohortes de feuilles simultanément.

Par ailleurs, la conduite des arbres fruitiers diffère notablement de la conduite des arbres forestiers. De nouvelles opérations culturales ont donc été ajoutées pour pouvoir simuler les pratiques des agriculteurs sur les arbres fruitiers, l'un des éléments essentiels pour l'évaluation *ex-ante* des systèmes agroforestiers (Chapitre 2 - partie 2) : la récolte des fruits, la gestion de la charge des fruits (ou l'éclaircissage), la taille des rameaux intérieurs (ici simplifiée par une réduction homogène dans tout le volume de la canopée des densités de feuilles et de branches), la gestion du volume du houppier de l'arbre (réduction de la dimension du volume du houppier), l'irrigation et la fertilisation des arbres.

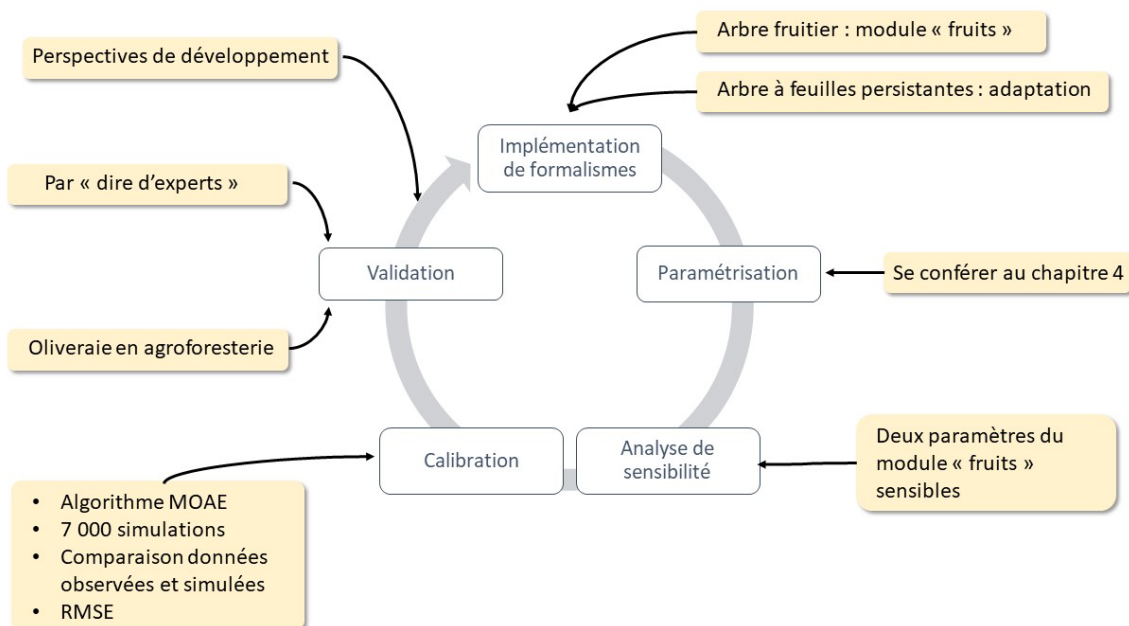
Une analyse de sensibilité des paramètres du module fruits a été effectuée pour évaluer leur influence sur la productivité des oliviers et identifier les paramètres à cibler, particulièrement pour l'étape de calibration. Cette analyse a permis d'identifier deux paramètres clés, à savoir le « fruitAllocationFraction » qui décrit la fraction de carbone allouée au compartiment des fruits, et le « fruitHeatStressTemperatureMin » qui représente le seuil minimum en dessous duquel le nombre de fruits diminue.

Par la suite, les paramètres pour lesquels aucune valeur n'a été trouvée dans la littérature ont été calibrés en utilisant une base de données française contenant des données sur la croissance et la production d'une oliveraie. Les paramètres ont été optimisés à l'aide de l'algorithme MOEA (Multi-Objective Evolutionary Algorithm). Les simulations ont été comparées aux données observées en utilisant l'erreur quadratique moyenne (RMSEp) pour 13 variables de sortie, sur la morphologie et la production des oliviers. La calibration a nécessité 7 000 simulations et a été réalisée en minimisant le RMSEp cumulé pour 13 variables de sortie. Suite à cette analyse, la meilleure combinaison de valeurs de paramètres (au

RMSEp cumulé le plus faible) est utilisée pour les vérifications et les simulations de systèmes agroforestiers à base d'oliviers.

Pour évaluer les capacités prédictives du modèle, celui-ci a été vérifié en utilisant des données provenant d'une oliveraie en agroforesterie, ainsi qu'en faisant appel à l'expertise de professionnels français et italiens. Bien que la vérification des données ait montré que le modèle surestimait le rendement, tant en agroforesterie qu'en monoculture, les résultats obtenus par les experts ont confirmé que le modèle Hi-sAFe est capable de réaliser une évaluation réaliste des performances environnementales (lessivage de l'azote, évaporation de l'eau du sol, ruissellement, etc.) et agronomiques (productions) des systèmes agroforestiers à base d'oliviers. De plus, les variables relatives à la morphologie et à la phénologie de l'olivier ont été considérées comme particulièrement fiables, mais les périodes de croissance semblent mal simulées et nécessiteront des améliorations futures. Le modèle a été calibré pour un olivier générique, mais pas pour une variété spécifique. Par conséquent, une calibration et une vérification au niveau d'une ou plusieurs variétés seront nécessaires à l'avenir, sous réserve de la disponibilité suffisante de données.

La version 4.2 du modèle Hi-sAFe permet de tester le développement et la productivité des systèmes agroforestiers à base d'arbres fruitiers grâce à de nouveaux formalismes pour représenter les arbres fruitiers et les arbres à feuilles persistantes. Le modèle a été calibré et vérifié pour l'olivier, ce qui a permis de confirmer sa capacité prédictive pour la production d'olives. La nouvelle version offre la possibilité de tester différents systèmes agroforestiers à base d'oliviers, incluant les arrangements spatiaux, les rotations de cultures et les opérations culturales. Cependant, le modèle présente également certaines limites, en particulier le fait que le nombre de zones de cultures dans la scène est limité à deux. Le modèle continue à évoluer pour réduire ces limites et alimenter des réponses à des questions scientifiques de plus en plus diversifiées et complexes. Ce modèle peut aider à identifier des systèmes diversifiés résilients et des leviers d'action efficaces pour optimiser leur gestion.



2

Figure 52 : Représentation schématique des étapes d'adaptation du modèle Hi-sAFe aux oliviers (présenté dans l'article)

2) Article à soumettre dans *Environmental Modelling and Software*

Upgrading the Hi-sAFe agroforestry model for fruit trees. Application to Olive tree

N. Barbault¹, C. Dupraz¹, I. Lecomte¹, P.E. Lauri¹, F. Famiani², A. Rosati³, P. Sartre⁴, D. Desclaux⁴, M. Delalande⁵, J. Catel⁶, M. Gosme¹

¹ ABSys, Univ Montpellier, CIHEAM-IAMM, CIRAD, INRAE, Institut Agro, Montpellier, France

² Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari e Ambientali, Università degli Studi di Perugia, Perugia, Italy

³ CREA, Centro di Ricerca Olivicoltura, Frutticoltura e Agrumicoltura, 06049 Spoleto, Italy

⁴ Experimental Unit DiaScope, INRAE, Chemin de Mezouls, Mauguio, France

⁵ AGAP Institut, Univ Montpellier, CIRAD, INRAE, Institut Agro, Montpellier, France

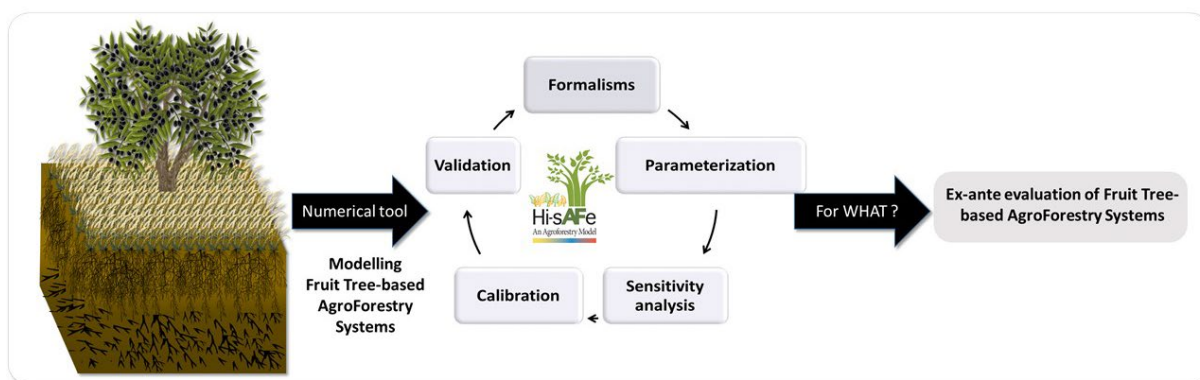
⁶ G-Eau, INRAE, Montpellier, France et ITK, Clapiers, France

nicolas.barbault@inrae.fr

Abstract

Agroforestry systems combine sustained productivity with the provision of ecosystem services to address agricultural challenges. The Hi-sAFe model was developed to understand and predict the functioning of agroforestry systems. It simulates competition between trees and crops for resources like water, nitrogen, and light, influencing their growth and yield. Originally designed for forest trees, the model has been modified to include fruit trees due to increasing farmers' interest in fruit-tree-based agroforestry systems. Modifications include adapting phenological scales, incorporating reproductive stages, adding a fruit carbon pool, and implementing calculations for fruit number, growth, and quality, and adding fruit tree specific management. The model was parameterized for olive trees using literature and field measurements. Sensitivity analysis identified influential parameters, which were calibrated using field data from a monoculture olive orchard. Validation was conducted using data from an olive orchard in agroforestry. The new version (V4.2) of Hi-sAFe allows simulation of long-term performance for agroforestry systems combining olive trees with various crops.

Graphical abstract



Keywords: agroforestry, biodiversified systems, modelling, fruit tree, olive grove

Software and/or data availability section:

The agroforestry model Hi-sAFe has been developed since 2002 as part of the Silvoarable Agroforestry for Europe (SAFE) project. This tool is freely available after registration on the following website: <https://www1.montpellier.inra.fr/wp-inra/hi-safe/>. The model is primarily implemented in JAVA. The simulations can be run on PC, Mac or Linux systems. There is an R package to help build, run, visualize and analyse simulations (www.github.com/kevinwolz/hisafer).

Introduction

Agroforestry is an agricultural practice that combines trees with crops and/or animals. Agroforestry systems contribute to increased plot biodiversity, carbon storage (Ramachandran Nair et al., 2010), total yield (Lovell et al., 2018), soil fertility (Dollinger and Jose, 2018), biological regulation (Pumariño et al., 2015) and water infiltration (Wang et al., 2017). In agroforestry systems, trees can provide various services such as microclimate regulation (e.g., to provide shade) or commercial goods (e.g., wood or fruit).

Fruit tree-based agroforestry systems (FT-AFS) are considered as "high-value tree agroforestry" (Deng et al., 2017). In these systems, fruit trees are the main cash crop and the intercrop is secondary. However, the intercrop can be economically important, in particular during the first years, before fruit trees become productive. Such agroforestry systems allow the producers to diversify the production of their farm. Intercropping becomes a source of complementary products, which can partially compensate for a bad tree fruit harvest. Global warming has impacts on flowering time (earlier and so at increased risk of late frosts) and duration, on fruit growth and quality, and on the emergence of pests. Therefore, there is a risk that years of bad production become more frequent (Abed et al., 2019; El Yaacoubi et al., 2014; Legave, 2009). Diversified cropping systems such as agroforestry systems are expected to be more resilient against these changes (Nair, 2012).

The ecosystem services and the production are closely linked to both the design (species choice, spatial and temporal organisation) and the management (plot, tree and crop) of the system (Dupraz, 1999). Experimental evaluation of performances is time-consuming due to the perennial nature of these systems, and it is impossible to test experimentally all the possible combinations of tree and crop species and management schemes. Modelling allows to rapidly evaluate the performance of a wide number of crop management options (Bergez et al., 2010), which is all the more relevant for tree-based cropping systems. Furthermore, modelling allows to test these systems in future conditions altered by climate change, by using climate projections (Luedeling et al., 2016). This is particularly important to test perennial systems that develop over several decades. Accounting for the effect of climate change

requires using mechanistic models that explicitly take into account the effect of climatic conditions. Furthermore, agroforestry models must represent tree-crop interactions, in particular competition for light, water and nutrients, which depend on the 3D structure of the system (distance and orientation of the crop relative to the trees, height difference between the crop and trees). This structure being dynamic, it is important that models run at a sufficiently fine time step to represent the interplay between the trees and the crops phenology, but also over a sufficiently long time period to cover the whole life cycle of the trees. Finally, models should account for management practices that influence tree-crop interactions, such as irrigation and fertilization of the tree and the crop, branch and root pruning of the tree, soil tillage, fruit load management of the tree, sowing and harvesting dates of the crop. Among all available agroforestry and fruit tree models, we identified only two models that possess the most desirable features: Hi-sAFe (Dupraz et al., 2019) and the model of (Mancuso et al., 2002b). The detailed comparison of models regarding their suitability to simulate FT-AFS was presented in (Barbault et al. under review).

In this paper, we present the adaptation of the Hi-sAFe model needed to simulate FT-AFS. This model was initially intended to represent silvoarable systems based on forest tree species used for wood production, and was thus not designed to model FT-AFS (the most notable shortcoming being that fruit trees were not simulated). We will first describe the modifications of the formalisms of the Hi-sAFe model to allow the representation of fruit trees, and then the parameterisation, sensitivity analysis, calibration and validation of the new model. The olive tree was chosen as a case study for this modelling effort because agroforestry systems combining olive trees with crops (cereals, vegetables, vines, flower bulbs, etc.) or livestock (sheep and chickens), despite being in decline in favour of more intensive systems (Paris et al., 2019), are traditional and still widespread, representing by far the most common fruit-tree based agroforestry system in Europe (Lauri et al., 2019; Pantera et al., 2018). The design of new olive-based agroforestry systems and the maintenance of current agroforestry systems could help to address several issues linked with intensive olive systems, such as soil erosion and loss of biodiversity. In the discussion part, we will present the different simulation possibilities offered by the new version of the model, the limits of the model and perspectives for its improvement.

Materials & methods

1) Hi-sAFe model description

The Hi-sAFe model (Dupraz et al., 2019) is a mechanistic model running with daily time steps. To operate, the model requires the following input data: i) daily weather, ii) soil description, iii) crop(s) identification and zoning, iv) tree(s) identification and position, v) crop(s) technical itinerary, vi) tree(s) technical itinerary (Fig.1). The Hi-sAFe model is based on two main assumptions: i) the productivity of an agroforestry system depends on the acquisition of heterogeneous resources by trees and crops in the environment, ii) the interaction between trees and crops is affected by the plasticity and opportunism of the plants, both above and below-ground, and in their phenology. The Hi-sAFe agroforestry model is designed to include competition for light, water and nitrogen between trees and crops. Moreover, this model simulates the above-ground and below-ground plasticity of the tree architecture, according to the resource availability. Simulations are performed over the entire system's life: from tree planting to tree harvest, at a daily time step. Hi-sAFe integrates most tree management options, such as root pruning, canopy reduction, fertilisation and irrigation.

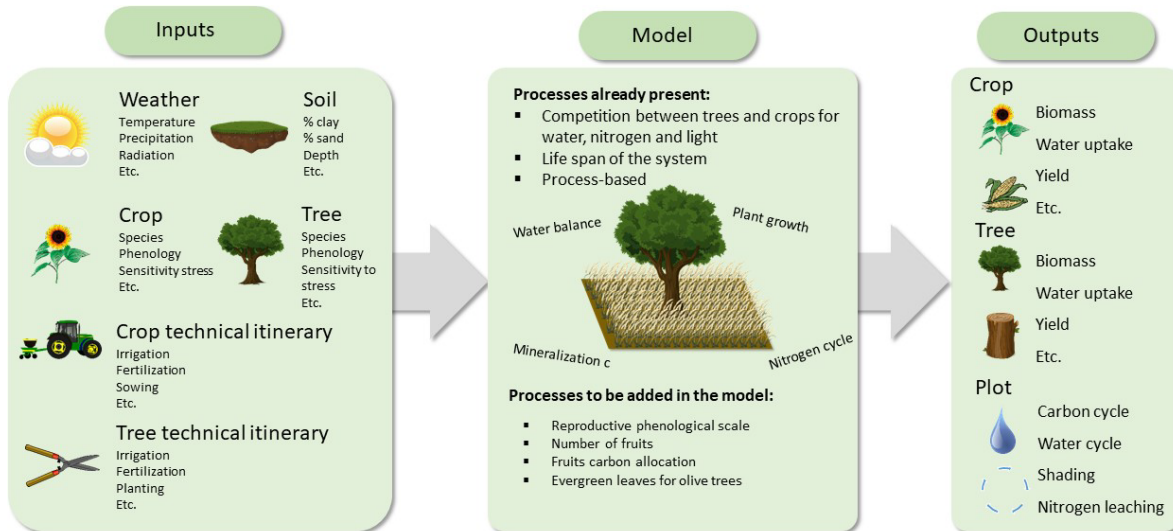


Figure 1: Main inputs, formalisms and outputs of the Hi-sAFe agroforestry model

The Hi-sAFe model couples the STICS crop and soil model (Brisson et al., 2009) with the sAFe-tree model. Modules allow to integrate the interactions between trees and crops for light, water and nitrogen. This model simulates a rectangular scene, which can be replicated in all directions infinitely. This scene can contain one or more trees and is divided in cells. Each cell can contain a different crop. The soil is divided in layers, and layers in voxels (volume elements). The trees are represented by simple geometrical shapes for the above-ground part (a cone for the trunk, an ellipsoid for the canopy), and by a network of coarse roots joining adjacent voxels, and supporting a density of fine roots in each voxel. This model was previously parameterized only for some tree species usually grown for wood, namely hybrid walnut, poplar and wild cherry. Thus, the model did not represent fruit tree production, and only considered the phenology of deciduous trees, two limitations that had to be overcome to simulate olive-based agroforestry systems.

2) Model adaptation to simulate fruit trees and evergreen trees

Introducing leaf cohorts

In evergreen trees, new leaves are produced before the fall of old leaves, allowing the foliage to remain present all around the year. In the model, we made this possible by considering several coexisting cohorts of leaves. Each cohort is produced at a given time and ages independently of the other cohorts. In the case of olive tree, there can be up to three cohorts simultaneously, as leaves are produced in the spring and can live up to three years. All leaf age-dependent processes (aging, senescence, age-dependent photosynthetic activity, sensitivity to water and nitrogen stresses) are now applied to each cohort separately, but with the same equations as in (Dupraz et al., 2019). The carbon and nitrogen pools of the foliage, and the photosynthesis, are now the sums of all cohorts (

Equation 1).

Equation 1

$$X = \sum_{i=1}^n X_i$$

Where X is an already existing variable in Hi-sAFe among carbonFoliage, carbonFoliageSen, nitrogenFoliage, nitrogenFoliageSen, and carbonIncrement; X_i is the same variable specifically for leaf

cohort i ; n is the total number of coexisting cohorts. Hi-sAFe being a daily model, all variables are dependent on day.

Taking into account winter photosynthesis

In the previous version of the model, photosynthesis was restricted by water, nitrogen and thermal stresses. The LUE (Light Use Efficiency) of leaves decreased with their age. This new version also adds a dependence of LUE to temperature, an important feature for evergreen trees that continue photosynthesizing during winter, albeit at a rate lower than in summer (Equation 2).

Equation 2

$$\begin{aligned} \text{CarbonIncrement}_i &= \text{Light Intercepted} \times \left(\frac{\text{leafArea}_{i,t}}{\sum_{i=1}^n \text{leafArea}_{i,t}} \right) \times \text{lueAgeEffect}_i \times \text{lueWaterStress} \\ &\times \text{lueNitrogenStress} \times \text{lueTemperatureStress}(\text{meanTemperature}) \end{aligned}$$

Where $\text{CarbonIncrement}_{i,t}$ is the carbon assimilated by leaf cohort i ; $\text{LightIntercepted}_t$ is the light intercepted by the canopy of the tree according to the geometry of the canopy, its leaf density and incident light; leafArea_i is the leaf area of the cohort i ; lueAgeEffect_i is the age-dependence of LUE, according to the age of cohort i ; lueWaterStress and lueNitrogenStress are the effects of water and nitrogen stress on LUE (not changed from previous version); and $\text{lueTemperatureStress}(T)$ is the temperature effect on LUE computed according to Equation 3. All variables are dependent on day.

Equation 3

$$\text{lueTemperatureStress}(T) = \begin{cases} 0 & \text{if } T < \text{photosynthesis}T_1 \mid T > \text{photosynthesis}T_4 \\ 1 & \text{if } \text{photosynthesis}T_2 \leq T \leq \text{photosynthesis}T_3 \\ \frac{(T - \text{photosynthesis}T_1)}{(\text{photosynthesis}T_2 - \text{photosynthesis}T_1)} & \text{if } \text{photosynthesis}T_1 \leq T \leq \text{photosynthesis}T_2 \\ 1 - \frac{(T - \text{photosynthesis}T_3)}{(\text{photosynthesis}T_4 - \text{photosynthesis}T_3)} & \text{if } \text{photosynthesis}T_3 \leq T \leq \text{photosynthesis}T_4 \end{cases}$$

Where T is the mean temperature of the day; $\text{photosynthesis}T_1$ to $\text{photosynthesis}T_4$ are the cardinal temperatures for photosynthesis.

Adapting the vegetative phenological scale and adding a reproductive phenological scale

The vegetative phenological scale had to be adapted for evergreen trees, so that the life duration of leaves was consistent with field data. Moreover, a phenological scale specific to fruits was incorporated (Equation 4 and Equation 5) and includes different stages: i) budburst, ii) flowering, iii) fruit set, iv) fruit growth, v) fruit maturity. Both phenological scales are independent, so that flowers can appear before (as for almond trees) or after (as for olive trees) leafing.

Equation 4

$$\begin{aligned} \text{heatAccumulatedTemperature}_{t+1} &= \text{heatAccumulatedTemperature}_t \\ &+ \max(0, \text{meanTemperature}_t - \text{TempThreshold}_s) \end{aligned}$$

Where $\text{heatAccumulatedTemperature}_{t+1}$ is the sum of growing degree days on day $t+1$; meanTemperature_t is the daily mean temperature; and TempThreshold_s is the base temperature of stage s .

Equation 5

$$\text{fruitPhenologicalStage}_{t+1} = \begin{cases} \text{fruitPhenologicalStage}_t + 1 & \text{if } \text{heatAccumulatedTemperature} > \text{StageTempThreshold}_s \\ \text{fruitPhenologicalStage}_t & \text{otherwise} \end{cases}$$

Where $\text{fruitPhenologicalStage}_{t+1}$ is the phenological stage of the tree on the reproductive phenological scale (budburst, flowering, fruit set, fruit growth and fruit maturation) on day $t+1$; $\text{fruitPhenologicalStage}+1$ is the next phenological stage; $\text{StageTempThreshold}_s$ is the degreedays threshold to the end of stage.

Adding a fruit module

To represent fruit tree production, a "fruit" module has been developed and simulates the number of fruits, the fruit carbon allocation and the impact of various abiotic stresses on fruit production (Figure 2). This module allows estimating both the fruit and oil yields. This module is initialized each year at flowering onset, when the initial number of flowers is calculated according to the leaf area of the previous year and to a carbon stress index (Equation 6). This allows mimicking the alternate bearing often observed in fruit trees, when a high-yield year is followed by a low-yield year. At flowering time, this initial number of flowers is limited by thermal stresses. Carbon is then allocated to the flower and the fruit compartments according to: i) daily carbon available for flowers and fruits (based on the $\text{fruitAllocationFraction}$ parameter), ii) maximum daily fruit growth (based on the $\text{fruitMaxDryMatterAllocation}$ parameter).

Equation 6

$$\text{FlowerNumber}_{t_o,y} = \max_{t \in y-1} (\text{leafArea}_t) \times \text{CarbonStressIndex}_{t_o,y}$$

Where $\text{FlowerNumber}_{t_o,y}$ is the initial number of flowers (at time of flowering in year y); leafArea_t is the leaf area (sum of all cohorts) and CarbonStressIndex is computed at time of flowering in year y according to Equation 7.

Equation 7

$$\text{CarbonStressIndex} = \frac{\text{CarbonLabile}}{\text{CarbonStem} + \text{CarbonBranches} + \text{CarbonStump} + \text{CarbonCoarseRoots}}$$

Where the variables are the different carbon pools of the tree; all variables are taken at the time of flowering.

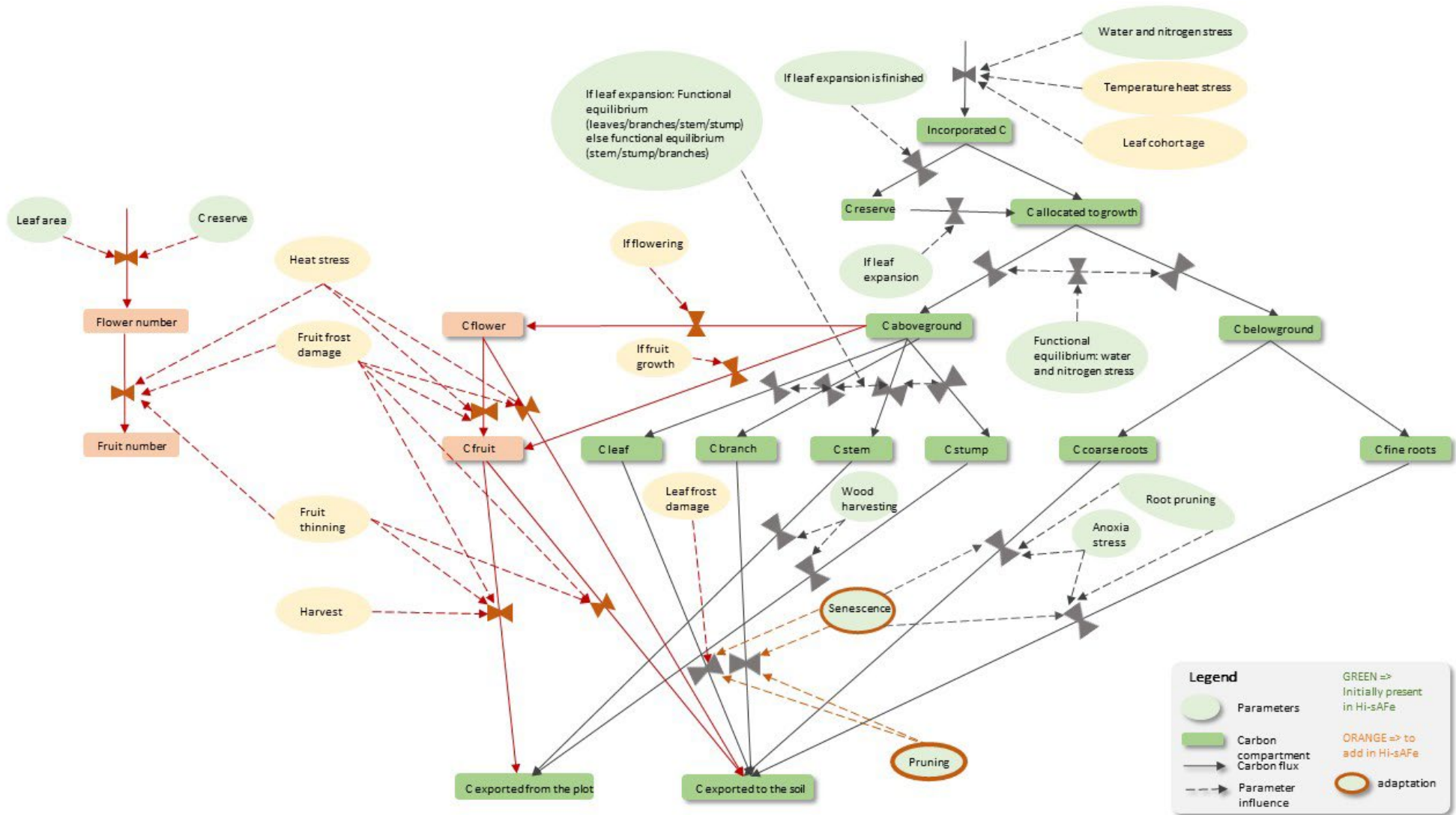


Figure 2: Conceptual scheme of the integration of the fruit module into the Hi-sAFe model.

Adding cultural operations specific to fruit trees

To represent the effects of the farmer’s practices on fruit trees, different cultural operations have been added: i) leaf area density reduction (refers to pruning), ii) lateral trimming of canopy (along the tree line and perpendicularly to the tree line)(refers to pruning) iii) top trimming of canopy (refers to pruning), iv) fruit load management (refers to fruit thinning), v) harvesting, vi) tree irrigation, vii) tree fertilisation. The first three operations are different sorts of pruning. All operations are applied –or not– on the days/years indicated in the parameter. If on that day, the given threshold is not yet reached, no operation is done, otherwise the operation is performed.

Leaf area density reduction corresponds to the reduction of branch density inside the crown. Four settings control this cultural operation (Table I).

Table I: Settings used for reducing the leaf area density.

Parameters	Unit	Description
leafAreaDensityReductionYears	Years	Year when pruning is applied
leafAreaDensityReductionDay	Day	Day when pruning is applied
leafAreaDensityReductionThreshold	Ratio	Threshold to trigger leaf area reduction
leafAreaDensityReductionObjective	Ratio	Fraction of leaf area reduction

Lateral trimming of canopy allows reducing the radius of the canopy along the tree line and/or in the direction of the inter row. Six settings control these cultural operations (Table II).

Table II: Settings used for lateral trimming the tree crown

Parameters	Unit	Description
canopyTrimmingYears	Years	Year when canopy trimming is applied
canopyTrimmingDays	Day	Day when canopy trimming is applied
canopyTrimmingTreeLineTrigger	m	Crown radius trigger for canopy trimming on treeline
canopyTrimmingTreeLineReductionTarget	m	Crown radius target after canopy trimming on treeline
canopyTrimmingInterRowTrigger	m	Crown radius trigger for canopy trimming on interrow
canopyTrimmingInterRowReductionTarget	m	Crown radius target after canopy trimming on interrow

Tree topping entails reducing the height of the crown. Three settings control this cultural operation (Table III).

Table III: Settings used for trimming the tree crown

Parameters	Unit	Description
treeToppingYears	Years	Year when pruning is applied
treeToppingDays	Day	Day when pruning is applied
treeToppingHeight	m	Tree height after topping

Fruit load management consists of removing fruits in order to regulate the number of fruits per tree and reduce alternate bearing. It is controlled by four settings (Tab.IV). The user must choose between three

options: i) no thinning, ii) automatic calculation of thinning according to optimal fruit load, iii) manual (specify dates).

Table IV: Settings used for the fruit thinning practice

Parameters	Unit	Description
fruitThinningYears	years	Year when thinning is applied
fruitThinningMethod	(0=none, 1=auto, 2=manual)	Method to compute thinning according to optimal fruit load
fruitThinningDays	Days	Days when thinning is applied
fruitOptimalLoadLeafArea	fruits	Enforced number of fruits per m ² of leaf area

The harvest date is also entered by the user, using the "fruitHarvestDays" setting.

Tree irrigation is available in this version of the model and eight settings have been added (Tab. V). The user must choose between an automatic irrigation (irrigation is applied whenever the water stress index of the tree reaches a threshold) and a non-automatic irrigation (irrigation date to be specified). The user must then choose between two irrigation methods (drip or aspersion), which impact the cells where the water is applied (only in the cell where the tree is located in the case of drip irrigation, or within a circle centered around the tree trunk for aspersion).

Table V: Settings used for piloting the tree irrigation

Parameters	Unit	Description
treeIrrigationType	0=none, 1=automatic, 2= manual	Irrigation type 0=none, 1=automatic, 2= manual
treeIrrigationYears	Years	Years when irrigation is applied
treeIrrigationMethod	1= drip, 2=aspersion	Method of irrigation
treeIrrigationRadius	M	If aspersion method, radius distance of irrigation to the tree trunk
treeIrrigationWaterStressTrigger	Ratio	If automatic type, tree water stress that triggers irrigation
treeIrrigationAutomaticDose	mm	Water dose applied for the automatic irrigation type
treeIrrigationDays	Days	Day when irrigation is applied
treeIrrigationDose	mm	Vector of doses applied for the manual irrigation type

Tree fertilisation is also available in this version of the model and requires nine settings (Tab. VI). Similarly as for tree irrigation, the user must choose between automatic (based on nitrogen stress) and manual (dates to be supplied) fertilization date computation. Several types of fertilizers can be applied, with consequences on their risk of volatilization (based on STICS formalisms and parameters).

Table VI: Settings required for piloting the tree fertilisation

Parameters	Unit	Description
------------	------	-------------

treeFertilizationType	0= none 1=auto 2=manual	Fertilisation type: 0= none 1=automatic 2=manual
treeFertilizationYears		Years when fertilisation is applied
treeFertilizationRadius	m	Radius distance of fertilisation to the tree truck
treeFertilizationNitrogenStressTrigger	Ratio	If automatic type, tree nitrogen stress to triggered for applied fertilisation
treeFertilizationAutomaticDose	Kg N ha-1	Vector of doses applied for the automatic fertilisation type
treeFertilizerAutomaticCode	1= ammonium sulphate, 2=ammonium nitrate, 3= ammonium nitrate + calcium, 4= anhydrous ammonia, 5=urea, 6=di-ammonium phosphate, 7=solution, 8=other	Different types of fertilisers for automatic fertilisation type
treeFertilizationDays	Days	Day when fertilisation is applied
treeFertilizationDose	Kg N ha-1	Vector of doses applied for the manual fertilisation type
treeFertilizerCode	1= ammonium sulphate, 2=ammonium nitrate, 3= ammonium nitrate + calcium, 4= anhydrous ammonia, 5=urea, 6=di-ammonium phosphate, 7=solution, 8=other	Different types of fertilisers for manual fertilisation type

3) Parameterization for olive trees

The parameterization of the model for olive trees was done in three ways, depending on the parameters: from literature, with direct measurements in the field and by model calibration. Parameters with a clear and shared meaning among scientists were obtained from the literature. Parameters with a clear biological meaning but that are not reported in the literature were measured in the field when possible, in abandoned orchards for the measurement of unpruned trees and in an experimental olive orchard situated at Experimental unit DiaScope INRAE Mauguio (43.610402, 3.979698) for production-related parameters (Barbault et al., 2023). Finally, parameters without a simple biological meaning (or which would be too difficult to measure in the field), and which were important in model output according to a sensitivity analysis, were obtained by calibration of the model from field data obtained in previous projects, using a multi-objective evolutionary algorithm (MOEA ; Kevin Wolz, personal communication).

4) Sensitivity analysis

To identify the most influential parameters on the outputs, a sensitivity analysis was performed on the "fruit" module parameters (Tab.VII). Due to the high number of model evaluations required and the model architecture, the Morris method was chosen. This method ranks the parameters according to the

elementary effects mean (μ) and the standard deviation (σ), representing the interaction effects. We used the "sensitivity" package (Iooss et al., 2020) of R statistical language. This package offers the function "morrisMultOut" to study the parameters sensitivity as a function of several output variables (Iooss et al., 2021).

Table VII: Parameters of the fruit module of the Hi-sAFe model that were included in the sensitivity analysis, with their range of variation.

Parameters	Unit	Lower limit	Higher limit
fruitHeatStressTemperatureMin	°C	25	39
fruitFrostStressTemperatureMin	°C	-3	3
fruitAllocationFraction	ratio	0.05	0.9
fruitMaxDryMatterAllocation	g C day	0.01	0.001
fruitLeafArea	number of fruits per m ² of leaf area	200	2000
fruitingTotalStressThreshold	ratio	0.01	0.09

This sensitivity analysis was carried out according to different output variables (Tab.VIII): including both non-cumulative (value for a specific day: September 29, 1995) and cumulative variables (values for a specific day, September 29th, from the years 1994 to 1997). The analysis was performed on 504 simulations. These simulations were carried out over four years starting with a 15-year-old olive tree. The soil and climate conditions of the plot of the Domaine de Restinclières were used (1994 to 1997). The simulated scene was composed of an olive tree, with bare soil, and no intercrop.

Table VIII: Cumulative and non-cumulative output variables included in the sensitivity analysis

Non-cumulative output variables	Cumulative output variables
fruitNbrDaily	fruitNbrDaily
carbonFruit	fruitDryMatterWeight
totalLeafArea	

5) Calibration

A calibration of the model was performed for the parameters with high elementary effect and/or interaction effects according to the sensitivity analysis of the fruit module or the general sensitivity analysis of the model (Wolz, unpublished). These parameters (Tab.IX) were calibrated to make the model outputs fit as much as possible with observed data from an olive grove in Mauguio, France (43°35'N, 3°45'E). Planted in 2002, this field is composed of olive trees of the Picholine variety, planted with a plantation distance of 6 × 6 m. Soil description was provided by the research unit managing the orchard. The meteorological data came from the airport of Mauguio, located less than 5 km away. Missing data were replaced by weather data from the INRAE weather station in Mauguio close to the experiment. The plot had not been irrigated nor fertilized and had been pruned only since 2012. For calibration, we used data from olive trees that were cultivated with permanent grassing, mowed by several times per year. The following data were collected on this plot over the years and were used for calibration: i) morphology of the olive trees (height, trunk diameter, size of the crown on the row and size of the crown on the inter-row: data available on 17 olive trees for the year 2005, 2007 and 2017), ii) production of the olive tree (fresh weight of olives per tree, average weight of an olive, number of olives ; data available on 17 olive trees for the years 2004 to 2007 and from 2014 to 2017).

The MOEA analysis allowed us to select optimal values for these parameters. The sum of the root mean square errors (RMSE) between the measured vs. modelled for the selected variables was used as objective functions to minimize. Due to the availability of data and the relative independence of the tree growth and fruit modules, we decided to work in two successive steps for the calibration, working first on the first set of output variables on fruit tree morphology (tree height, trunk DBH (Diameter at Breast Height), length of the crown radius on the row, length of the crown radius on the inter row), and then on the second set of output variables related to fruit tree production (fresh weight of olives per tree, average weight of an olive, number of olives).

Table IX: list of parameters included in the tree calibration.

param.name	Explanation	Unit	Minimum	Maximum	Variation
leafMassArea	Leaf dry mass per unit of leaf area	kg m ⁻²	2.00E-01	3.00E-01	1.00E-02
branchVolumeRatio	Ratio of branch volume to crown volume	cm ³ cm ⁻³	7.00E-05	7.00E-03	1.00E-05
leafLueMax	Maximum potential light use efficiency	gr C MJ ⁻¹	5.00E-01	2.00E+00	2.00E-02
colonisationFraction	The proportion of carbon allocated to fine roots in a voxel that is used for colonizing neighbour empty voxels	ratio	1.00E-01	8.00E-01	1.00E-02
colonisationThreshold	Threshold for root colonisation : colonization occurs only if the fine root density is higher than this threshold	m of root m ⁻³ voxel	5.00E+02	2.50E+03	3.00E+01
specificRootLength	Fine root length per unit dry mass	m g ⁻¹ of dry matter	5.00E+00	1.50E+01	1.00E-01
transpirationCoefficient	Scaling factor for transpiration.	ratio	8.00E-01	1.20E+00	1.00E-02
treeMaxTranspirationPotential	Maximum tree transpiration potential (water column height)	cm	-4.00E+04	-2.00E+04	5.00E+02
treeRootDiameter	Fine root diameter	cm	2.00E-02	1.00E-01	1.00E-03
fruitAllocationFraction	Fraction of carbon allocation to fruit carbon compartment	ratio	3.50E-01	5.50E-01	1.00E-02
fruitLeafArea	Maximal fruit number per m ² of leaf area	Number of fruits	9.00E+02	1.90E+03	2.50E+01
fruitingConfortThreshold	Carbon stress index threshold above it the number of fruits is not reduced	ratio	1.00E-01	5.00E+00	1.00E-01
fruitingTotalStressThreshold	Carbon stress index threshold below it the number of fruits is totally reduced	ratio	1.00E-17	1.00E-14	9.00E-17

6) Validation for olive trees

To verify the Hi-sAFe model, two approaches were used: i) verification with different data of an olive grove in agroforestry, and ii) verification by expert opinion.

The Hi-sAFe model was validated on the same orchard in Mauguio, but with data from a subplot where olive trees were grown in agroforestry with pea and wheat crops in 2015 and 2016 (Panozzo et al., 2020). The simulated and observed data of this plot were compared, using statistical indicators such as rRMSE, to check the model's ability to represent agroforestry conditions.

The Hi-sAFe model was also verified by expert evaluation during two sessions presenting the model and simulation results to researchers working on olive trees. The first session comprised two Italian olive experts, while the second session consisted of three French researchers with experience in the study of olive trees. Several output variables were verified, including phenology (in particular flowering date), growth, root development, yield dynamics.

Results

1) Model implementation and distribution

The new version of Hi-sAFe adapted to fruit trees (V4.2), is available free of charge after registration on the following link: <https://www1.montpellier.inra.fr/wp-inra/hi-safe/en/demande-login/>. The simulations can be run on PC, Mac or Linux systems. There is an R package to help build, run, visualize and analyse simulations (www.github.com/kevinwolz/hisafer), and it has been adapted to this new version of the model, and new functionalities have been added to analyse the results of simulations of agroforestry systems based on fruit trees.

2) Parameterization for olive trees

Table X presents the 27 new parameters that have been added into the model, the associated values to simulate an olive tree and the source for the value.

Table X: list of the "fruit" module parameters for olive fruit production in the Hi-sAFe model

Parameter name	Explanation	Unit	Value	Literature source
fruitFirstYear	Year of fruiting	year	7	(Stillitano et al., 2010)
floweringTempAccumulationDateStart	Date of temperature accumulation	Day	1	(Mancuso et al., 2002b)
floweringTempThreshold	Threshold temperature accumulation	°C	10	(Mancuso et al., 2002b)
floweringTriggerTemp	Number of degree days to start flowering	degree-days	302	(Mancuso et al., 2002b)
fruitSettingTriggerTemp	Number of degree days to start fruit set	degree-days	380	(Mancuso et al., 2002b)
fruitGrowthTriggerTemp	Number of degree days to start fruit growth	degree-days	546	(Mancuso et al., 2002b)
fruitVeraisonTriggerTemp	Number of degree days to start veraison/maturation	degree-days	1492	(Mancuso et al., 2002b)

fruitHeatStressTemperatureMin	Heat stress during flowering (can impact only the flowers initiated during the day), minimum temperature below which no flowers are affected	°C	35	(Koubouris et al., 2009; López-Bernal et al., 2018)
fruitHeatStressTemperatureMax	Heat stress during flowering (can impact only the flowers initiated during the day) maximum temperature above which all flowers fall	°C	45	(Koubouris et al., 2009; López-Bernal et al., 2018)
fruitFrostStressTemperatureMin	Temperature minimum for frost impact on fruit number	°C	-3	(Rodrigues et al., 2022)
fruitFrostStressTemperatureMax	Temperature maximal for frost impact on fruit number	°C	-0.5	(Rodrigues et al., 2022)
fruitAllocationFraction	Fraction of carbon allocation to fruit compartment	ratio	0.38	(Moriondo et al., 2019; Paoletti et al., 2021; Villalobos et al., 2006) and calibration
fruitCarbonStressDayStart	Days of calculation of stress carbon index	day	92	Calibration
fruitMaxDryMatterAllocation	Carbon allocation maximum to 1 fruit each days	g C day	7.3×10^{-3}	(Barbault et al., 2023)
fruitDryToFreshMatterWeight	Coefficient to convert from dry matter to fresh matter	-	1.72	(Trentacoste et al., 2010a)
fruitDryMatterDensity	Density of dry matter fruit	m ³ /t de MS	0.8	Experiment
fruitOilConversionCoeffA	Coefficient a to convert Fresh matter to oil	-	18.20	(Trentacoste et al., 2010a)
fruitOilConversionCoeffB	Coefficient b to convert Fresh matter to oil	-	0.78	(Trentacoste et al., 2010a)
fruitOilConversionCoeffC	Coefficient c to convert Fresh matter to oil	-	1.31	(Trentacoste et al., 2010a)
fruitOilDensity	Fruit oil density	-	0.92	
fruitLeafArea	Maximal fruit number per m ² leaf area	Number of fruits	1400	(Barbault et al., 2023)
fruitOptimalLoadLeafArea	Optimal fruit number per m ² leaf area	Number of fruits	1000	Calibration
fruitThinningDelayAfterSetting	Number of day between setting and thinning	Number of day	10	Calibration
fruitingConfortThreshold	Ratio above which there is no carbon stress	-	2	Calibration
fruitingTotalStressThreshold	Ratio above which there is maximal carbon stress	-	1.0×10^{-15}	Calibration
fruitLueMax	Maximum potential light use efficiency for fruits	g C MJ ⁻¹	0.65	Calibration
fruitAgeForLueMax	Age of the fruits to reach a luemax	days	120	Calibration

Other parameters describing the olive trees were also set using literature and/or measurements (available in Appendix A).

3) Sensitivity analysis of the fruit module

The parameters that appear to have the most influence on the defined output variables are **fruitAllocationFraction** and **fruitHeatStressTemperatureMin** (Fig.3). The parameter **fruitAllocationFraction** defines the percentage of carbon allocated to the fruit carbon compartments. The

parameter `fruitHeatStressTemperatureMin` is the min temperature above which the heat during flowering has no impact on the number of flowers. Below a certain threshold, the flowers fall. This parameter is parameterized from papers by (Koubouris et al., 2009; López-Bernal et al., 2018).

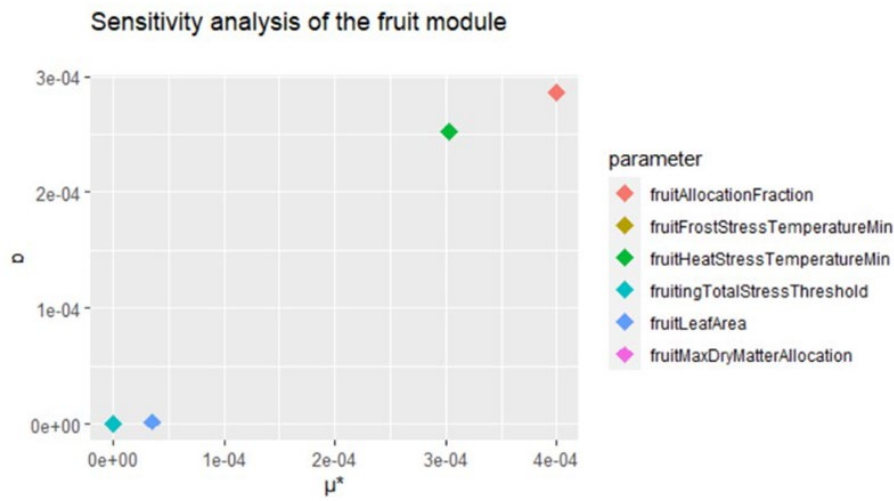


Figure 3: Results of sensitivity analysis for olive tree. μ^* and σ are, respectively, the mean and the standard deviation of Scaled Elementary Effect (SEE). Not all points are visible, as some are superposed: parameters `fruitFrostStressTemperatureMin` and `fruitMaxDryMatterAllocation` are superposed with `fruitingTotalStressThreshold`.

4) Calibration of the Hi-sAFe model for olive trees

The calibration required 7000 simulations. For some parameters, the calibrated value is well defined (Fig.4A), but for other parameters, there is no clear “best value” due to possible compensations between some parameters (Fig.4B). However, we found one set of parameters that appeared both coherent and with a low RMSE. The corresponding values are given in Appendice A.

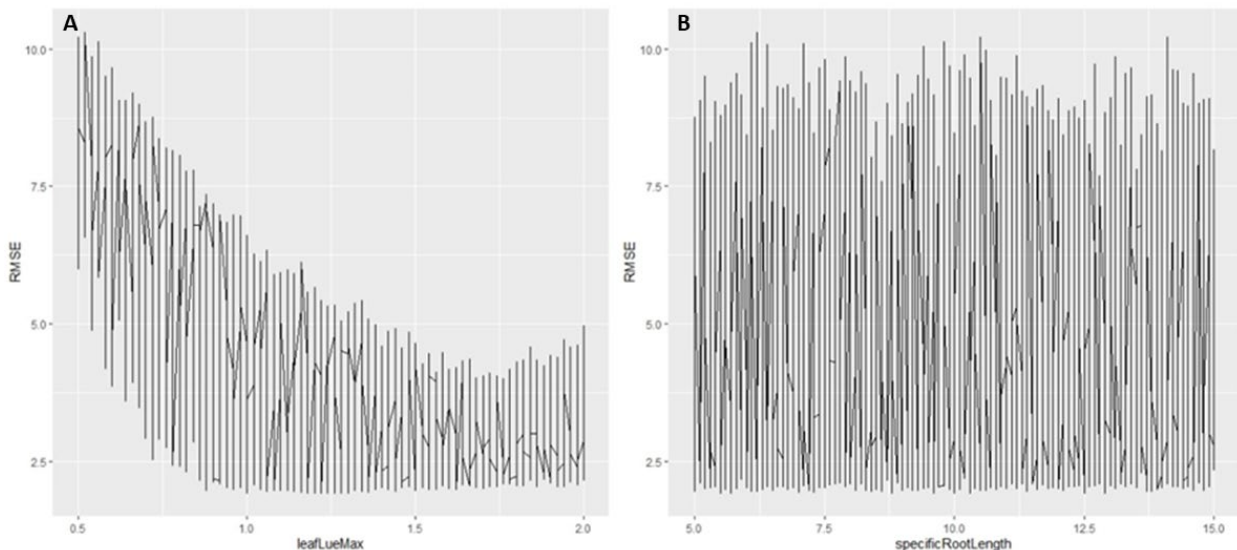


Figure 4: Distribution of RMSE across 7000 simulations for parameter values within a predefined range. A) Distribution of RMSE for `LeafLueMax` values. B) Distribution of RMSE for `specificRootLength` values

The goodness of fit of the calibrated model was different according to the set of output data used for comparison: for olive tree morphology, (height, dbh, crownRadiusInterRow, crownRadiusTreeLine) the simulations fitted the observations quite well. In comparison with the observed data, height, dbh, row width and inter-row width varied by 2.6, 14.2, 7.01 and 6.7% respectively.

Results were less satisfactory for the fruit yield of olive trees: for the total olive fresh matter weight, the mean fresh matter weight of an olive and the number of fruits varied from the observed data by 12.3, 2.6 and 15.3% respectively.

The model overestimated the total yield in kg of olive per tree and the number of fruits per tree compared to the observed data. On the opposite, the average fresh weight of an olive is well adjusted to the observed data of the pure olive grove of Mauguio (Fig.5).

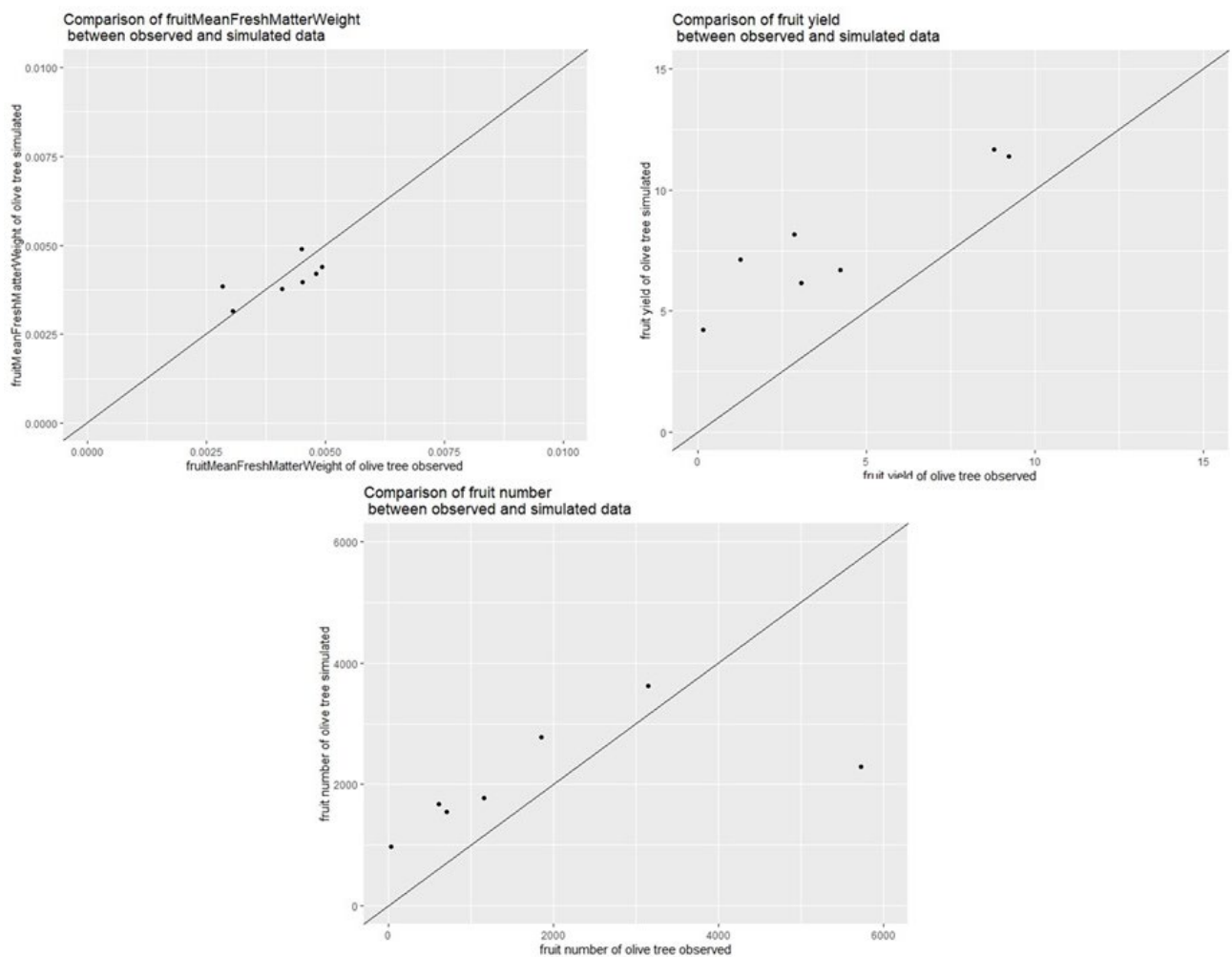


Figure 5: Comparison between observed and simulated data for olive yield per tree, number of fruits per tree and average fresh weight of an olive.

5) Validation of Hi-sAFe model for olive trees

a) Validation of the model on Mauguio agroforestry data

Comparing the simulation of an agroforestry system (olive trees + a pea-wheat rotation) with the data from the agroforestry subplot in Mauguio showed a good prediction of yield change in agroforestry compared to pure orchard (the ratio of yield in agroforestry to yield in pure orchard was observed at 0.82 and simulated as 0.86), despite an overestimation of yield in the simulated data (table XI). The

rRMSE for the output variables on yield were 21.6% for fruitTotalFreshMatterWeight, 19.5% for fruitNbr, and 3.8% for fruitMeanFreshMatterWeight.

Table XI: Comparison of the yield (T ha⁻¹) in 2016 between a traditional pure olive grove and an agroforestry olive grove.

	olive grove in monoculture	olive grove in agroforestry	Ratio
observed data	1.0	0.8	0.82
simulated data	1.687	1.47	0.86

b) Verification of the model through expert evaluations

During two sessions of presenting the simulation formalisms and results, experts in olive farming thoroughly discussed the outcomes. A wide range of variables were reviewed, including dynamics and size/levels of olive tree growth, root system development, nitrogen and water stresses, phenology (including flowering dates), yield dynamics, etc.

Experts from both Italy and France found the simulations to be generally consistent with their expectations. Some variables, such as olive morphology and phenology (particularly flowering dates), were found to be particularly robust. However, the reliability of some variables still needs improvement, such as polycyclisms (possibility of having multiple stem elongation and leaf cycles per year): the experts thought that bud break occurs too early in some years. Variety-specific parameters have been identified in the model, which will need to be further calibrated and verified for specific varieties.

Discussion

The upgraded Hi-sAFe model proved to be able to simulate the development and yield of olive trees. Thus, the model now offers the possibility to test and evaluate traditional orchards, agroforestry orchards (based on cereals, vegetables and permanent grassing) but also market garden orchards (based on vegetables only).

The fact that the model overestimated olive yields compared to observed data could be due to the fact that some yield reducing factors such as the presence of pests and diseases are not represented in the model. The limited availability of good quality data (i.e. data of output variables measured over several consecutive years, alongside with data providing a good description of the pedoclimatic conditions as well as cultural operations) prevented us from doing a thorough verification of the model. In particular, the lack of long-term data with many consecutive years showing a significant irregularity in production, would be necessary to verify the yield dynamics. Further verification of the model should be performed when datasets become available, preferably from a range of different soil and climate conditions and system designs. However, some variables were verified by expert opinion, such as root depth, root expansion and phenology (flowering date, etc.) and were deemed acceptable. On the opposite, other processes were judged less well represented (such as the shoot and leaf polycyclism present in the olive tree especially when it is young). Some formalisms (polycyclism) were added to improve the precision of variables judged (by the experts) to be less close to reality (for the next version).

In this work, the olive tree was parameterized as a species, and the parameter values might not be representative of any specific variety, since the data from literature came from different varieties and the field data came from other varieties yet. Furthermore, the current model is calibrated and verified

for the generic olive species, but not for a specific variety. This issue was discussed at length during the model evaluation workshop, as significant differences in morphology and production dynamics exist between varieties, leading to errors in simulations. In the future, calibration and verification at the variety level will be necessary, provided that sufficient data is available. The model goodness of fit might have been better if all parameters were measured from the same variety as the one used for verification. Furthermore, it might be interesting to be able to compare varieties in a modelling experiment, to find the most suitable variety for use in agroforestry systems. Even without values for actual varieties, the model could be used to identify ideotypes of varieties that would be promising for use in agroforestry, as has been done to identify ideotypes of suitable crops in agroforestry (Paleari et al., 2020; Ravasi et al., 2020). It should be possible to focus only on parameters that are known to present a large varietal variability such as cardinal temperatures, duration of phenological stages, or fruit maximum weight (although the latter is not a parameter in the model).

Future uses of the model could allow : i) to test and evaluate different spatial and temporal distributions of agroforestry systems, ii) to test and evaluate these systems under current but also future climate (using IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) climate projections), iii) to test and evaluate distinct technical itineraries on the various crops whether annuals or fruit trees, iv) to test and evaluate cropping systems under various soil and climatic conditions (Fig.6).

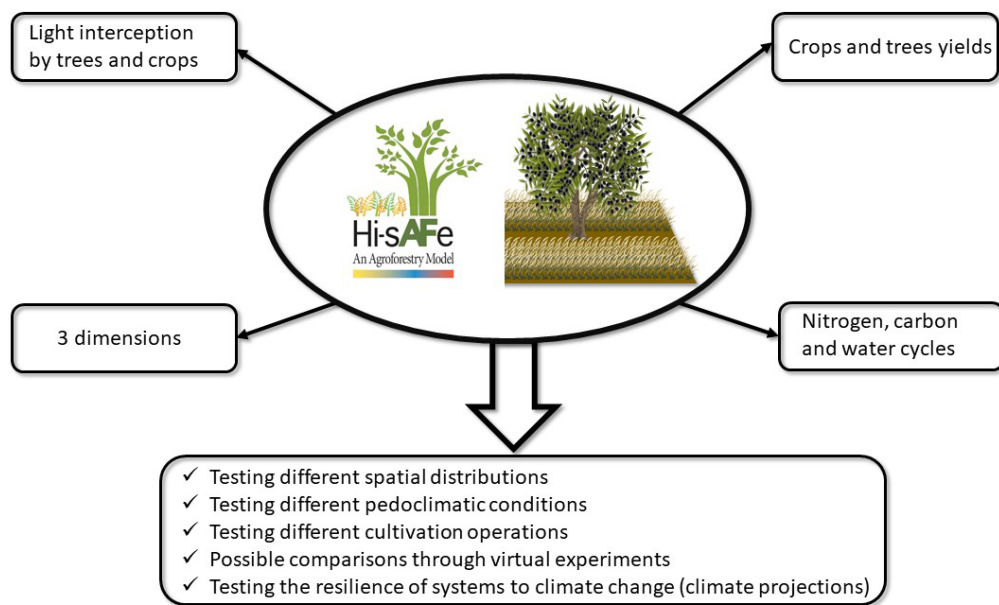


Figure 6: The range of applications of the upgraded Hi-sAFe model for Fruit-Tree based AF systems.

One of the limitations of Hi-sAFe that remains is the shape of the tree crown (currently an ellipsoid). This is not very well adapted to fruit trees, where pruning aims at creating holes in the canopy to allow light to penetrate evenly in the canopy. New shapes, such as cones or cubes or even vases, could be implemented, but this would entail important modifications in the light interception module and the adaptation of allometric formulas driving the current tree morphology.

Currently, the tree-tree and tree-crop interactions also have limitations. For example, the lateral growth of the canopy stops when the projection of the canopies touch, irrespective of the fact that canopies

could actually overlap but not touch thanks to different heights. This is a problem for simulating multi-strata agroforestry systems, where the canopy of tall trees overhang above the canopies of smaller trees. For tree-crop interaction, the model is currently able to represent only two zones for crops: i) inter-row, ii) tree row. Therefore, it is not possible to simulate alternating different crops in alternating inter-rows, as is done by some agroforestry olive growers, with one inter-row used for food production and the other interrow being used to store pruned branches. To overcome this limitation, modifications to the code structures and input files could allow each cell to be allocated to a specific crop. In addition, intercrops must be in monocrops and not mixed crops. This limitation could be addressed by integrating into the Hi-sAFe model the latest version of STICS (Justes et al., 2021). This would be particularly useful for simulating olive-based agroforestry systems, were intercrops of cereals and legumes are promoted (Amassaghrou et al., 2023; Mantzanas et al., 2021).

This new version of the Hi-sAFe model is a response to the emerging demands for simulations of agroforestry systems based on fruit trees. In these systems, fruit trees serve as the primary income source and are considered high-value assets in agroforestry (Deng et al., 2017; Pantera et al., 2018; Zahoor et al., 2021). As mentioned in the article by Barbault et al. (submitted), no existing agronomic model is capable of simulating the development of a fruit tree-based agroforestry system (Grisafi et al., 2022). While there are models available for the olive tree (Abdel-Razik, 1989; López-Bernal et al., 2018; Moriondo et al., 2019, 2015) and other agroforestry models (Kraft et al., 2021; Van der Werf et al., 2007; Van Noordwijk and Lusiana, 1999; Vezy et al., 2020), none of them were able to simulate diversified systems based on olive trees. To address this demand and explore the agronomic and environmental performances of these systems, one of the solutions was to incorporate new formalisms into existing models, as done in the Hi-sAFe agroforestry model (Barbault et al., submitted).

Furthermore, this article provides a precise and detailed protocol for adapting an existing model to simulate fruit trees. This methodology can also be applied in new modelling efforts and extended to the adaptation of other crop models. In addition to the approach, valuable data is also available, partially alleviating the lack of data required for parameterizing and calibrating mechanistic models (Maurel et al., 2022).

Conclusion

This new version 4.2 of the Hi-sAFe model allows users to test, in addition to trees for wood production, the development and productivity of fruit-based agroforestry systems. This new version integrates new formalisms to represent fruit trees and evergreen trees. The olive tree is the first fruit tree to be parameterized, calibrated and verified in Hi-sAFe. The verification of the model allowed to check the predictive capacity of the model on the olive yield for a traditional olive grove and for an agroforestry system associating olive trees with a pea and wheat rotation.

Users of the model can now test different olive-based agroforestry systems, including different spatial arrangements, crop rotations, cultivation operations and soil and climate contexts, etc. Through virtual experiments, this new version can be used to address scientific questions ranging from the impact of a specific cultivation operation on olive trees, to the identification of ideotypes of trees suited for cultivation in agroforestry or to the impact of global warming. Thus, modelling work with the Hi-sAFe model will continue in order to answer increasingly diverse and complex scientific questions.

Acknowledgments

The work presented here was funded through project Biodiversify (project number PRIMA 1548 for the H2020 European Union's Framework programme for research and innovation, project number ANR-19-P026-0008 for the French Agence nationale de la recherche) and project Modolivier (project number 00107057 for the Fondation de France).

References

- Abdel-Razik, M., 1989. A model of the productivity of olive trees under optional water and nutrient supply in desert conditions. *Ecol. Model.* 45, 179–204.
- Abed, A., Bonhomme, M., Lacoïnte, G., Bourgeois, G., 2019. Climate change effect on the bud break and flowering dates of the apple trees in mountainous and plain regions of Algeria. *Adv. Hortic. Sci.* 33, 417–431.
- Amassaghrou, A., Barkaoui, K., Bouaziz, A., Alaoui, S.B., Fatemi, Z.E.A., Daoui, K., 2023. Yield and related traits of three legume crops grown in olive-based agroforestry under an intense drought in the South Mediterranean. *Saudi J. Biol. Sci.* 30, 103597. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2023.103597>
- Barbault, N., Dupraz, C., Lauri, P.E., Gosme, M., 2023. Parametrization of an agroforestry model: from forest trees to olive trees. *Acta Hortic.* 211–218. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2023.1366.24>
- Barranco, D., Ruiz, N., Campo, M.G., 2005. Frost Tolerance of Eight Olive Cultivars. *HortScience* 40, 558–560. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.40.3.558>
- Bergez, J.E., Colbach, N., Crespo, O., Garcia, F., Jeuffroy, M.H., Justes, E., Loyce, C., Munier-Jolain, N., Sadok, W., 2010. Designing crop management systems by simulation. *Eur. J. Agron.* 32, 3–9. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2009.06.001>
- Brisson, N., Launay, M., Mary, B., Beaudoin, N., 2009. Conceptual Basis, Formalisations and Parameterization of the Stics Crop Model. Editions Quae, Paris.
- Deng, Z., Guan, H., Hutson, J., Forster, M.A., Wang, Y., Simmons, C.T., 2017. A vegetation-focused soil-plant-atmospheric continuum model to study hydrodynamic soil-plant water relations. *Water Resour. Res.* 53, 4965–4983. <https://doi.org/10.1002/2017WR020467>
- Dollinger, J., Jose, S., 2018. Agroforestry for soil health. *Agrofor. Syst.* 92, 213–219. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0223-9>
- Dupraz, C., 1999. Adequate design of control treatments in long term agroforestry experiments with multiple objectives, in: Auclair, D., Dupraz, Christian (Eds.), *Agroforestry for Sustainable Land-Use Fundamental Research and Modelling with Emphasis on Temperate and Mediterranean Applications*, Forestry Sciences. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 35–48. https://doi.org/10.1007/978-94-017-0679-7_2
- Dupraz, C., Wolz, K., Lecomte, I., Talbot, G., Vincent, G., Mulia, R., Bussière, F., Ozier-Lafontaine, H., Andrianarisoa, S., Jackson, N., Lawson, G., Dones, N., Sinoquet, H., Lusiana, B., Harja, D., Domenicano, S., Reyes, F., Gosme, M., Van Noordwijk, M., 2019. Hi-sAFe: A 3D Agroforestry Model for Integrating Dynamic Tree–Crop Interactions. *Sustainability* 11, 2293. <https://doi.org/10.3390/su11082293>
- El Yaacoubi, A., Malagi, G., Oukabli, A., Hafidi, M., Legave, J.-M., 2014. Global warming impact on floral phenology of fruit trees species in Mediterranean region. *Sci. Hortic.* 180, 243–253.

- Fernández-Escobar, R., De la Rosa, R., Leon, L., Gomez, J., Testi, L., Orgaz, F., Gil-Ribes, J., Quesada-Moraga, E., Trapero, A., Masallem, M., 2013. Evolution and sustainability of the olive production systems. *Options Mediterr.* 106, 11–42.
- Gómez, J., Vanderlinden, K., Giráldez, J., Fereres, E., 2002. Rainfall concentration under olive trees. *Agric. Water Manag.* 55, 53–70.
- Gómez-del-Campo, M., Barranco, D., 2005. Field evaluation of frost tolerance in 10 olive cultivars. *Plant Genet. Resour.* 3, 385–390. <https://doi.org/10.1079/PGR200592>
- Grisafi, F., DeJong, T.M., Tombesi, S., 2022. Fruit tree crop models: an update. *Tree Physiol.* 42, 441–457.
- Ilarioni, L., Nasini, L., Brunori, A., Proietti, P., 2013. Experimental measurement of the biomass of *Olea europaea* L. *Afr. J. Biotechnol.* 12, 1216–1222.
- Iooss, B., Janon, A., Pujol, G., Broto, B., Boumhaout, K., Da Veiga, S., Delage, T., Fruth, J., Gilquin, L., Guillaume, J., 2020. Sensitivity: global sensitivity analysis of model outputs. R Package Version 1.
- Iooss, Bertrand, Da Veiga, 2021. „Package ‘sensitivity’.”.
- Justes, E., Vezy, R., Munz, S., Paff, K., Bedoussac, L., Gaudio, N., Lecharpentier, P., Ripoche, D., Launay, M., 2021. Recent advances in intercropping modelling: the new version of the STICS soil-crop model simulates consistently a wide range of bi-specific annual intercrops. Presented at the Conference on Intercropping for sustainability. Research developments and their application.
- Koubouris, G.C., Metzidakis, I.T., Vasilakakis, M.D., 2009. Impact of temperature on olive (*Olea europaea* L.) pollen performance in relation to relative humidity and genotype. *Environ. Exp. Bot.* 67, 209–214. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.06.002>
- Kraft, P., Rezaei, E.E., Breuer, L., Ewert, F., Große-Stoltenberg, A., Kleinebecker, T., Seserman, D.-M., Nendel, C., 2021. Modelling Agroforestry’s Contributions to People—A Review of Available Models. *Agronomy* 11, 2106. <https://doi.org/10.3390/agronomy11112106>
- Lauri, P.-É., Barkaoui, K., Ater, M., Rosati, A., 2019. Agroforestry for fruit trees in Europe and Mediterranean North Africa, in: *Burleigh Dodds Series in Agricultural Science*. Burleigh Dodds Science Publishing, pp. 385–418. <https://doi.org/10.19103/AS.2018.0041.18>
- Legave, J.-M.J.-M., 2009. Comment faire face aux changements climatiques en arboriculture fruitière? *Innov. Agron.* 7, 165–177.
- López-Bernal, Á., Morales, A., García-Tejera, O., Testi, L., Orgaz, F., De Melo-Abreu, J.P., Villalobos, F.J., 2018. OliveCan: A Process-Based Model of Development, Growth and Yield of Olive Orchards. *Front. Plant Sci.* 9, 632. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00632>
- Lovell, S.T., Dupraz, C., Gold, M., Jose, S., Revord, R., Stanek, E., Wolz, K.J., 2018. Temperate agroforestry research: considering multifunctional woody polycultures and the design of long-term field trials. *Agrofor. Syst.* 92, 1397–1415. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0087-4>
- Luedeling, E., Smethurst, P.J., Baudron, F., Bayala, J., Huth, N.I., van Noordwijk, M., Ong, C.K., Mulia, R., Lusiana, B., Muthuri, C., Sinclair, F.L., 2016. Field-scale modeling of tree–crop interactions: Challenges and development needs. *Agric. Syst.* 142, 51–69. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2015.11.005>
- Mancuso, S., Fiorino, P., Pasquali, G., 2002a. Phenology modelling and forecasting in olive (*Olea europaea* L.) using artificial neural networks. *Phenol. Model. Forecast. Olive Olea Eur. Using Artif. Neural Netw.* 1000–1010.

- Mancuso, S., Pasquali, G., Fiorino, P., 2002b. Phenology modelling and forecasting in olive (*Olea europaea* L.) using artificial neural networks. *Phenology modelling and forecasting in olive (Olea europaea L.) using artificial neural networks* 1000–1010.
- Mantzanas, K., Pantera, A., Koutsoulis, D., Papadopoulos, A., Kapsalis, D., Ispikoudis, S., Fotiadis, G., Sidiropoulou, A., Papanastasis, V.P., 2021. Intercrop of olive trees with cereals and legumes in Chalkidiki, Northern Greece. *Agrofor. Syst.* 95, 895–905. <https://doi.org/10.1007/s10457-021-00618-6>
- Maselli, F., Chiesi, M., Brilli, L., Moriondo, M., 2012. Simulation of olive fruit yield in Tuscany through the integration of remote sensing and ground data. *Ecol. Model.* 244, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.06.028>
- Masmoudi-Charfi, C., Mechlia, N.B., 2008. Changes in olive tree height growth during the first years of cultivation. *Adv. Hortic. Sci.* 8–12.
- Maurel, V.B., Bonnet, P., Piot-Lepetit, I., Brossard, L., Labarthe, P.P., Maurel, P., Courtonne, J.-Y., 2022. Numérique et agroécologie: des opportunités à explorer, des défis à relever.
- Morales, A., Leffelaar, P.A., Testi, L., Orgaz, F., Villalobos, F.J., 2016. A dynamic model of potential growth of olive (*Olea europaea* L.) orchards. *Eur. J. Agron.* 74, 93–102. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.12.006>
- Moriondo, M., Ferrise, R., Trombi, G., Brilli, L., Dibari, C., Bindi, M., 2015. Modelling olive trees and grapevines in a changing climate. *Environ. Model. Softw.* 72, 387–401. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.12.016>
- Moriondo, M., Leolini, L., Brilli, L., Dibari, C., Tognetti, R., Giovannelli, A., Rapi, B., Battista, P., Caruso, G., Gucci, R., Argenti, G., Raschi, A., Centritto, M., Cantini, C., Bindi, M., 2019. A simple model simulating development and growth of an olive grove. *Eur. J. Agron.* 105, 129–145. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.02.002>
- Nair, P.R., 2012. Climate change mitigation: a low-hanging fruit of agroforestry, in: *Agroforestry-the Future of Global Land Use*. Springer, pp. 31–67.
- Paleari, L., Vesely, F.M., Ravasi, R.A., Movedi, E., Tartarini, S., Invernizzi, M., Confalonieri, R., 2020. Analysis of the Similarity between in Silico Ideotypes and Phenotypic Profiles to Support Cultivar Recommendation—A Case Study on *Phaseolus vulgaris* L. *Agronomy* 10, 1733.
- Panozzo, A., Bernazeau, B., Desclaux, D., 2020. Durum wheat in organic olive orchard: good deal for the farmers? *Agrofor. Syst.* 94, 707–717. <https://doi.org/10.1007/s10457-019-00441-0>
- Pantera, A., Burgess, P.J., Mosquera Losada, R., Moreno, G., López-Díaz, M.L., Corroyer, N., McAdam, J., Rosati, A., Papadopoulos, A.M., Graves, A., Rigueiro Rodríguez, A., Ferreiro-Domínguez, N., Fernández Lorenzo, J.L., González-Hernández, M.P., Papanastasis, V.P., Mantzanas, K., Van Lerberghe, P., Malignier, N., 2018. Agroforestry for high value tree systems in Europe. *Agrofor. Syst.* 92, 945–959. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0181-7>
- Paoletti, A., Rosati, A., Famiani, F., 2021. Effects of cultivar, fruit presence and tree age on whole-plant dry matter partitioning in young olive trees. *Heliyon* 7, e06949. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06949>
- Paris, P., Camilli, F., Rosati, A., Mantino, A., Mezzalana, G., Dalla Valle, C., Franca, A., Seddaiu, G., Pisanelli, A., Lauteri, M., Brunori, A., Re, G.A., Sanna, F., Ragagnini, G., Mele, M., Ferrario, V., Burgess, P.J., 2019. What is the future for agroforestry in Italy? *Agrofor. Syst.* 93, 2243–2256. <https://doi.org/10.1007/s10457-019-00346-y>

- Proietti, P., 1998. Gas Exchange in senescing leaves of *Olea europaea* L. *Photosynthetica* 579–587.
- Pumariño, L., Sileshi, G.W., Gripenberg, S., Kaartinen, R., Barrios, E., Muchane, M.N., Midega, C., Jonsson, M., 2015. Effects of agroforestry on pest, disease and weed control: A meta-analysis. *Basic Appl. Ecol.* 16, 573–582. <https://doi.org/10.1016/j.baee.2015.08.006>
- Ramachandran Nair, Nair, V.D., Mohan Kumar, B., Showalter, J.M., 2010. Carbon Sequestration in Agroforestry Systems, in: *Advances in Agronomy*. Elsevier, pp. 237–307. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)08005-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)08005-3)
- Ravasi, R.A., Paleari, L., Vesely, F.M., Movedi, E., Thielke, W., Confalonieri, R., 2020. Ideotype definition to adapt legumes to climate change: A case study for field pea in Northern Italy. *Agric. For. Meteorol.* 291, 108081.
- Rodrigues, N., Casal, S., Rodrigues, A.I., Cruz, R., Peres, A.M., Pereira, J.A., 2022. Impact of Frost on the Morphology and Chemical Composition of cv. Santulhana Olives. *Appl. Sci.* 12, 1222. <https://doi.org/10.3390/app12031222>
- Stillitano, T., De Luca, A., Falcone, G., Spada, E., Gulisano, G., Strano, A., 2016. Economic profitability assessment of Mediterranean olive growing systems. *Bulg. J. Agric. Sci.* 22.
- Stillitano, T., De Luca, A.I.D., Falcone, G., Spada, E., Gulisano, G., Strano, A., 2010. Economic profitability assessment of mediterranean olive growing systems 10.
- Trentacoste, E.R., Puertas, C.M., Sadras, V.O., 2010a. Effect of fruit load on oil yield components and dynamics of fruit growth and oil accumulation in olive (*Olea europaea* L.). *Eur. J. Agron.* 32, 249–254. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.01.002>
- Trentacoste, E.R., Puertas, C.M., Sadras, V.O., 2010b. Effect of fruit load on oil yield components and dynamics of fruit growth and oil accumulation in olive (*Olea europaea* L.). *Eur. J. Agron.* 32, 249–254. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.01.002>
- Van der Werf, W., Keesman, K., Burgess, P., Graves, A., Pilbeam, D., Incoll, L.D., Metselaar, K., Mayus, M., Stappers, R., van Keulen, H., Palma, J., Dupraz, C., 2007. Yield-SAFE: A parameter-sparse, process-based dynamic model for predicting resource capture, growth, and production in agroforestry systems. *Ecol. Eng.* 29, 419–433. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.09.017>
- Van Noordwijk, M., Lusiana, B., 1999. WaNuLCAS, a model of water, nutrient and light capture in agroforestry systems, in: Auclair, D., Dupraz, C. (Eds.), *Agroforestry for Sustainable Land-Use Fundamental Research and Modelling with Emphasis on Temperate and Mediterranean Applications*, Forestry Sciences. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 217–242. https://doi.org/10.1007/978-94-017-0679-7_14
- Vezy, R., le Maire, G., Christina, M., Georgiou, S., Imbach, P., Hidalgo, H.G., Alfaro, E.J., Blitz-Frayret, C., Charbonnier, F., Lehner, P., Loustau, D., Roupsard, O., 2020. DynACof: A process-based model to study growth, yield and ecosystem services of coffee agroforestry systems. *Environ. Model. Softw.* 124, 104609. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104609>
- Villalobos, F.J., Testi, L., Hidalgo, J., Pastor, M., Orgaz, F., 2006. Modelling potential growth and yield of olive (*Olea europaea* L.) canopies. *Eur. J. Agron.* 24, 296–303. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2005.10.008>
- Wang, Y., Zhang, B., Banwart, S.A., 2017. Reduced Subsurface Lateral Flow in Agroforestry System Is Balanced by Increased Water Retention Capacity, in: *Advances in Agronomy*. Elsevier, pp. 73–97. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2016.10.005>

Zahoor, S., Dutt, V., Mughal, A.H., Pala, N.A., Qaisar, K.N., Khan, P.A., 2021. Apple-based agroforestry systems for biomass production and carbon sequestration: implication for food security and climate change contemplates in temperate region of Northern Himalaya, India. *Agrofor. Syst.* 95, 367–382. <https://doi.org/10.1007/s10457-021-00593-y>

Zhang, Q., Wang, C., Wang, X., Quan, X., 2009. Carbon concentration variability of 10 Chinese temperate tree species. *For. Ecol. Manag.* 258, 722–727.

Appendix A: List of parameters in the tree file with the values calibrated for the olive tree

Appendix A-1: List of phenology parameters

Parameter name	Explanation	Unit	Method	Value
budBurstTempAccumulationDateStart	Date to start accumulation of temperature for budburst	DOY	General	1
budBurstTempThreshold	Threshold of effective temperature for cumulating degree day	degrees C	General	10
budBurstTriggerTemp	Date to start accumulation of temperature for budburst	-	General	1
budBurstDelayMaxAfterPollarding	Minimum number of days to delay bud burst after pollarding	days	General	28
budBurstDelayMinAfterPollarding	Maximum number of days to delay bud burst after pollarding	days	General	14
leafExpansionDuration	Duration of leaf expansion	days	(Masmoudi-Charfi and Mechlia, 2008)	365
budBurstToLeafFallDuration	Bud burst to leaf fall duration	days	(Proietti, 1998)	850
leafFallDuration	Duration of leaf fall	days	(Proietti, 1998)	60
leafFallFrostThreshold	Threshold for frost mortality of leaves	degrees C	(López-Bernal et al., 2018)	-11.8
coldRequirement	Activation (1) or inactivation (0) of this module	-	(Moriondo et al., 2019)	1
coldTempAccumulationDateStart	Date to start accumulation of temperature for cold requirement	Days	(Moriondo et al., 2019)	244
coldTempThreshold	Threshold of effective temperature for chilling units	CU	(Moriondo et al., 2019)	20
coldBudBurstTriggerTemp	chilling units	CU	(Moriondo et al., 2019)	185
coldBudBurstTriggerParamA	chilling units	CU	(Moriondo et al., 2019)	0.023
coldBudBurstTriggerParamB	chilling units	CU	(Moriondo et al., 2019)	-1.74
coldBudBurstTriggerParamC	chilling units	CU	(Moriondo et al., 2019)	0.24
coldBudBurstTriggerParamE	chilling units	CU	(Moriondo et al., 2019)	8.47

Appendix A-2: List of allometry parameters

Parameter name	Explanation	Unit	Method	Value
crownShape	Crown shape code	1=ellipsoid; 2=paraboloid	General	1
ellipsoidTruncationRatio	Ratio for calculating ellipsoid truncation	ratio	General	0
phenologyType	Phenology type	1=ColdDeciduous 2=Evergreen	General	2
nbCohortMax	1 cohort = 1 leaf generation	number of cohorts	(López-Bernal et al., 2018; Proietti, 1998)	3
branchVolumeRatio	Ratio of branch volume to crown volume	cm ³ cm ⁻³	Calibrated	0.00128
crownDbhAllometricCoeffA	Parameter A for the allometric relationship between crown area and DCB (Diameter at Crown Base)	-	Quantified	51.7253
crownDbhAllometricCoeffB	Parameter B for the allometric relationship between crown area and DCB	-	Quantified	0.56
dcbFromDbhAllometricCoeff	Parameter for the allometric relationship between DBH and DCB: DCB	-	Quantified	2.14
heightDbhAllometricCoeffA	Parameter A for the allometric relationship between height and DBH: height	-	Quantified	10.25
heightDbhAllometricCoeffB	Parameter B for the allometric relationship between height and DBH: height	-	Quantified	0.32
leafAreaCrownVolCoefA	Parameter A for the allometric relationship between leafArea and crownVolume	-	Quantified	6.88
leafAreaCrownVolCoefB	Parameter B for the allometric relationship between leafArea and crownVolume	-	Quantified	0.51
maxCrownRadiusInc	Maximum daily allowed growth of crown radius	m	(Masmoudi-Charfi and Mechlia, 2008)	9e-04
maxHeightInc	Maximum daily allowed growth of tree height	m	(Masmoudi-Charfi and Mechlia, 2008)	0.01
maxDbhInc	Maximum daily allowed growth of tree Dbh	-	General	1e-04
stemDbhAllometricCoeffA	Parameter A for the allometric relationship between stem volume, DBH, and height	-	Quantified	-1.27
stemDbhAllometricCoeffB	Parameter B for the allometric relationship between stem volume, DBH, and height	-	Quantified	0.7215
stemDbhAllometricCoeffC	Parameter C for the allometric relationship between stem volume, DBH, and height	m ² m ⁻¹	Quantified	0.8108

Appendix A-3: List of light parameters

Parameter name	Explanation	Unit	Method	Value
clumpingCoef	Correction parameter to account for leaf clumping. A clumping coefficient below 1, equal to 1 or above 1 indicates a clumped, random or regular distribution of leaves inside the canopy volume, respectively	ratio	General	1
leafLueMax	Light use efficiency maximal	-	Calibrated	1.34
leafAgeForLueMax	Leaf Age For Lue Max	-	General	100
leafNirAbsorption	Absorption coefficient for near infra-red radiation	-	General	0.15
leafParAbsorption	Absorption coefficient for PAR radiation	-	General	0.85
leafSenescenceRate	Additional daily fraction of leaves senesced each day during the leaf fall period IN ADDITION TO the standard sigmoidal senescence curve calculated as a function of leafFallDuration	-	General	0
leafPhotosynthesisEfficiencyTimeConstant	leafPhotosynthesisEfficiencyTimeConstant	-	General	3.5e-07
lueStressMethod	Toggle to select the method for applying water and nitrogen stresses to LUE.	-	General	1
lueWaterStressResponsiveness	Governs amplitude of response in LUE reduction to water stress	-	General	0.25
lueTemperatureStressTMin	response of photosynthetic capacity to temperature	°C	General	0
lueTemperatureStressTMax	response of photosynthetic capacity to temperature	°C	General	35
lueTemperatureStressTOptMin	response of photosynthetic capacity to temperature	°C	General	15
lueTemperatureStressTOptMax	response of photosynthetic capacity to temperature	°C	General	25
leafFrostStressTemperatureMin	Frost stress effect on the leaf area	°C	(Barranco et al., 2005; Gómez-del-Campo and Barranco, 2005)	-10
leafFrostStressTemperatureMax	Frost stress effect on the leaf area	°C	(Barranco et al., 2005; Gómez-del-Campo and Barranco, 2005)	-20

Appendix A-4: List of carbon allocation parameters

Parameter name	Explanation	Unit	Method	Value
woodAreaDensity	Virtual leaf area density for winter light interception by tree branches	m ² m ⁻³	General	0.026

woodCarbonContent	Carbon content of all compartments except leaves	g C g ⁻¹ dry biomass	(Zhang et al., 2009)	0.5
woodDensity	Wood density of branches, stem, stump, and coarse roots	kg m ⁻³	(Ilarioni et al., 2013)	800
leafCarbonContent	Leaf carbon content	g C g ⁻¹ dry biomass	(Zhang et al., 2009)	0.5
leafMassArea	Leaf dry mass per unit leaf area	kg m ⁻²	Calibrated	0.23
rsBelowGroundStressActivation	Ratio of coarse root area to fine root length	ratio	General	1
rsBelowGroundStressMethod	Level of aboveGroundImbalance above which remobilisation of reserves is triggered	kg kg ⁻¹	General	1
rsLightStressActivation	Initial target leaf-fine root ratio at tree planting. This is also used to calculate the initial fine root carbon pool from the target leaf area for the initialized crown area.	kg kg ⁻¹	General	1
rsNitrogenExcessStressActivation	Maximum target leaf-fine root ratio	kg kg ⁻¹	General	1
imbalanceThreshold	Minimum target leaf-fine root ratio	ratio	General	0.1
initialTargetLfrRatio	Governs amplitude of response in shoot-root allocation to nitrogen stress	day ⁻¹	General	0.5
maxTargetLfrRatio	Governs amplitude of response in shoot-root allocation when there is no stress	ratio	General	0.9
maxTargetLfrRatioDailyVariation	Toggle to select the method for applying water and nitrogen stresses to shoot-root allocation.	ratio	General	0.002
minTargetLfrRatio	Governs amplitude of response in shoot-root allocation to water stress	ratio	General	0.3
rsNitrogenStressResponsiveness	Tree response to nitrogen stress	kg kg ⁻¹	General	1
rsNoStressResponsiveness	Tree response	ratio	General	1
rsStressMethod	Stress method used	ratio	General	1
rsWaterStressResponsiveness	Tree response to water stress	ratio	General	0.55
stumpToStemBiomassRatio	Stump to stem biomass ratio	ratio	General	0.2
targetLfrRatioUpperDrift	Target daily upwards drift in the target leaf-fine root ratio	ratio	General	0.18
maxNSCUseFoliageFraction	Limits daily amount of non-structural carbon (NSC) that can be reallocated from the NSC pool and towards leaf expansion	ratio	General	0.1
maxNSCUseFraction	Maximum daily fraction of non-structural carbon (NSC) that can be reallocated from the NSC pool and towards leaf expansion (used as criteria in addition to maxNSCUseFoliageFraction to smooth variation in NSC and avoid NSC becoming 0)	ratio	General	0.2
targetNSCFraction	Target non-structural carbon pool as a fraction of the tree woody carbon pool	ratio	General	0.1
leafNRemobFraction	Fraction of leaf nitrogen content recovered from dying leaves each day during senescence	-	(Fernández-Escobar et al., 2013; Proietti, 1998)	0.5

localNitrogenUptakeFactor	Fine root proliferation weighting factor for nitrogen uptake efficiency	-	General	50
lueNitrogenStressResponsiveness	Tree response to lue nitrogen stress	-	General	0.1
luxuryNcoefficient	Coefficient applied to optimum N content to define maximum N content (i.e. the proportion of N, relative to the optimum level, which may be accumulated as non-structural nitrogen before N absorption ceases completely)	-	General	2
optiNCBranch	Functional optimum N/C ratio in branches	kg N kg C ⁻¹	(Morales et al., 2016)	0.023
optiNCcoarseRoot	Functional optimum N/C ratio in coarse roots	kg N kg C ⁻¹	(Morales et al., 2016)	0.015
optiNCFineRoot	Functional optimum N/C ratio in fine roots	kg N kg C ⁻¹	(Morales et al., 2016)	0.015
optiNCFoliage	Functional optimum N/C ratio in foliage	kg N kg C ⁻¹	(Morales et al., 2016)	0.015
optiNCStem	Functional optimum N/C ratio in stem	kg N kg C ⁻¹	(Morales et al., 2016)	0.008
optiNCStump	Functional optimum N/C ratio in stump	kg N kg C ⁻¹	(Morales et al., 2016)	0.008
optiNCFruit	Functional optimum N/C ratio in fruit	kg N kg C ⁻¹	(Morales et al., 2016)	0.013
rootNRemobFraction	Fraction of fine root nitrogen content recoverd from dying fine roots each day during senescence	ratio	General	0.226
targetNcoefficient	Coefficient applied to optimum N content to define target N content	ratio	General	1.2
localWaterUptakeFactor	Fine root proliferation weighting factor for water uptake efficiency	-	General	62
nitrogenFixation	Leaf dry mass per unit leaf area	1= activation 2=inactivation	General	0

Appendix A-5: List of root parameters

Parameter name	Explanation	Unit	Method	Value
cRAreaToFRLengthRatio	Maximum daily change (positive or negative) in the target leaf-fine root ratio	kg kg ⁻¹	General	2.5e-08
coarseRootAnoxiaResistance	After this number of days of saturation in a voxel, anoxia will kill the coarse root and all downstream roots.	days	General	60
coarseRootTopologyType	Coarse root topology shape at initalization. Only impacts initialization of large root systems.	1: surface then down; 2: taproot, 3: ray from stump	General	1
colonisationFraction	The proportion of fine-root-allocated carbon that is allocated to colonisation (only on days when there is any colonisation). The remainder is allocated to proliferation. This is typically a small proportion - just enough to "seed" the newly colonized voxels. This proportion of carbon is split equally among all newly colonized	ratio	Calibrated	0.58

	voxels. Has practically no impact on the model, as long as it is not 0, which means that no voxels can ever be colonized			
colonisationThreshold	Threshold for root colonisation	m of root m ⁻³ voxel	Calibrated	1740
fineRootAnoxiaLifespan	Mean lifespan of fine roots in anoxic voxel for senescence calculation	days	General	50
fineRootLifespan	Mean lifespan of fine roots NOT in anoxic voxel for senescence calculation	days	General	140
geotropismFactor	Governs the fraction of vertical root colonisation to upward vs. downward voxels (1 means no upward colonization, 0 allows both)	-	General	0.5
horizontalPreference	Fraction of root colonisation to horizontal voxels (e.g. a value of 0.67 means no vertical-horizontal preference since there are twice as many horizontally adjacent voxels as there are vertically adjacent voxels)	ratio	General	0.5
sinkDistanceEffect	Fine root proliferation weighting factor for the "cost" of fine roots (i.e. the cost of the coarse roots necessary to connect the fine roots to the tree stump)	-	General	29
specificRootLength	Fine root length per unit dry mass	m g ⁻¹ of dry matter	Calibrated	7.8

Appendix A-6: List of microclimate parameters

Parameter name	Explanation	Unit	Method	Value
stemFlowCoefficient	Used for calculating stem flow	-	General	1
stemFlowMax	Maximum fraction of rain that leaves via stemflow	ratio	(Gómez et al., 2002)	0.01
transpirationCoefficient	Scaling factor for transpiration	-	Calibrated	0.88
wettability	Wettability of leaves, for calculating interception of rain by tree canopy	mm lai ⁻¹	(Maselli et al., 2012)	0.045

Appendix A-7: List of water repartition parameters

Parameter name	Explanation	Unit	Method	Value
treeAlpha	Parameter for transpiration reduction factor following Campbell	-	General	0.1
treeBufferPotential	Potential drop needed to enter the root expressed as a % of soil water potential	%	General	0.05
treeHarmonicWeightedMean	treeHarmonicWeightedMean	-	General	1
treeLongitudinalResistantFactor	Longitudinal resistance factor for water flow in coarse roots from voxel to stem base	mm cm ⁻¹ m ⁻¹	General	2000
treeMaxTranspirationPotential	Maximum tree transpiration potential (water column height)	cm	Calibrated	-32000
treeMinTranspirationPotential	Minimum tree transpiration potential (water column height)	cm	General	-82000

treeRootConductivity	Fine root axial conductance of water	cm day ⁻¹	General	1e-05
treeRootDiameter	Fine root diameter	cm	Calibrated	0.089
senWaterStressResponsiveness	Senescence of tree in response to water stress	-	General	1
senNitrogenStressResponsiveness	Senescence of tree in response to nitrogen stress	-	General	1

Appendix A-8: List of fruit parameters

Parameter name	Explanation	Unit	Method	Value
fruitCompartment	Activation of fruit compartment	1= activation 2=inactivation	General	1
fruitFirstYear	Year of fruiting	year	(Stillitano et al., 2016)	4
floweringTempAccumulationDateStart	Threshold temperature accumulation	degree	(Mancuso et al., 2002a)	1
floweringTempThreshold	Date of temperature accumulation	date	(Mancuso et al., 2002a)	10
floweringTriggerTemp	Number of degree days to start flowering	degree-days	(Mancuso et al., 2002a)	302
fruitSettingTriggerTemp	Number of degree days to start fruit setting	degree-days	(Mancuso et al., 2002a)	380
fruitGrowthTriggerTemp	Number of degree days to start fruit growth	degree-days	(Mancuso et al., 2002a)	546
fruitVeraisonTriggerTemp	Number of degree days to start veraison	degree-days	(Mancuso et al., 2002a)	1492
fruitHeatStressTemperatureMin	Heat stress during flowering (can impact only the flowers initiated during the day), minimum temperature below which no flowers are affected	degrees C	(Koubouris et al., 2009; López-Bernal et al., 2018)	35
fruitHeatStressTemperatureMax	Heat stress during flowering (can impact only the flowers initiated during the day) maximum temperature above which all flowers fall	degrees C	(Koubouris et al., 2009; López-Bernal et al., 2018)	45
fruitFrostStressTemperatureMin	Minimum temperature for fruit damage (freezing)	°C	(Rodrigues et al., 2022)	-0.5
fruitFrostStressTemperatureMax	Maximal temperature for fruit damage (freezing)	°C	(Rodrigues et al., 2022)	-3
fruitAllocationFraction	Fraction of carbon allocation to fruit compartment	ratio	Calibrated	0.38
fruitCarbonStressDayStart	Day of calculation of Stress carbon index	day	General	92
fruitMaxDryMatterAllocation	Carbon allocation maximum to 1 fruit each days	g C day	(Barbault et al., 2023)	7.3e-03
fruitDryToFreshMatterWeight	Coefficient to convert from dry matter to fresh matter	-	(Trentacoste et al., 2010b)	1.72
fruitDryMaterDensity	Density of Dry matter fruit	m3/t de MS	Fixed	0.8
fruitOilConversionCoeffA	Coefficient a to convert Fresh matter to oil	-	(Trentacoste et al., 2010b)	18.2

fruitOilConversionCoeffB	Coefficient b to convert Fresh matter to oil	-	(Trentacoste et al., 2010b)	0.78
fruitOilConversionCoeffC	Coefficient c to convert Fresh matter to oil	-	(Trentacoste et al., 2010b)	1.31
fruitOilDensity	Fruit oil density	-	General	0.92
fruitLeafArea	Maximal Fruit number per m2 leaf area	-	Calibrated	1575
fruitOptimalLoadLeafArea	Optimal fruit load on the tree	-	General	1000
fruitThinningDelayAfterSetting	Number of days when fruit thinning is applied after fruit setting	-	General	10
fruitingConfortThreshold	Virtual leaf area density for winter light interception by tree branches	-	Calibrated	3.3
fruitingTotalStressThreshold	Carbon content of all compartments except leaves	-	Calibrated	3.96e-15
fruitLueMax	Wood density of branches, stem, stump, and coarse roots	-	General	0.65
fruitAgeForLueMax	Leaf carbon content	-	General	120

Appendix reference

Barbault, N., Dupraz, C., Lauri, P.E., Gosme, M., 2023. Parametrization of an agroforestry model: from forest trees to olive trees. *Acta Hort.* 211–218. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2023.1366.24>

Barranco, D., Ruiz, N., Campo, M.G., 2005. Frost Tolerance of Eight Olive Cultivars. *HortScience* 40, 558–560. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.40.3.558>

Fernández-Escobar, R., De la Rosa, R., Leon, L., Gomez, J., Testi, L., Orgaz, F., Gil-Ribes, J., Quesada-Moraga, E., Trapero, A., Masallem, M., 2013. Evolution and sustainability of the olive production systems. *Options Mediterr.* 106, 11–42.

Gómez, J., Vanderlinden, K., Giráldez, J., Fereres, E., 2002. Rainfall concentration under olive trees. *Agric. Water Manag.* 55, 53–70.

Gómez-del-Campo, M., Barranco, D., 2005. Field evaluation of frost tolerance in 10 olive cultivars. *Plant Genet. Resour.* 3, 385–390. <https://doi.org/10.1079/PGR200592>

Ilarioni, L., Nasini, L., Brunori, A., Proietti, P., 2013. Experimental measurement of the biomass of *Olea europaea* L. *Afr. J. Biotechnol.* 12, 1216–1222.

Koubouris, G.C., Metzidakis, I.T., Vasilakakis, M.D., 2009. Impact of temperature on olive (*Olea europaea* L.) pollen performance in relation to relative humidity and genotype. *Environ. Exp. Bot.* 67, 209–214. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.06.002>

López-Bernal, Á., Morales, A., García-Tejera, O., Testi, L., Orgaz, F., De Melo-Abreu, J.P., Villalobos, F.J., 2018. OliveCan: A Process-Based Model of Development, Growth and Yield of Olive Orchards. *Front. Plant Sci.* 9, 632. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00632>

Mancuso, S., Fiorino, P., Pasquali, G., 2002. Phenology modelling and forecasting in olive (*Olea europaea* L.) using artificial neural networks. *Phenol. Model. Forecast. Olive Olea Eur. Using Artif. Neural Netw.* 1000–1010.

Maselli, F., Chiesi, M., Brillì, L., Moriondo, M., 2012. Simulation of olive fruit yield in Tuscany through the integration of remote sensing and ground data. *Ecol. Model.* 244, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.06.028>

Masmoudi-Charfi, C., Mechli, N.B., 2008. Changes in olive tree height growth during the first years of cultivation. *Adv. Hort. Sci.* 8–12.

Morales, A., Leffelaar, P.A., Testi, L., Orgaz, F., Villalobos, F.J., 2016. A dynamic model of potential growth of olive (*Olea europaea* L.) orchards. *Eur. J. Agron.* 74, 93–102. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.12.006>

Moriondo, M., Leolini, L., Brilli, L., Dibari, C., Tognetti, R., Giovannelli, A., Rapi, B., Battista, P., Caruso, G., Gucci, R., Argenti, G., Raschi, A., Centritto, M., Cantini, C., Bindi, M., 2019. A simple model simulating development and growth of an olive grove. *Eur. J. Agron.* 105, 129–145. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.02.002>

Proietti, P., 1998. Gas Exchange in senescing leaves of *Olea europaea* L. *Photosynthetica* 579–587.

Rodrigues, N., Casal, S., Rodrigues, A.I., Cruz, R., Peres, A.M., Pereira, J.A., 2022. Impact of Frost on the Morphology and Chemical Composition of cv. Santulhana Olives. *Appl. Sci.* 12, 1222. <https://doi.org/10.3390/app12031222>

Stillitano, T., De Luca, A., Falcone, G., Spada, E., Gulisano, G., Strano, A., 2016. Economic profitability assessment of Mediterranean olive growing systems. *Bulg. J. Agric. Sci.* 22.

Trentacoste, E.R., Puertas, C.M., Sadras, V.O., 2010. Effect of fruit load on oil yield components and dynamics of fruit growth and oil accumulation in olive (*Olea europaea* L.). *Eur. J. Agron.* 32, 249–254. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.01.002>

Zhang, Q., Wang, C., Wang, X., Quan, X., 2009. Carbon concentration variability of 10 Chinese temperate tree species. *For. Ecol. Manag.* 258, 722–727.

Abbreviations:

DBH: Diameter at Breast Height

FT-AFS: Fruit Tree-based AgroForestry Systems

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change

LUE: Light Use Efficiency

MOEA: Multi-Objective Evolutionary Algorithm

RMSE: Root Mean Square Error

SEE: Scaled Elementary Effect

Acknowledgements:

The authors thank J-F. Bourdoncle and A. Sellier for their help during field trials to measure phenotypic traits of olive trees. The authors also acknowledge K. Wolz for developing a reference calibration script.

Formatting of funding sources:

This work was supported by the Biodiversify project [European Union, PRIMA, 2020-2023]; and the Modolivier project [Fondation de France, 2020-2023].

Chapitre 6 : La diversification des oliveraies par la co-conception de systèmes diversifiés à base d'oliviers

Ce chapitre est consacré à la diversification des oliveraies, un sujet important pour les professionnels du secteur oléicole. Cette diversification a été abordée à travers deux approches principales : les discussions individuelles auprès d'oléiculteurs et l'atelier de co-conception.

La première partie du chapitre présente les résultats des discussions individuelles avec les oléiculteurs. Ces discussions ont permis de mieux appréhender les pratiques agricoles en vigueur dans les oliveraies, les défis auxquels les producteurs sont confrontés et leurs préférences en matière de diversification. Les réponses des producteurs ont été analysées pour identifier les principales problématiques dans les oliveraies et les types de cultures alternatives qui pourraient être envisagés.

La deuxième partie du chapitre met en avant les résultats de l'atelier de co-conception, qui a réuni des producteurs, des chercheurs et d'autres acteurs du secteur oléicole. Les participants ont travaillé ensemble pour concevoir des systèmes de cultures alternatifs qui pourraient aider à améliorer les performances des systèmes oléicoles.

Les résultats des discussions individuelles et de l'atelier de co-conception offrent des pistes de réflexion pour les professionnels du secteur oléicole qui souhaitent encourager la diversification des cultures.

1) Les résultats des rencontres individuelles pour favoriser l'engagement des acteurs

Les discussions menées auprès des producteurs ont permis d'identifier différents systèmes oléicoles diversifiés : des systèmes existants déjà chez certains producteurs et des systèmes imaginés avec chaque producteur lors de l'entretien. Ces systèmes peuvent être regroupés en plusieurs catégories : i) la complantation d'oliviers et de vignes, ii) l'association d'oliviers et de prairies, iii) les systèmes multistrates, qui intègrent des arbres fruitiers, des plantes de service et des arbres forestiers, iv) des oliviers associés à des cultures intercalaires.

A) Les systèmes olivier - vigne

Certains agriculteurs ont pensé à des complantations olivier – vigne. Dans ces systèmes, les oliviers et les vignes sont plantés en lignes. Traditionnellement, l'espacement entre les lignes d'oliviers était de 8 à 15 mètres, avec des oliviers plantés tous les sept mètres sur le rang. Dans certains systèmes, les oliviers sont plantés en périphérie de la parcelle de vigne (Lasserre, 2017).

Plusieurs producteurs sont intéressés à tester et évaluer les performances agronomiques et environnementales de ces complantations. Ils ont identifié six systèmes olivier-vigne pertinents à tester et à évaluer, avec une répartition spatiale différente des deux espèces dans chaque système (Tableau VIII).

Tableau VIII : Résumé des systèmes oliviers - vigne imaginés individuellement par des producteurs

Numéro de système	Type de système	Nombre d'espèces	Agencement de l'olivier	Avantages	Inconvénients	Incertitudes
1	Complantation olivier - vigne	2	En rang (alternance de plusieurs rangs de vignes et d'un rang d'oliviers)	Diversification de la production Valorisation de l'inter-rang	Risque d'un espace insuffisant pour le déploiement des filets lors de la récolte	Complémentarité des systèmes racinaires ?
2	Complantation olivier – vigne + haie	3	En rang (alternance de plusieurs rangs de vigne et d'un rang d'oliviers)	Diversification de la production Valorisation de l'inter-rang Biodiversité (haie) Diversification du système	Risque d'un espace insuffisant pour le déploiement des filets lors de la récolte	Complémentarité des systèmes racinaires ?
3	Vignoble avec des ilots d'oliviers	2	Ilots d'oliviers dans un vignoble	Diversification de la production (olives de table) Gain de biodiversité	Complexification du passage des engins par rang	Complémentarité des systèmes racinaires ?
5	Complantation olivier – vigne	2	Vignes sur les rangs d'oliviers	Diversification de la production (vigne de table) Valorisation du rang	Risque d'un espace insuffisant pour le déploiement des filets lors de la récolte	Complémentarité des systèmes racinaires ?
5	Complantation olivier – vigne + blé	3	En rang (alternance de plusieurs rangs de vignes et d'un rang d'oliviers) + blé entre les rangs de vignes	Diversification de la production Valorisation de l'inter-rang	Risque d'un espace insuffisant pour le déploiement des filets lors de la récolte	Complémentarité des systèmes racinaires ?
6	Complantation olivier – vigne	2	Rang de vignes et haie d'oliviers en bordure de parcelle	Diversification de la production	Risque d'un espace insuffisant pour le déploiement des filets lors de la récolte	Complémentarité des systèmes racinaires ?

Le premier système de culture olivier – vigne est considéré comme « traditionnel » et consiste à planter les oliviers et les ceps de vignes en ligne, ces derniers plantés dans l'inter-rang enherbé. Pour permettre la récolte des olives, il est nécessaire de prévoir un espace autour de chaque olivier pour le déploiement des filets de récolte (Figure 53).

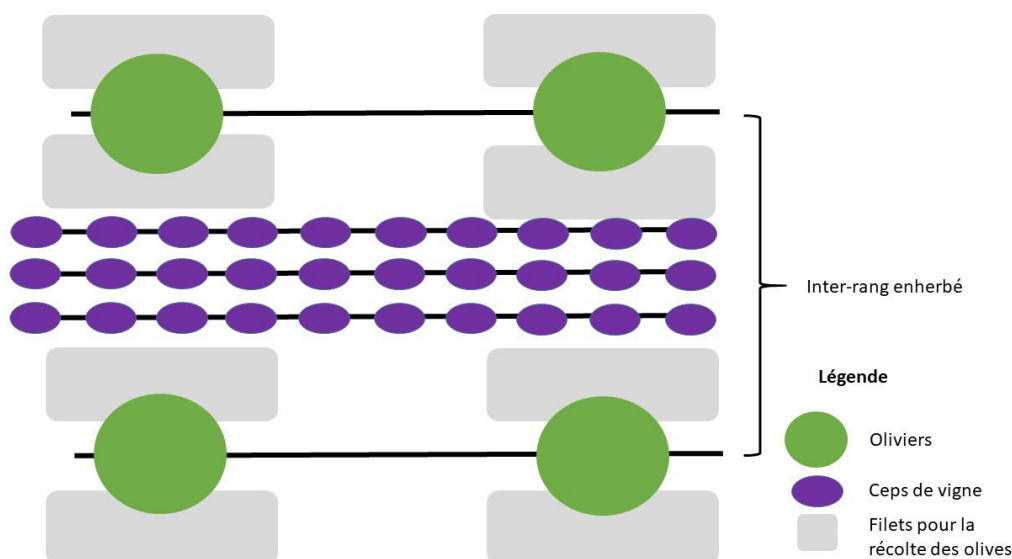


Figure 53 : Représentation schématique d'un système agroforestier co-conçu avec un producteur associant des oliviers et des ceps de vigne

Le deuxième système de culture olivier - vigne consiste à planter les oliviers et les ceps de vigne en ligne, avec des haies composées de différentes espèces d'arbres de haut jet en bordure de parcelle. Ces arbres ont plusieurs fonctions : briser les vents, diminuer le risque de gelées et augmenter la biodiversité. Les ceps de vignes sont plantés dans l'inter-rang enherbé. Pour permettre la récolte des olives, un espace doit être prévu autour de chaque olivier pour le déploiement des filets de récolte. Cependant, l'olivier a besoin d'un ensoleillement important, c'est pourquoi les ceps de vigne sont plantés près des arbres de haut jet (Figure 54).

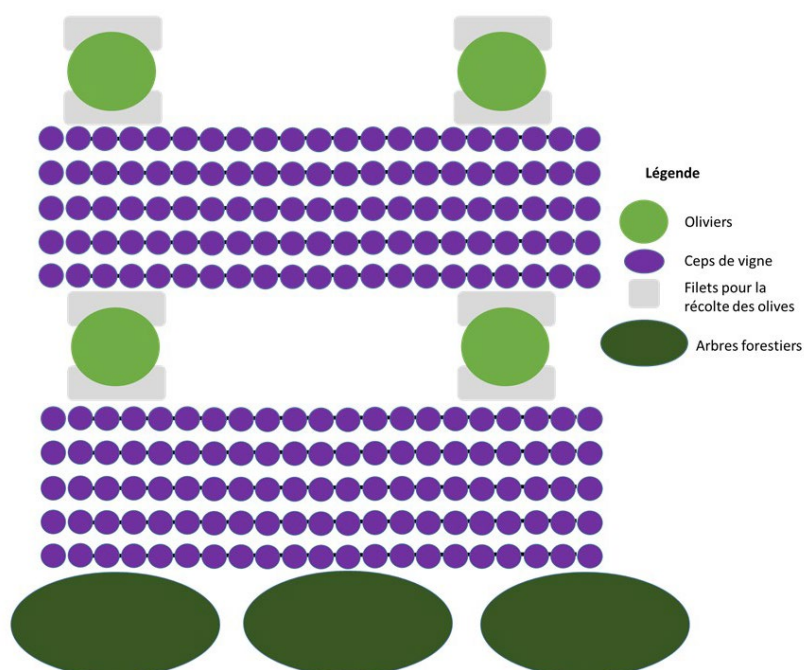


Figure 54 : Représentation schématique d'un système agroforestier co-conçu avec un producteur associant des oliviers, des ceps de vigne et des arbres forestiers

Le troisième système de culture olivier - vigne consiste à planter les oliviers en îlots et les ceps de vigne en ligne (Figure 55). Les îlots d'oliviers regroupent plusieurs oliviers.

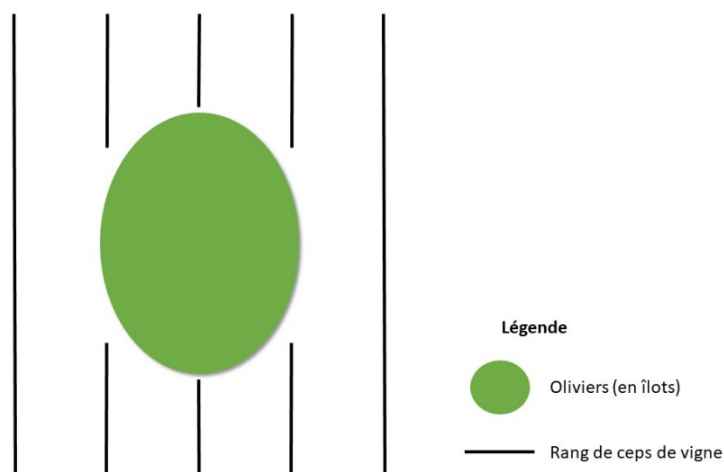


Figure 55 : Représentation schématique d'un système agroforestier co-conçu avec un producteur associant des îlots d'oliviers dans une parcelle de vigne

Le quatrième système de culture olivier - vigne consiste à planter les oliviers et les ceps de vigne sur la même ligne (Figure 56). Ce système a été conçu notamment pour la production de raisins de table. Ce système existe chez l'un des oléiculteurs du réseau.

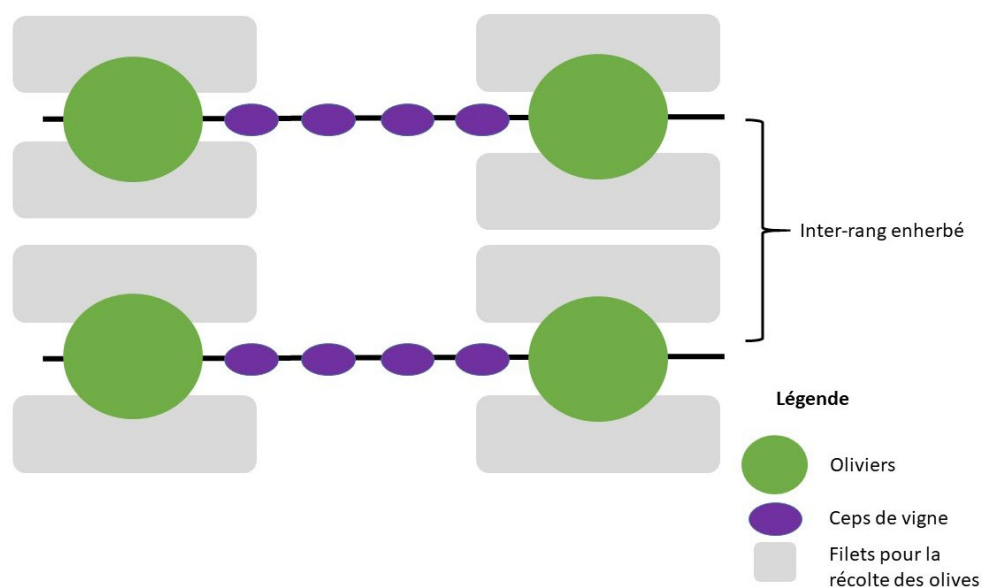


Figure 56 : Représentation schématique d'un système agroforestier co-conçu avec un producteur associant des oliviers et des ceps de vigne sur le rang des oliviers

Le cinquième système de culture olivier – vigne consiste à planter les oliviers et les ceps de vigne en ligne, l'inter-rang entre les vignes recevant une troisième culture. Pour assurer la récolte des olives, il faut prévoir un espace autour de chaque olivier pour permettre le déploiement des filets (Figure 57).

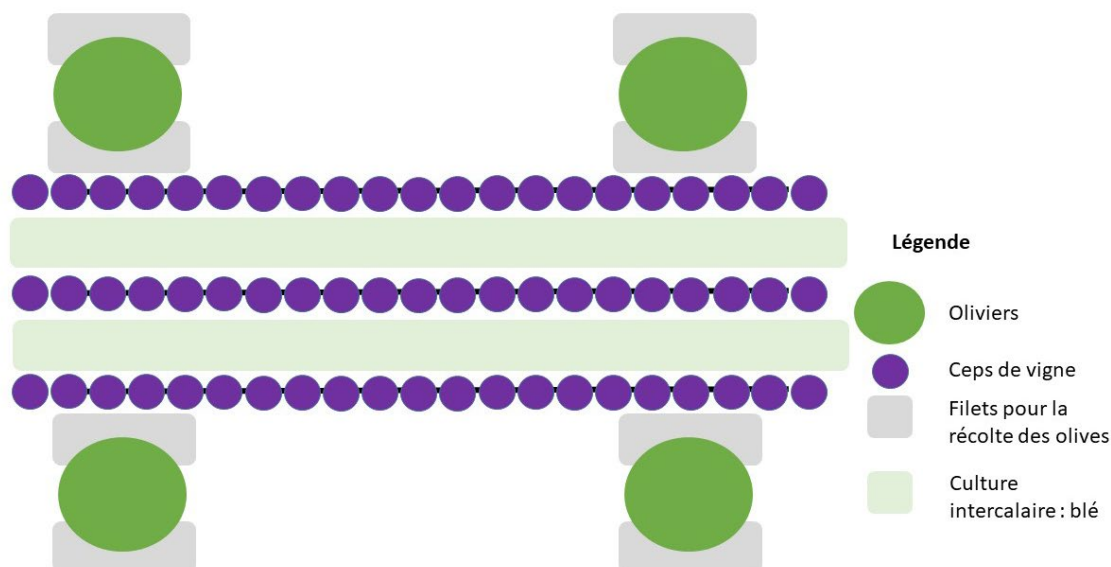


Figure 57 : Représentation schématique d'un système agroforestier co-conçu avec un producteur associant des oliviers, des ceps de vigne et une culture intercalaire

Le sixième système de culture olivier - vigne consiste à planter des ceps de vigne en ligne et des oliviers en limite de parcelle. Les oliviers jouent un rôle de haie en assurant les fonctions écologiques telles que brise-vent (Figure 58).

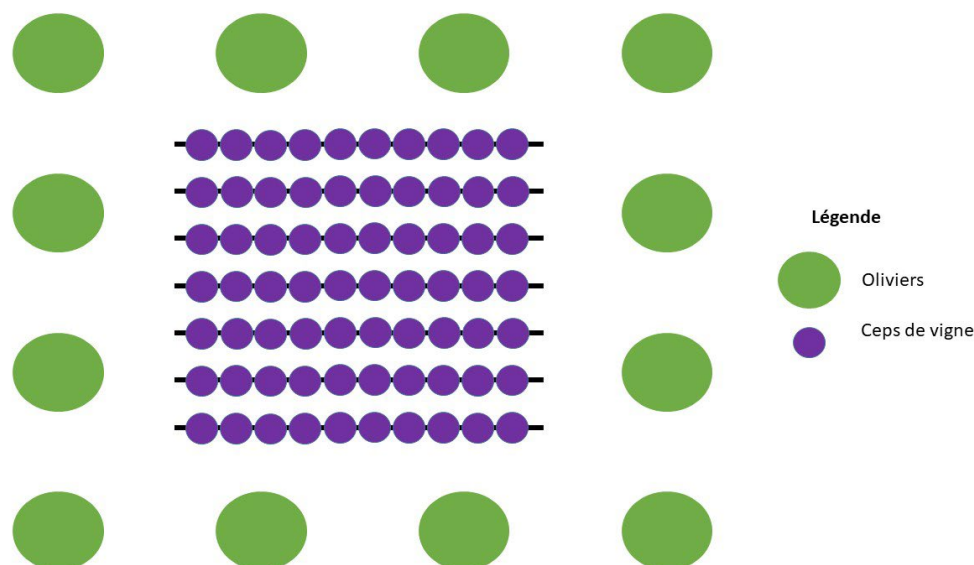


Figure 58 : Représentation schématique d'un système agroforestier co-conçu avec un producteur associant des ceps de vigne et des oliviers en limite de parcelle

B) Les systèmes olivier - prairie

Certains producteurs sont quant à eux intéressés par des systèmes oléicoles incluant soit des animaux, soit une prairie. Deux systèmes distincts ont été proposés (Tableau IX).

Tableau IX : Résumé des différents systèmes oliviers - prairie co-conçus individuellement par des producteurs

Numéro de système	Type de système	Nombre d'espèces	Agencement de l'olivier	Avantages	Inconvénients	Incertitudes
7	Prairie + haie d'oliviers	Plusieurs	Haie d'oliviers	Diversification de la production Avantages des haies Haie adaptée au contexte camarguais	Branches dans la prairie Clôture ?	Clôtures ? Compétition hydrique, azoté et lumineuse
8	Oliveraie + pâturage	Plusieurs	oliveraie	Diversification de la production	Clôture ?	Clôture ? Compétition hydrique, azoté et lumineuse

Le premier système consiste à planter des oliviers en limite de parcelle d'une prairie. Les oliviers ont pour fonction de constituer une haie et d'assurer les fonctions écologiques de cette dernière (brise-vent, biodiversité, etc.). Afin d'éviter des dégâts liés à la présence d'animaux, des clôtures peuvent être installées très facilement autour de la prairie à pâturer (Figure 59).

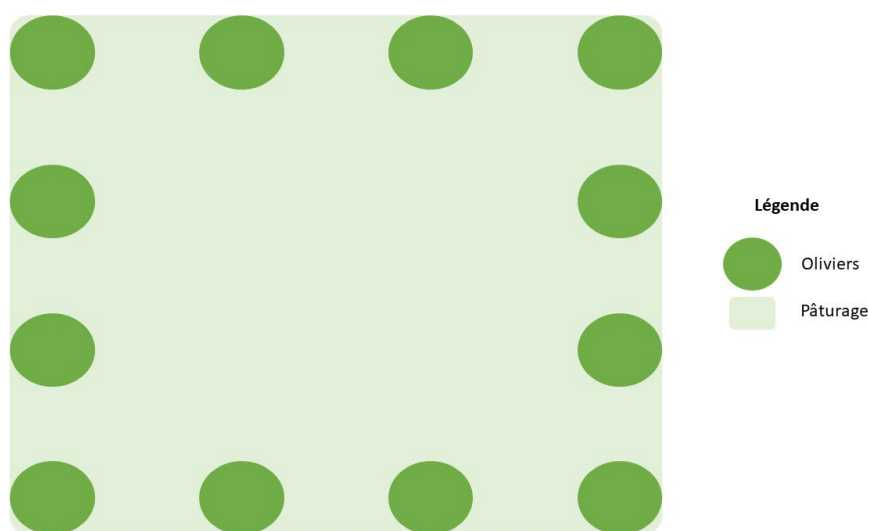


Figure 59 : Représentation schématique d'un système agroforestier co-conçu avec un producteur associant une prairie à pâturer par des animaux ou à récolter et des oliviers en limite de parcelle

Le deuxième système consiste à pâturer et/ou récolter l'herbe de l'oliveraie. Ce système est plus difficilement clôturable pour éviter des dégâts de pâturages sur les oliviers (Figure 60).

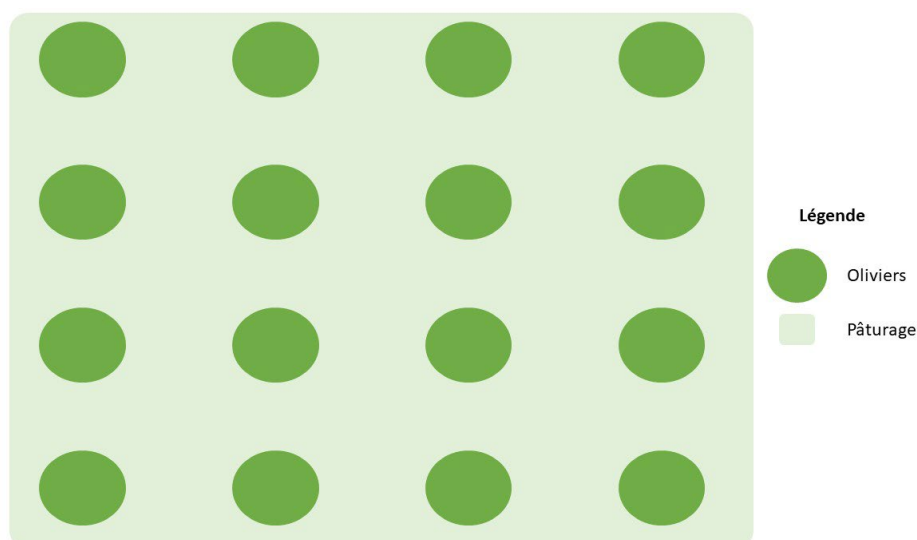


Figure 60 : Représentation schématique d'un système agroforestier co-conçu avec un producteur associant une oliveraie avec des animaux

C) Les systèmes multistrates : arbres fruitiers, plantes de services, arbres forestiers

Certains producteurs ont proposé des systèmes multistrates avec différentes espèces : fruitières, ligneuses, de services, etc. Ce système a été planté chez l'un des producteurs (Figure 61 et Figure 62).

Sur une ancienne oliveraie, d'une densité de plantation de 5×5 m, des espèces ligneuses fruitières ou non ont été ajoutées comme des peupliers d'Italie, des pêchers, des abricotiers, des néfliers, des frênes (en trogne), des pommiers, etc. D'autres espèces maraîchères (artichauts, brocolis), ou PPAM (Plantes à Parfum, Aromatiques et Médicinales) (coronille, thym), sont également présentes sur le rang. L'objectif est d'augmenter la biodiversité de la parcelle et de garder l'inter-rang disponible pour la récolte des olives.

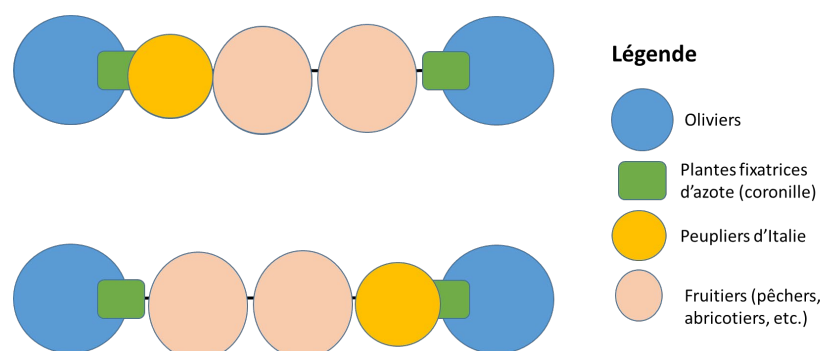


Figure 61 : Représentation schématique d'un système multistratifié à base d'oliviers

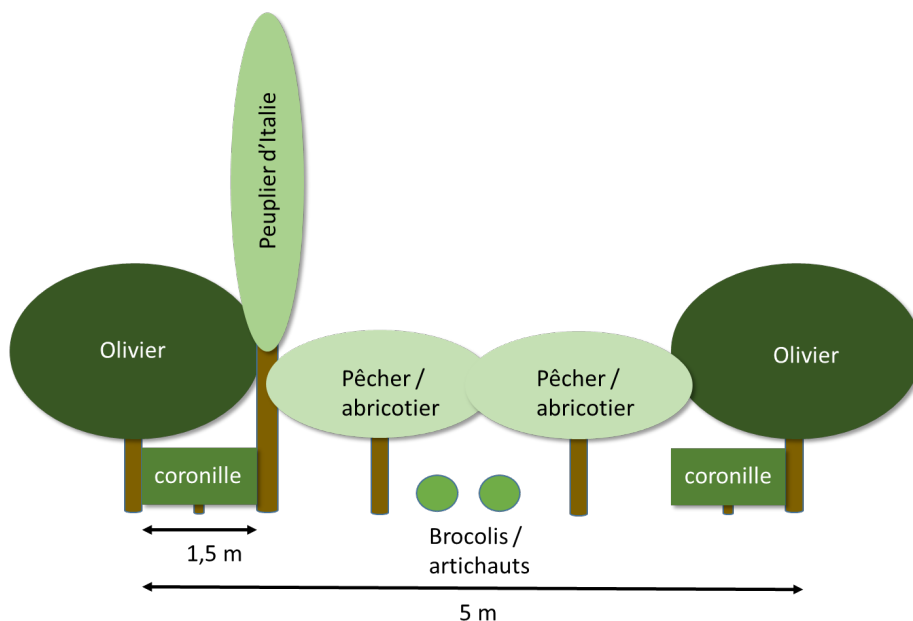


Figure 62 : Représentation schématique d'un système multistrate à base d'oliviers, représenté avec l'encombrement spatial

D) Les systèmes olivier - culture

D'autres producteurs ont, quant à eux, proposé de cultiver l'inter-rang entre les lignes d'oliviers. Pour répondre à la diminution de la fertilité des sols et réduire l'apport de fertilisant minéral, des producteurs ont proposé de semer des légumineuses (trèfle, luzerne, haricots, pois, etc.) (Figure 63). D'autres ont également proposé comme culture intercalaire le blé, la moutarde, etc. Certaines de ces cultures sont d'ores et déjà cultivées dans des oliveraies (Lauri et al., 2019).

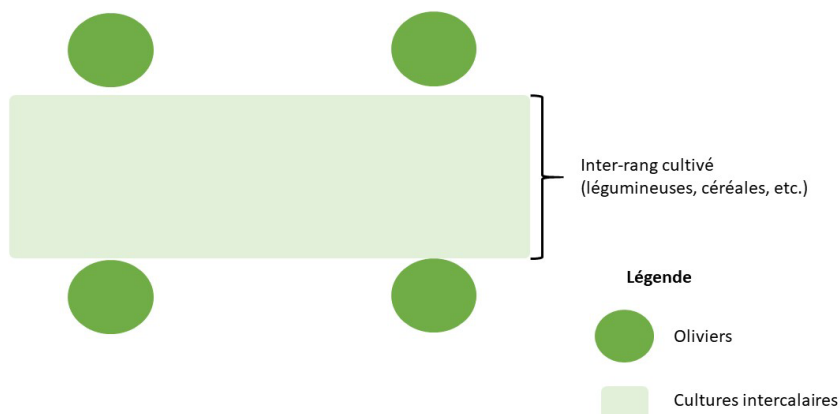


Figure 63 : Représentation schématique d'un système agroforestier co-conçu avec un producteur associant des oliviers avec une autre culture sur l'inter-rang

Un producteur a choisi de diversifier sa parcelle d'oliviers en y ajoutant d'autres espèces fruitières et des cultures intercalaires. Les oliviers sont plantés avec une densité de 12 x 12 m pour permettre le passage d'une moissonneuse-batteuse. Des cultures intercalaires en rotation sont implantées dans l'inter-rang, tandis qu'une autre espèce fruitière (notamment : prunier, pommier, poirier, pêcher, abricotier, cerisier, amandier) peut être ajoutée entre chaque olivier sur le rang.

Les cultures intercalaires éventuellement présentes sur l'inter-rang peuvent être : pomme de terre, framboisier, fraisier, artichaut, asperge, fève, oignon, poireau, vesce, tomate, courgette, aubergine, poivron, chou, persil, carotte, haricot, salade, cardon, céleri, radis noir, fenouil, poivre, agrume, phacélie, blé, seigle, etc. Pour une même espèce, différentes variétés sont plantées pour augmenter la diversité

intraspécifique de la parcelle. Les inter-rangs peuvent également accueillir des plantes ornementales telles que des rosiers, des glaïeuls, des fleurs de Lys, etc. Des rotations de cultures sont également effectuées.

Quatre sous-systèmes de culture ont été proposés avec une répartition spatiale différente des espèces (Figure 64, Figure 65, Figure 66 et Figure 67).

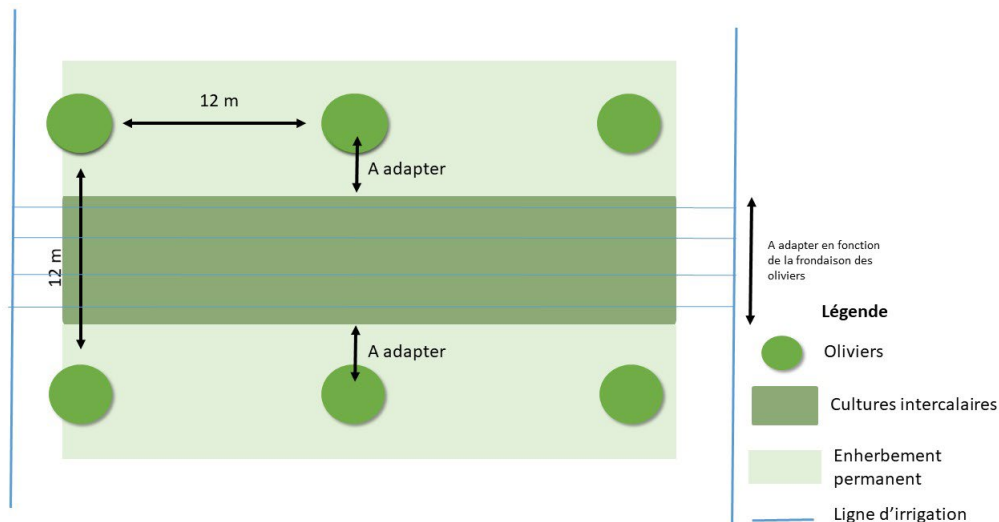


Figure 64 : Représentation schématique d'un premier sous-système de culture d'une oliveraie diversifiée

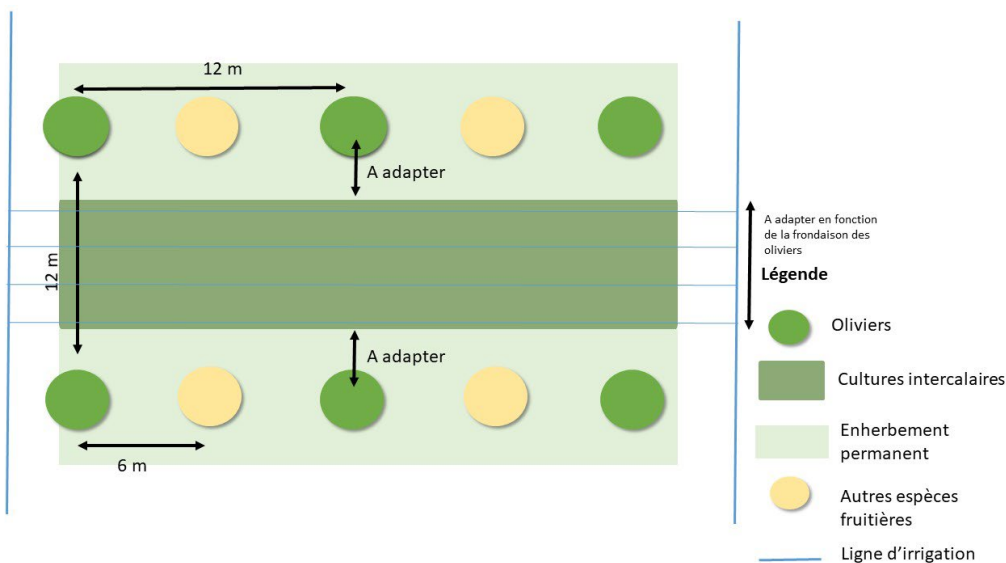


Figure 65 : Représentation schématique d'un deuxième sous-système de culture d'une oliveraie diversifiée

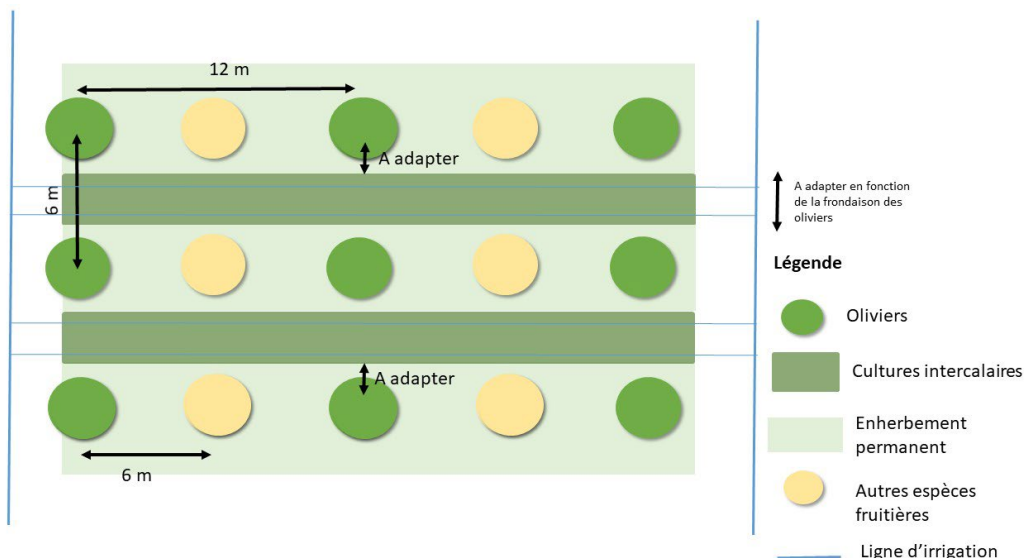


Figure 66 : Représentation schématique d'un troisième sous-système de culture d'une oliveraie diversifiée

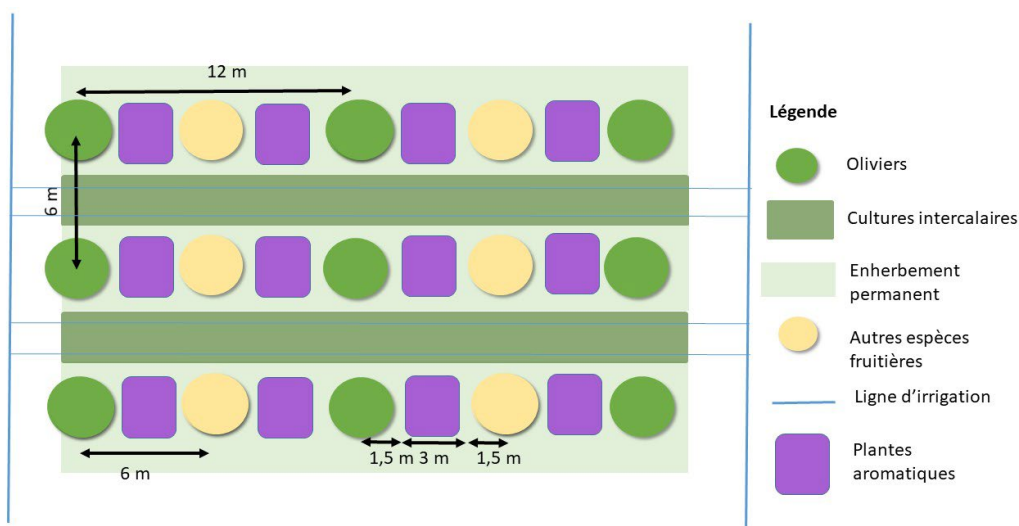


Figure 67 : Représentation schématique d'un quatrième sous-système de culture d'une oliveraie diversifiée (en cours d'adaptation)

E) Conclusions et perspectives

Les discussions menées auprès des producteurs d'olives ont permis d'identifier à la fois les contraintes auxquelles les producteurs sont confrontés et un certain nombre de systèmes innovants existants ou non (co-imaginés). Les principales difficultés rencontrées par ces producteurs incluent la rentabilité de leurs oliveraies, les coûts élevés de fertilisation et d'engrais minéraux, les ravageurs tels que la mouche de l'olivier, les problèmes d'infiltration d'eau dans le sol, le tassement et l'érosion des sols.

Pour répondre à ces défis, certains oléiculteurs ont proposé des systèmes diversifiés à base d'oliviers. Bien que la plupart de ces systèmes impliquent la diversification d'une oliveraie, certains comprennent également la diversification de vignobles et de prairie avec des oliviers.

Pour la diversification d'une oliveraie, trois zones peuvent éventuellement être diversifiées : sur le pourtour de la parcelle, sur le rang ou sur l'inter-rang. Sur le pourtour de la parcelle, des arbres de haut jet peuvent être plantés pour diversifier la parcelle et assurer la fonction de brise-vents. Sur le rang d'oliviers, des arbres fruitiers ou de la vigne sont généralement retrouvés, n'encomrant ainsi pas l'inter-

rang. En revanche, sur le rang, des espèces de légumineuses peuvent également être présentes et contribuer à la fixation d'azote. Sur l'inter-rang, diverses espèces peuvent être cultivées, comme des céréales, des espèces maraîchères ou des légumineuses. En culture pérenne, la vigne peut être retrouvée (Figure 68).

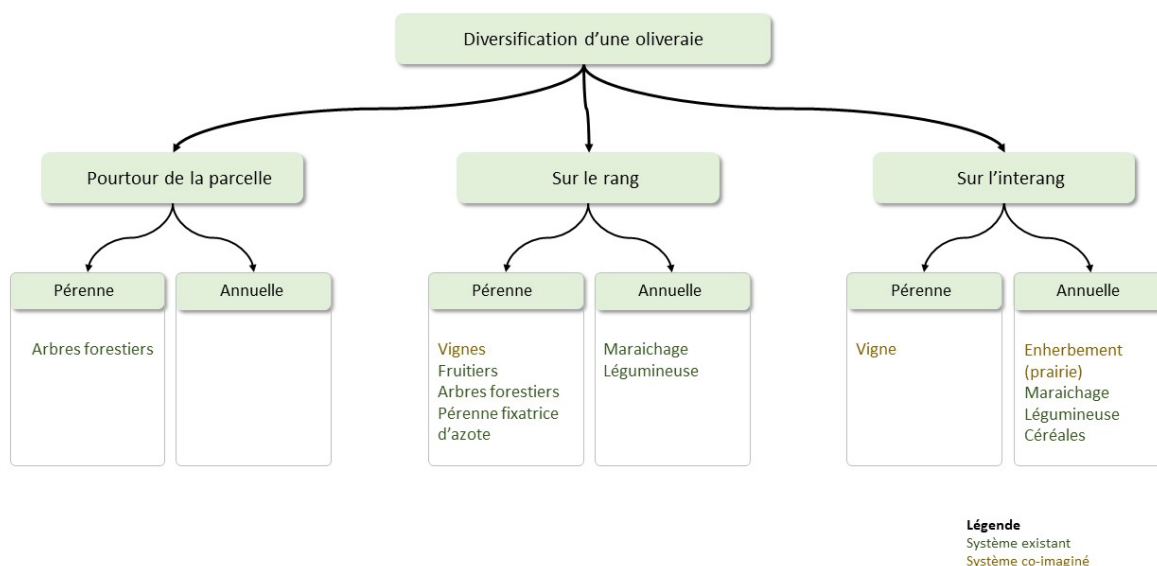


Figure 68 : Représentation schématique des options de diversification d'une oliveraie imaginées lors des discussions individuelles avec les oléiculteurs. Les systèmes sont soit déjà existants, soit uniquement conçus sur le papier (réflexion de diversification)

Pour conclure, ces discussions individuelles avec les producteurs du réseau ont permis : i) de favoriser l'engagement des acteurs dans notre démarche participative, ii) de comprendre leurs objectifs et leurs problématiques (repris dans la partie 2.A), iii) de découvrir des systèmes diversifiés à base d'oliviers ou d'imaginer avec eux d'autres options de diversification. Peu d'information sont disponibles sur ces systèmes diversifiés en matière de performances agronomiques et environnementales. Ces discussions ont permis d'engager les réflexions sur de tels systèmes et de dégager des systèmes innovants qui mériteraient d'être testés sur leurs performances agronomiques et environnementales.

2) Les résultats de l'atelier de co-conception

A) Le sous-groupe n°1 : les cultures de services

Ce sous-groupe a travaillé sur la diversification des oliveraies à partir de plantes de services, avec trois objectifs : i) augmenter la fertilité des sols, ii) augmenter l'infiltration de l'eau dans le sol, et iii) diminuer l'érosion des sols. La parcelle virtuelle considérée était une parcelle de Costière, avec une pente de l'ordre de 5%, avec un sol à dominance argileuse de 0.7 m de profondeur et un taux de cailloux de 30%. Le système oléicole diversifié proposé par les personnes est disponible ci-dessous (Figure 69 et Figure 70).

En amont de la plantation, des plantes de types « engrais vert » sont semées. Les oliviers sont plantés en quinconce et perpendiculairement à la pente avec une distance de plantation de 6 m × 6 m. Quelques oliviers pollinisateurs sont implantés en fin de rang pour optimiser la pollinisation. L'oliveraie est irriguée sur le rang. Les oliviers plantés sont de variété picholine avec une valorisation sous forme d'huile d'olive. Pour améliorer l'aération du verger et limiter certaines maladies fongiques notamment, un alignement de noisetier, laurier ou thym est réalisé dans le verger et contribue à laisser circuler plus

librement le vent. Du côté ouest et est de la parcelle, des haies composites sont plantées et composées d'arbres, d'arbustes et de petits fruits. Au nord et au sud de la parcelle, aucune haie composite n'est plantée. Sur l'inter-rang, un mélange de type « engrais verts » est semé annuellement. Ce mélange peut être composé de légumineuses (fêverole, trèfle, vesce) ou non (avoine noire, phacélie). Pour améliorer la structure le sol et augmenter l'infiltration de l'eau dans le sol, des plantes structurantes sont rajoutées, telle que le radis fourrager. Sur le rang, entre les oliviers, des plantes pérennes herbacées, telles que l'achillée millefeuille ou le lotier, sont semées.

Les oliviers sont irrigués en microaspersion pendulaire. Pour limiter la compétition hydrique entre les oliviers et les plantes de service, un ou des passages de rouleau FACA sont effectués chaque année. Le bois de taille est broyé dans le rang d'à côté, constitué d'un enherbement permanent.

Afin d'augmenter la régulation biologique et la biodiversité de la parcelle, des nichoirs et des gîtes à chiroptères sont installés.

La fertilisation du sol devrait être assurée par ces plantes de service. Quelques apports de grignons peuvent être effectués, notamment pour la potasse.



Figure 69 : Photographie du support de co-conception du système n°1

Système en Agriculture Biologique

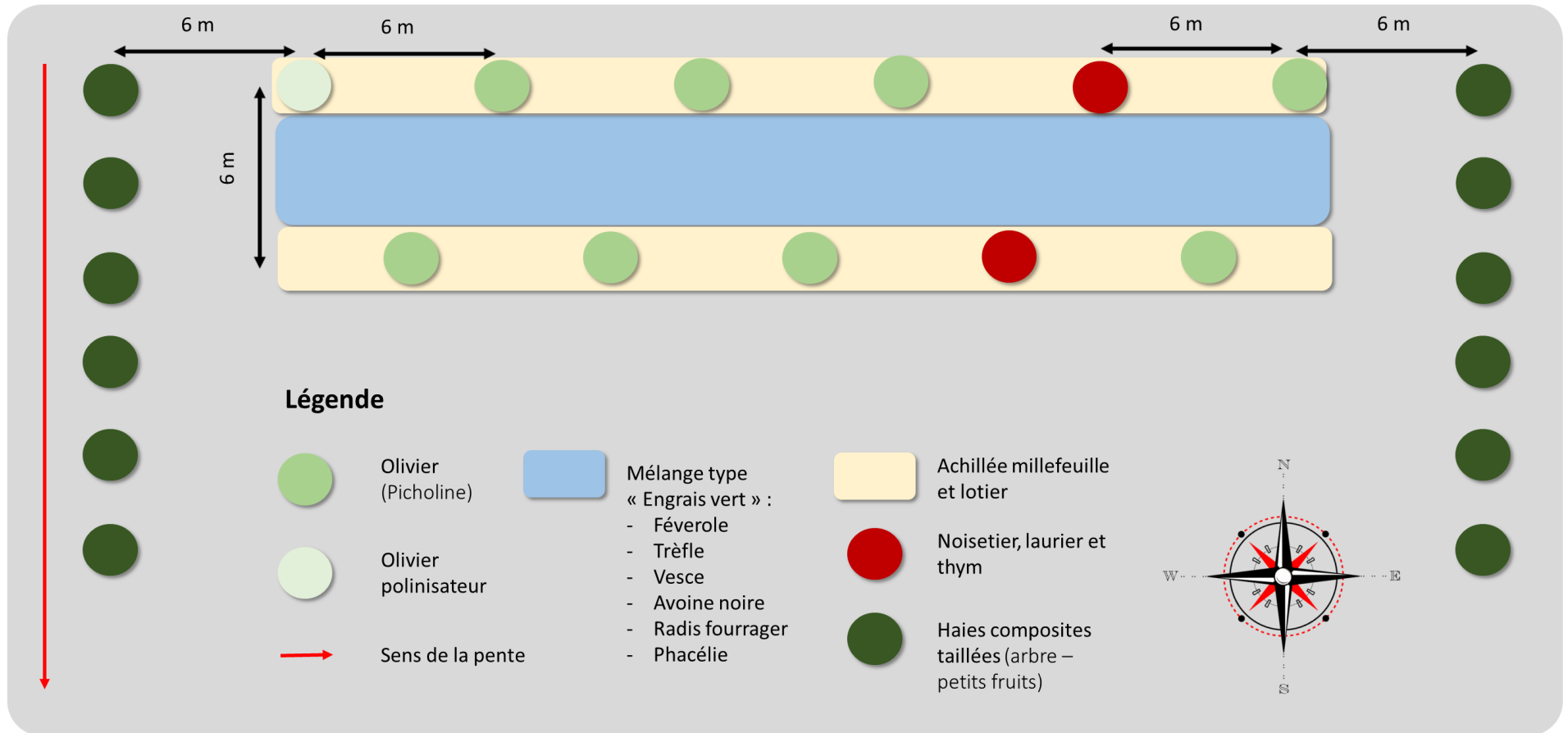


Figure 70 : Représentation schématique d'un système oléicole diversifié par des plantes de service et co-construits par les acteurs du sous-groupe n°1

Ce système sera adapté aux capacités de simulation du modèle Hi-sAFe dans la partie 7.1.A. La modélisation permettra de vérifier les hypothèses concernant les performances agronomiques et environnementales du système co-conçu, qui sont les suivantes : i) augmentation de la fertilité du sol, ii) augmentation de l'infiltration de l'eau dans le sol, iii) réduction de l'érosion des sols, et iv) augmentation du stockage de carbone dans le sol.

B) Le sous-groupe n°2 : les cultures intercalaires

Ce sous-groupe a travaillé sur la diversification de la production des oliveraies avec des cultures intercalaires, avec quatre objectifs : i) augmenter la fertilité des sols, ii) augmenter l'infiltration de l'eau dans le sol, iii) réduire l'érosion des sols, et iv) augmenter la productivité totale du système. La parcelle virtuelle considérée était une parcelle de plaine, sans pente, avec un sol à dominance limoneux-argileux de 1.5 m de profondeur.

Dans ce sous-groupe, l'objectif est de diversifier la production d'une oliveraie. La parcelle virtuelle utilisée est une parcelle de plaine au sol profond.

En début d'atelier, les personnes ont proposé des systèmes diversifiés sur des post-its. Les systèmes oléicoles diversifiés et la synthèse des discussions sont présentés dans le tableau ci-dessous (Tableau X). Suite à cette étape, les acteurs ont été invités à co-concevoir un unique système diversifié à base d'oliviers répondant aux quatre objectifs et sur la parcelle virtuelle proposée précédemment.

Tableau X : Systèmes oléicoles diversifiés proposés par les personnes du sous-groupe n°2

Espèce(s)	Agencement spatial/temporel	Remarques
Association olivier - vigne	Micro parcelles (2-3 rangs d'oliviers serrés, séparés par quelques rangs de vigne). Historiquement : 12 m d'écartement, avec deux rangs de vigne entre les rangs (récolte avec filets étendus à la main par terre).	Complémentarité du système racinaire (vigne en profondeur, olivier traçant).
Diversification avec d'autres cultures		
○ PPAM (lavande, verveine...)	6-7 m entre les rangs d'oliviers, uniquement pendant les 6-7 premières années => pas de récolte d'olives => pas de gêne. En 8 x 8 m, on peut mettre deux rangs de thym Autre possibilité : double rang d'oliviers pour libérer un espace plus large entre les paires de rangs.	Si olive de table, possibilité de poursuivre au-delà de la phase juvénile des oliviers car récolte sans filet. Dans la Drôme, il y a des parcelles d'oliviers + PPAM (Plantes à Parfum, Aromatiques et Médicinales)
○ Céréales (maïs, céréales à paille)		
○ Légumineuses (pois chiche, lupin)		Pois chiches se font beaucoup au Maroc car les pois-chiches se sèment tôt (idéalement semis après taille oliviers en avril, récolte avant récolte des olives). Lupin récolté mais ressemé facilement au moment de la récolte (exemple en Sardaigne avec lupin depuis plusieurs années sans effort véritable de travail du sol/semis)
○ Maraichage (fraise, salade)	Possibilité de conduire l'olivier en haie super intensive, pour libérer de la place pour le maraichage. Excès d'eau et d'azote ne sont dommageables qu'à certaines périodes. Si maraichage uniquement au printemps et début d'été : pas dommageable et l'olivier a de forts besoins en même temps. Eviter	Eviter cucurbitacées, solanacées : favorise la verticilliose (attention : irrigation pour les salades peut aussi favoriser la verticilliose). Il y a un exemple d'agriculteur vers Beaucaire qui fait du maraichage pendant les huit premières années : salade, épinards, etc. Pas de problème de verticilliose. Mais arrête

	automne : augmente risque de gel et de pourrissement des olives.	lorsque les arbres sont trop grands (six mètres entre oliviers).
○ Champignons	Sous oliviers très gros	
Association avec élevage		
○ Volaille (poule, dinde, canard)	Un lot = 90 jours => trois lots par an. Intéressant au moment du printemps pour contrôler l'herbe. Automne-hiver pour détruire les pupes de mouche de l'olivier.	Il y a un exemple d'agriculteur qui fait pâturer des canards sous des oliviers entre St come et Marvejols Attention à la réglementation / grippe aviaire : interdictions de plein air à certaines périodes
○ Ovins	Pâturage tournant obligatoire car si plus d'herbe, ils mangent l'olivier (et écorce)	Exemple au Mas de Félix, il y a un accord avec un berger tournant. A St André, il y a des moutons d'Ouessant qui pâturent sur 1.5 ha : petits moutons, l'olivier est plus haut.
○ Porcins		Attention, on ne peut plus passer en tracteur après les cochons : creusent trop le sol !

Ainsi, le système diversifié à base d'oliviers issu des discussions communes est disponible ci-dessous (Figure 71, Figure 72 et Figure 73). Le système est composé de deux phases en fonction de l'âge de l'olivieraie : i) phase n°1 : de la plantation à la 8^{ème} année, ii) phase n°2 : de 9^{ème} année à la fin de vie de l'olivieraie.

Les oliviers sont plantés avec une distance de plantation de 6 m × 6 m en quinconce sur deux rangs alternés par un rang de vigne de table (conduit en lyre).

Dans la 1^{ère} phase de développement des oliviers, des plantes maraîchères sont cultivées sur l'inter-rang entre les oliviers. Sur l'inter-rang, entre les oliviers et la vigne, des cultures PPAM sont cultivées. Les oliviers sont jeunes, la compétition pour les ressources devrait être très limitée et ne semble pas trop impacter les oliviers (Figure 72).

Dans la 2^{ème} phase de développement des oliviers, la croissance en volume des oliviers continue. Dans l'inter-rang entre les oliviers, des canards ou des poules pâturent l'enherbement permanent. Pour l'inter-rang entre les oliviers et la vigne, un couvert végétal est semé et entretenu (exemple : lupin) (Figure 73).

Les oliviers sont conduits traditionnellement et taillés classiquement. Le bois de taille est ensuite broyé. Le système d'irrigation gouttes à gouttes est placé sur le rang des oliviers. Pour les raisins de table, des variétés résistantes sont choisies. En revanche, pour le maraîchage, un point de vigilance demeure : les plantes des familles Solanacée, Cucurbitacées et Asparagacée ne sont pas recommandées, car elles peuvent favoriser le développement de la verticilliose.



Figure 71 : Photographie du support de co-conception du système n°2

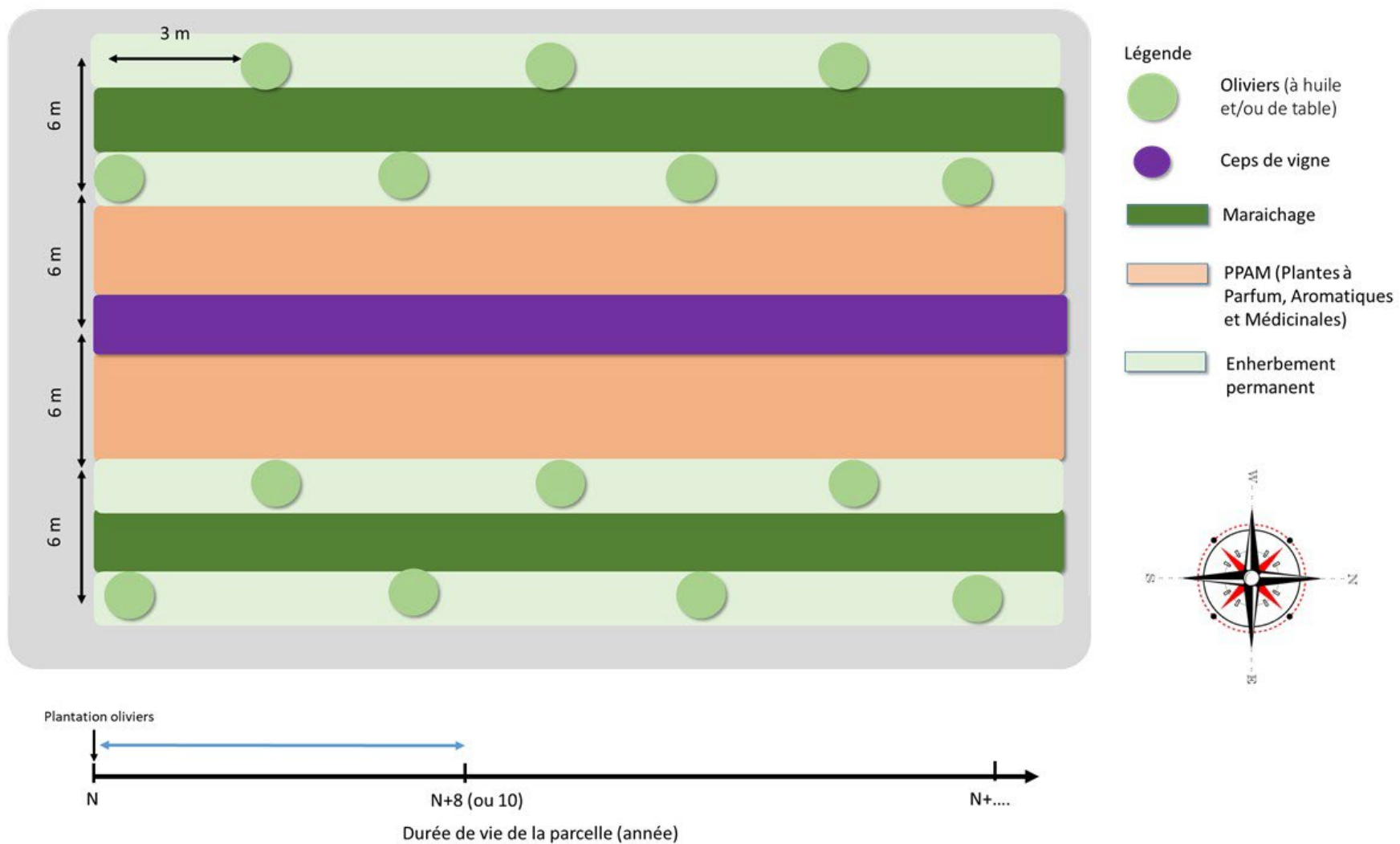


Figure 72 : Représentation schématique d'une première phase du système oléicole diversifié co-conçu par les acteurs du sous-groupe n°2

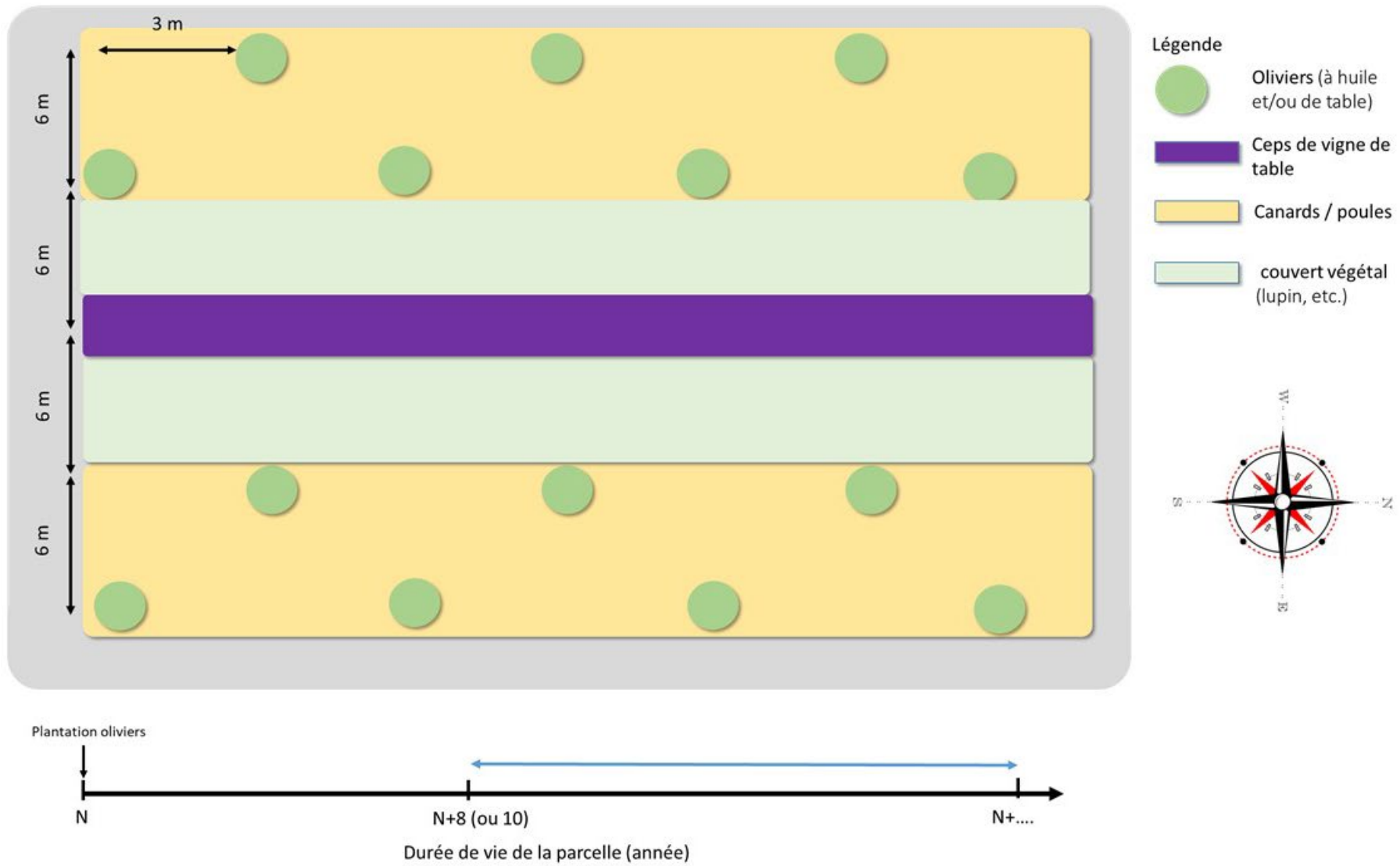


Figure 73 : Représentation schématique d'une deuxième phase du système oléicole diversifié co-conçu par les acteurs du sous-groupe n°2

Faute de temps, ce système n'a pas pu être adapté aux capacités de simulation du modèle Hi-sAFé.

C) Le sous-groupe n°3 : les cultures intercalaires

Le sous-groupe n°3 avait les mêmes objectifs de conception, et le même type de parcelle que le sous-groupe n°2 : diversifier la production d'une oliveraie. La parcelle virtuelle utilisée est une parcelle de plaine au sol profond.

En début d'atelier, les personnes ont proposé des systèmes biodiversifiés sur des post-its. Les systèmes oléicoles diversifiés sont présentés dans le tableau ci-dessous (Tableau XI). Suite à cette étape, les acteurs ont été invités à co-concevoir un unique système diversifié à base d'oliviers répondant aux quatre objectifs et sur la parcelle virtuelle proposée précédemment.

Tableau XI : Systèmes oléicoles diversifiés proposés par les personnes du sous-groupe n°3

Espèce(s)	Agencement spatial/temporel	Remarques
Association olivier-vigne	Inter-rang	Complémentarité des systèmes racinaires
Diversification avec d'autres cultures		
○ Arbres fruitiers	A la place de certains oliviers ou des alterner des rangs de différentes espèces	Pistachiers, figuiers, amandiers, etc.
○ PPAM (Plantes à Parfum, Aromatiques et Médicinales)	Inter-rang	Thym, romarin, lavande, etc.
○ Petits fruits rouge	Inter-rang	Framboisiers, etc.
○ Asperge	Inter-rang	
○ Tournesol	Inter-rang	
○ Pomme de terre	Inter-rang	
○ Immortelle	Inter-rang	
○ Plantes type « engrais verts »	Inter-rang	Luzerne, etc.

Ainsi, le système diversifié à base d'oliviers issu des discussions communes est disponible ci-dessous (photo et traduction en schéma PowerPoint) (Figure 74, Figure 75, Figure 76 et Figure 77). Il est composé de trois phases en fonction de l'âge de l'oliveraie : i) phase n°1 : de la plantation à la 5^{ème} année, ii) phase n°2 : de 6^{ème} année à la 10^e année, iii) phase n°3 : de la 11^{ème} année à la fin de vie de l'oliveraie.

Les oliviers sont plantés avec une distance de plantation de 6 m × 6 m. Quelques oliviers pollinisateurs sont implantés pour assurer la pollinisation croisée. Les lignes d'irrigation sont disposées sur les rangs des oliviers.

Dans la 1^{ère} phase de développement des oliviers, des asperges (durée de vie 10 ans ou plus) ou des artichauts (durée de vie 4 ans) sont cultivés sur l'inter-rang. Sur le rang entre les oliviers, des cultures au cycle court sont cultivées : fraise, salade, etc. Les oliviers sont jeunes, la compétition pour les ressources devrait être très limitée et ne pas trop impacter les oliviers (Figure 75).

Dans la 2^{ème} phase de développement des oliviers (d'une durée approximative de cinq ans), la croissance en volume des oliviers continue. Lors des tailles, le bois retiré est broyé dans les inter-rangs. L'une des solutions est de laisser en enherbement permanent un inter-rang sur deux pour tirer et broyer le bois d'oliviers sur cet inter-rang (Figure 76).

Dans la 3^{ème} phase de développement des oliviers, le volume des arbres est désormais important et la compétition pour les ressources est non négligeable. Les cultures sur le rang sont remplacées par des petits fruits rouges, de type framboisiers, etc. Sur l'inter-rang, une rotation est effectuée entre la culture

de blé et du pâturage avec des moutons. Lors de la taille des oliviers, le bois de taille est tiré et broyé dans l'inter-rang de pâturage (Figure 77).

Pour irriguer ce système de culture diversifié, de l'irrigation pendulaire (avec un rayon de 4 m) est utilisée. Un apport de 30 mm/24 h tous les sept jours durant l'été pourrait se révéler pertinent en fonction de la pluviométrie. Lors des 1^{ère} et 2^{ème} phases, la fertilisation du système est garantie par des amendements de matière organique et par l'apport d'engrais organique. Durant la 3^{ème} phase, la fertilisation est assurée par l'apport d'engrais organique. En fonction des résultats des analyses foliaires, un complément foliaire peut être apporté.

Les oliviers sont conduits en gobelet classique et maîtrisés par une taille traditionnelle éliminant les unités de production vieillissante et favorisant les unités de renouvellement. Le bois de taille est ensuite broyé. Sans culture, la gestion du sol est assurée par un enherbement spontané maîtrisé. La récolte peut être manuelle ou par vibrage du tronc.

Dans ce système diversifié, une attention particulière sera portée à la verticilliose et au *Fusarium* (maladie émergente) qui est potentiellement favorisée par des cultures de Solanacée et de Asparagacée.

Pour les ovins, la quantité de moutons dépend de la superficie de la zone à pâturer (pour indication, 50 moutons / 3 ha pendant trois mois).

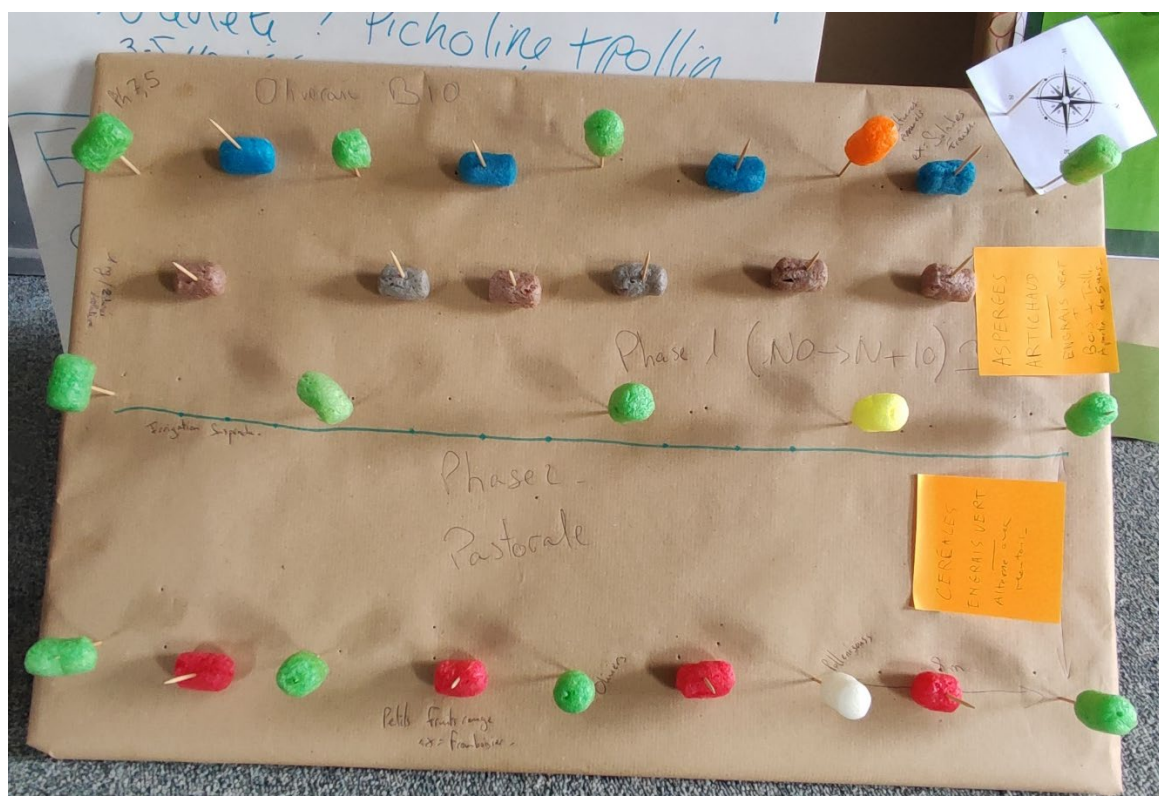


Figure 74 : Photographie du support de co-conception du système n°3

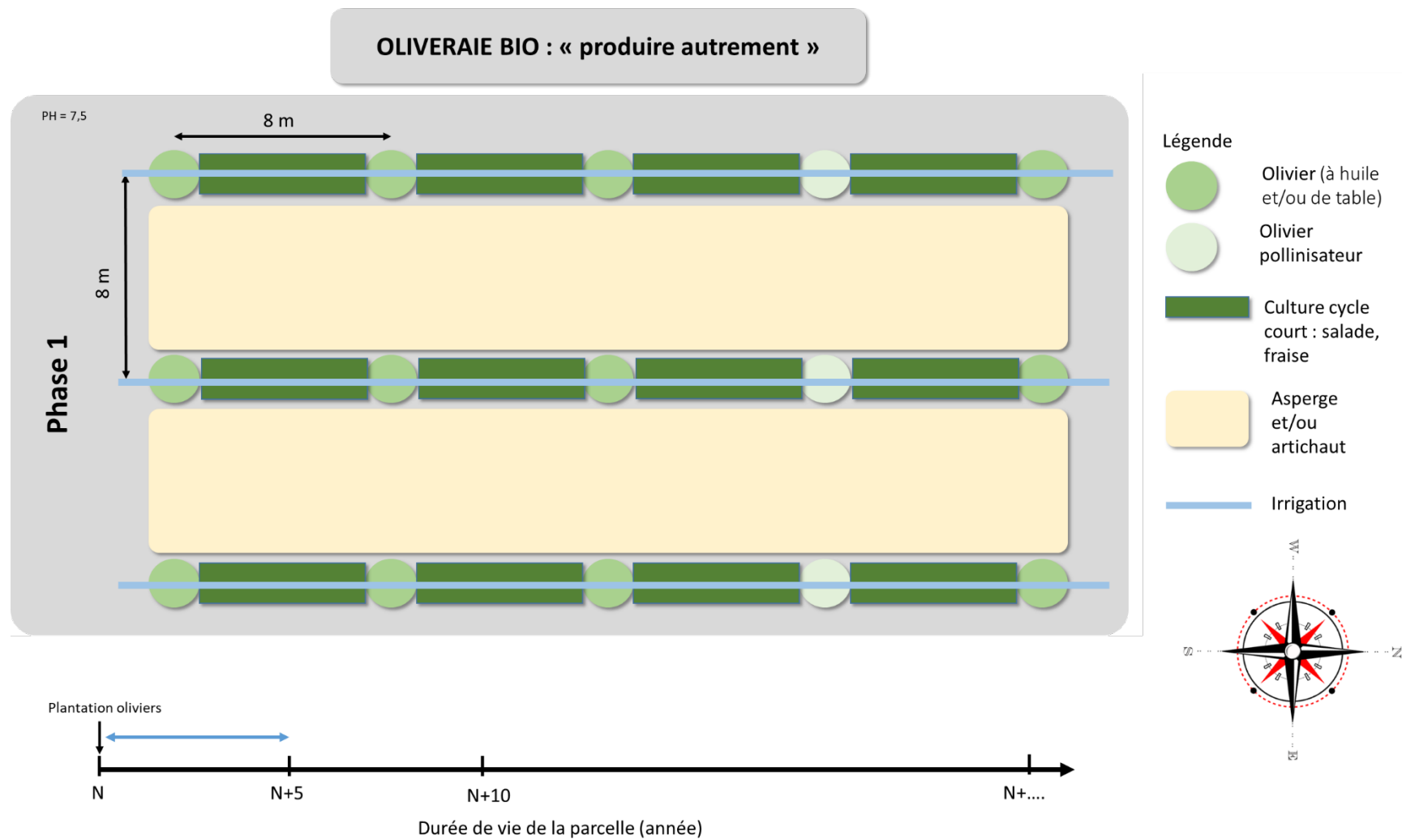


Figure 75 : Représentation schématique d'une première phase du système oléicole diversifié co-conçu par les acteurs du sous-groupe n°3

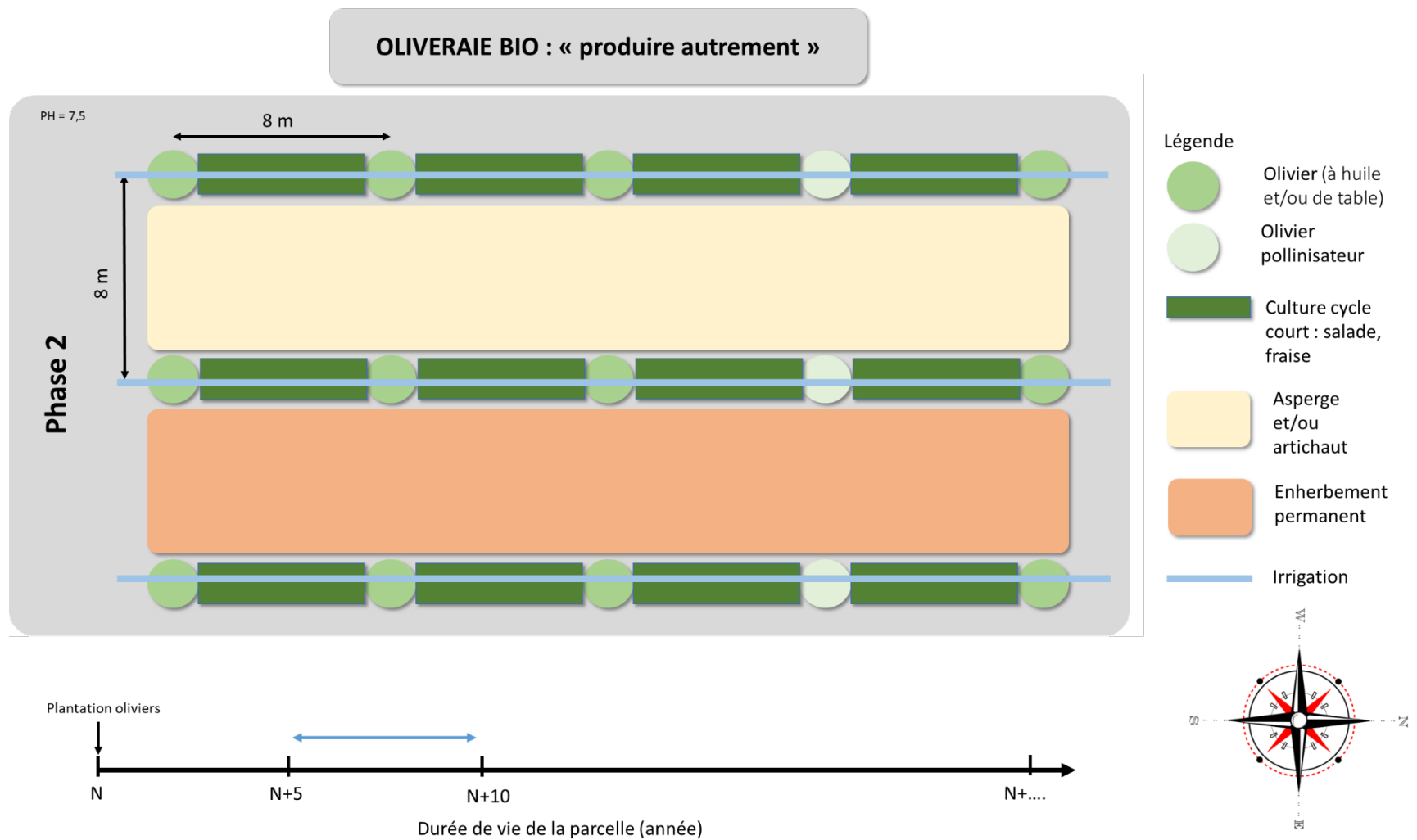


Figure 76 : Représentation schématique d'une deuxième phase du système oléicole diversifié co-conçu par les acteurs du sous-groupe n°3

OLIVERAIE BIO : « produire autrement »

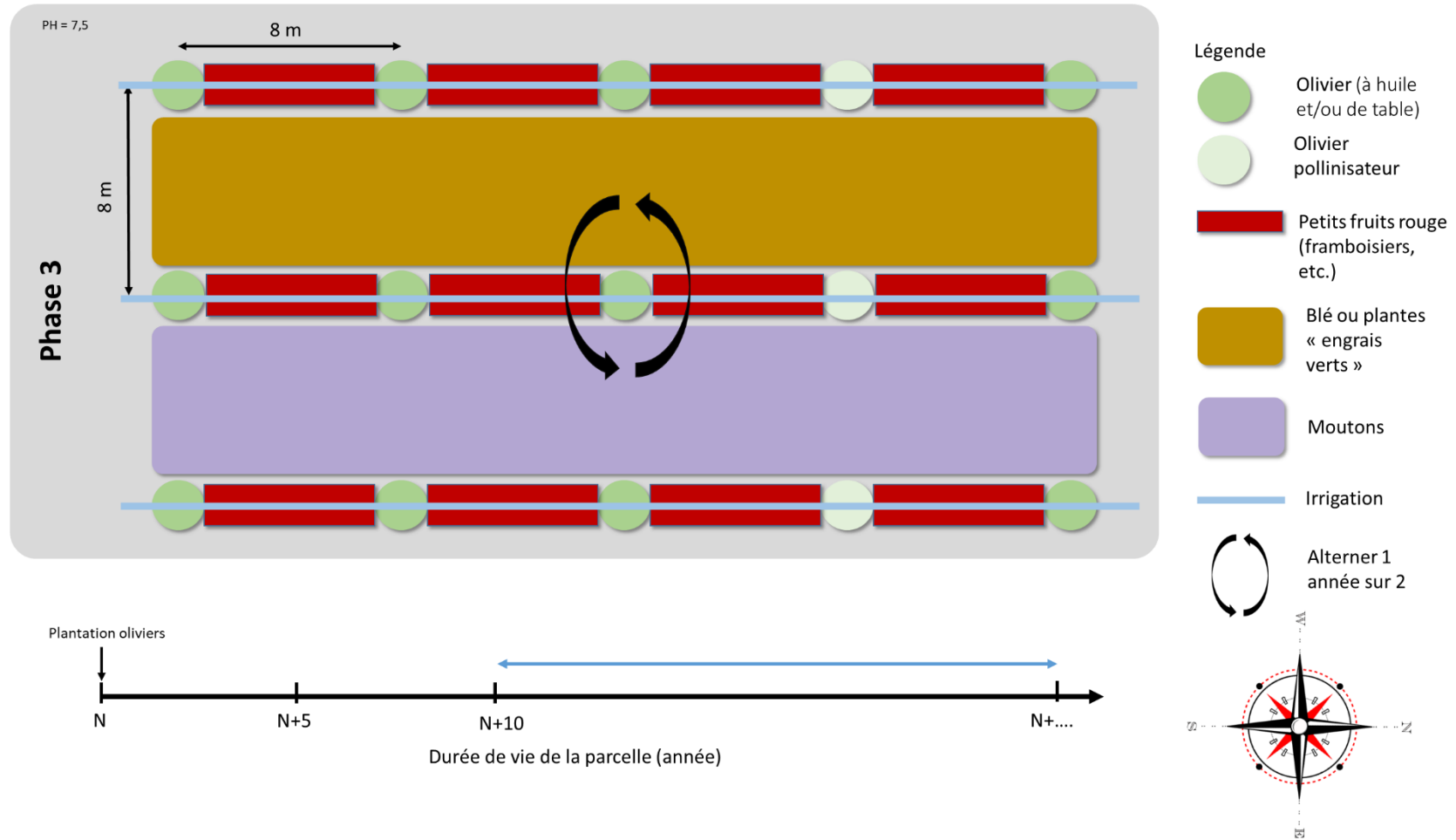


Figure 77 : Représentation schématique d'une troisième phase du système oléicole diversifié co-conçu par les acteurs du sous-groupe n°3

Ce système sera adapté aux capacités de simulation du système Hi-sAFe dans la partie 7.1.C. Son utilisation permettra de vérifier les hypothèses concernant les performances agronomiques et environnementales du système co-conçu, qui sont les suivantes : i) augmentation de la fertilité du sol, ii) augmentation de l'infiltration de l'eau dans le sol, iii) réduction de l'érosion des sols, et iv) augmentation de la productivité totale du système.

Bibliographie du chapitre 6

Lauri, P.-É., Barkaoui, K., Ater, M., Rosati, A., 2019. Agroforestry for fruit trees in Europe and Mediterranean North Africa, in: Burleigh Dodds Series in Agricultural Science. Burleigh Dodds Science Publishing, pp. 385–418. <https://doi.org/10.19103/AS.2018.0041.18>

Meynard, J.-M., Dedieu, B., Bos, A., 2012. Re-design and co-design of farming systems. An overview of methods and practices. Darnhofer Gibbon Dedieu B Eds Farming Syst. Res. 21st Century New Dyn. Springer Dordr. 405–429. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4503-2_18

Chapitre 7 : L'évaluation par modélisation des systèmes co-conçus par les acteurs

Le chapitre 7 se concentre sur l'évaluation des performances agronomiques et environnementales de systèmes agroforestiers à base d'oliviers dans le contexte climatique actuel.

Dans la première partie, les systèmes co-conçus par les acteurs sont adaptés aux capacités de simulation de la version 4.2 du modèle Hi-sAFe.

La deuxième partie du chapitre présente l'évaluation des performances agronomiques et environnementales de deux de ces systèmes : i) un système olivier – pois d'hiver et ii) un système olivier – rotation triennale (blé-orge-pois d'hiver) - laitue.

1) L'adaptation des systèmes co-conçus aux capacités de simulation du modèle Hi-sAFe

Au cours de l'atelier de co-conception, les participants ont laissé libre cours à leur imagination et à leurs connaissances pour concevoir des systèmes variés répondant aux objectifs de l'exercice, sans contrainte de rester dans une gamme de systèmes modélisables par le modèle Hi-sAFe. Ce choix a été effectué dans le contexte des quatre réunions de préparation de l'atelier de co-conception avec des chercheurs spécialisés en co-conception. Cette absence de contraintes en matière de choix des associations de culture, de répartitions spatiales et temporelles et d'opérations techniques sur les arbres et les cultures, fait que les systèmes co-conçus ne sont pas modélisables tels quels. Nous avons donc dû les adapter aux capacités de simulation du modèle Hi-sAFe.

A) L'adaptation du système n°1 (oliviers – légumineuses) co-conçu par les acteurs

Le système n°1 a été adapté pour répondre à son objectif principal, qui est d'augmenter la fertilité du sol. Pour simplifier la simulation, les arbres de haut jet ont été exclus, car leur diversité est limitée dans le modèle Hi-sAFe et leur effet attendu (réduire le vent) ne fait pas partie des processus simulés dans Hi-sAfe (la vitesse du vent est considérée comme une variable de forçage du modèle, sans rétro-action de la présence des arbres). De même, les couloirs de noisetier, laurier ou thym ne peuvent être représentés, car ces espèces ne sont ni paramétrées ni calibrées dans le modèle et leur effet attendu (favoriser la circulation de l'air) dans le système n'est pas représentable dans le modèle pour la même raison que précédemment. En ce qui concerne les cultures intercalaires, elles ont été sélectionnées à partir du modèle STICS. Toutefois, certaines cultures, telles que le lotier, l'achillée millefeuille, le trèfle, la vesce, la luzerne, l'avoine noire, le radis fourrager et la phacélie, sont indisponibles dans ce modèle.

L'adaptation du système aux capacités de simulation du modèle Hi-sAFe a été réalisée en se concentrant sur deux aspects : i) la répartition des oliviers dans le système en quinconce avec des densités de plantation, ii) la sélection des légumineuses pour les inter-rangs. Ainsi, la scène simulée par le modèle se compose de deux oliviers en quinconce, avec un enherbement permanent sur le rang des oliviers et du pois d'hiver sur les inter-rangs (seule espèce de légumineuse disponible dans le modèle). L'objectif de ce système à base de légumineuses est de déterminer si elle peut remplacer les apports d'azote minéral (Figure 78).

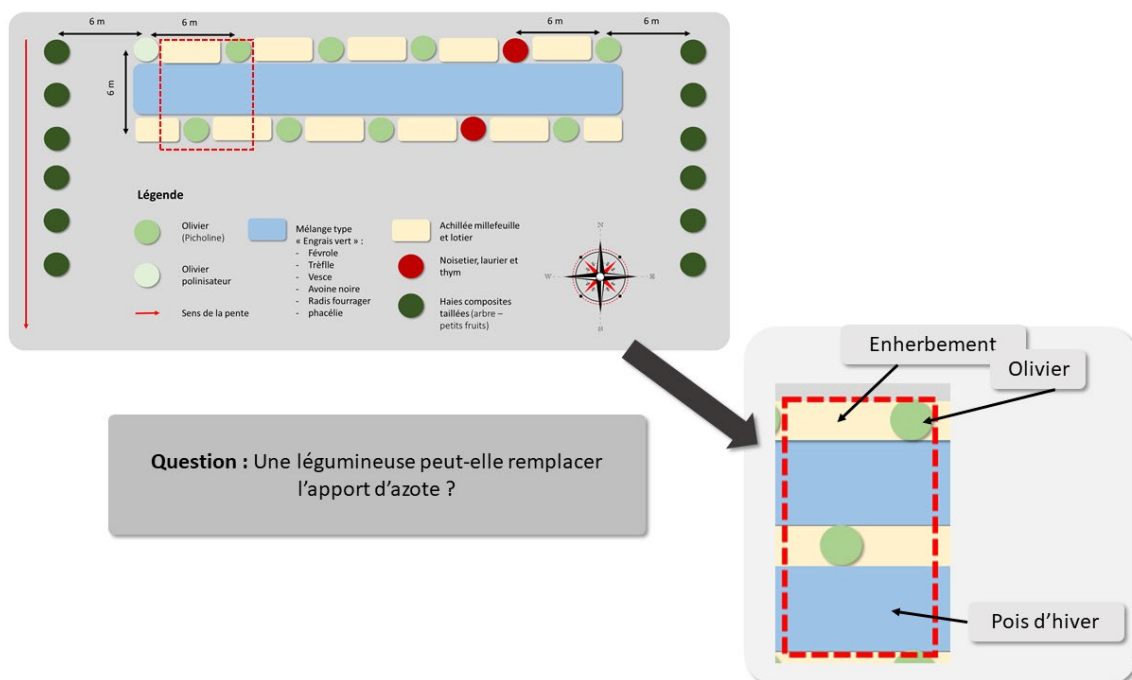


Figure 78 : Représentation schématique de l'adaptation du système n°1, co-conçu par les acteurs, aux capacités de simulation du modèle Hi-sAFe. Le système en haut est le système co-conçu suite à l'atelier de co-conception et le système en bas est le système adapté aux capacités de simulation de la version 4.2 du modèle Hi-sAFe (scène simulée)

B) L'adaptation du système n°2 (oliviers – cultures intercalaires – vigne) co-conçu par les acteurs

Ce système est actuellement en cours d'analyse et ne sera pas présenté dans le cadre de ce manuscrit de thèse.

C) L'adaptation du système n°3 (oliviers – cultures intercalaires sur l'inter-rang – laitues sur le rang) co-conçu par les acteurs

Le système n°3 a été adapté tout en conservant son objectif principal : augmenter la productivité totale du système tout en améliorant les performances environnementales. Dans Hi-sAFe, les cultures intercalaires sont simulées à l'aide du modèle STICS, mais certaines, comme les fraises, les asperges et les artichauts, sont indisponibles dans le modèle. De plus, le modèle ne prend pas en compte l'élevage, ce qui signifie que le pâturage avec les moutons n'est pas pris en compte.

L'adaptation du système aux capacités de simulation du modèle Hi-sAFe a été axée sur trois aspects : i) la répartition spatiale des oliviers dans le système avec les densités de plantation proposées, ii) la dynamique temporelle du système, iii) les rotations de culture. Ainsi, la scène simulée par le modèle se compose d'un olivier, avec des laitues sur le rang des oliviers et une rotation (blé, orge, pois d'hiver sur les inter-rangs) (Figure 79).

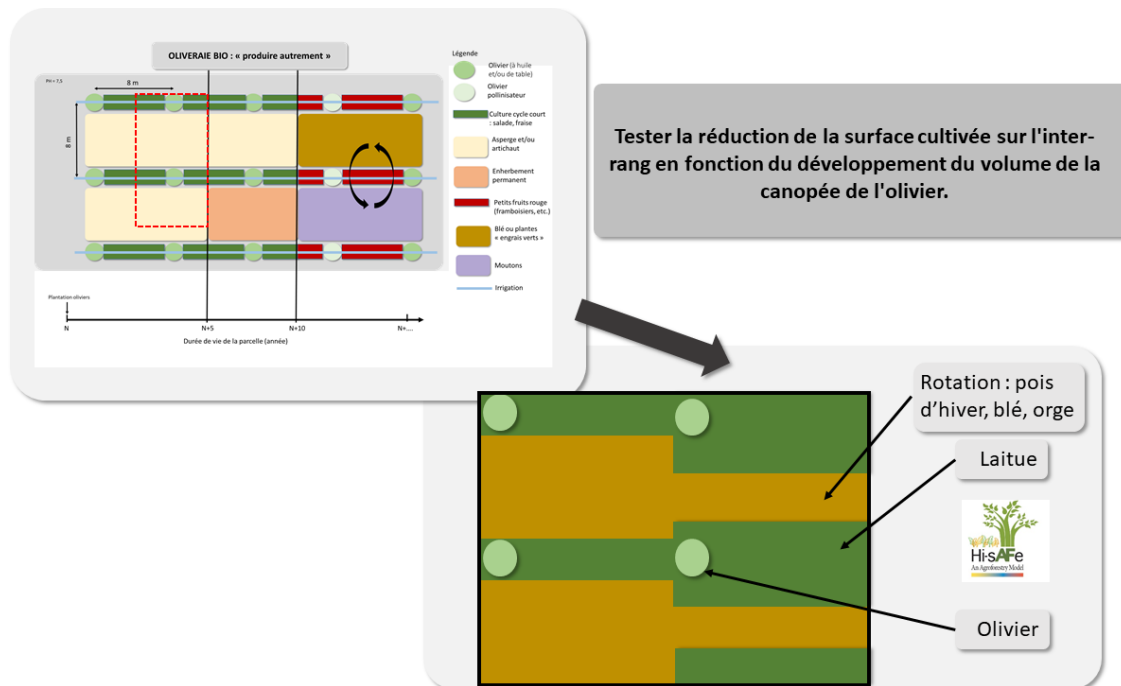


Figure 79 : Représentation schématique de l'adaptation du système n°3, co-conçu par les acteurs, aux capacités de simulation du modèle Hi-sAFe. Le système en haut est le système co-conçu suite à l'atelier de co-conception et le système en bas est le système adapté aux capacités de simulation de la version 4.2 du modèle Hi-sAFe (scène simulée)

2) L'analyse des performances agronomiques et environnementales des systèmes co-conçus sous climat actuel

A) Résumé de l'article

Dans cet article, les performances agronomiques et environnementales de deux systèmes co-conçus et adaptés aux capacités de simulation de la version 4.2 du modèle Hi-sAFe sont évaluées : un système olivier – légumineuse et un système olivier – culture intercalaire sur l'inter-rang – laitue sur le rang.

Pour évaluer chaque système avec le modèle Hi-sAFe, des expérimentations virtuelles sont réalisées, comprenant des modalités témoins et des modalités agroforestières.

Dans le système n°1 (olivier – légumineuse), trois modalités sont testées : i) oliveraie sans fertilisation, ii) oliveraie avec fertilisation, et iii) système olivier – pois d'hiver. Le système olivier – pois d'hiver présente des problèmes de compétition pour les ressources, les légumineuses ne satisfaisant pas pleinement la fertilisation. La compétition entraîne une croissance plus lente des oliviers et un rendement en olives réduit. De plus, le lessivage de l'azote augmente tandis que l'évaporation de l'eau du sol diminue. Par conséquent, la légumineuse (le pois d'hiver) ne permet pas de substituer totalement les apports d'engrais minéral.

Dans le système n°2 (olivier – culture intercalaire sur l'inter-rang – laitue sur le rang), trois modalités sont testées : i) oliveraie traditionnelle, ii) un système olivier – rotation (blé-orge-pois d'hiver) – laitue sans changement des surfaces cultivées, et iii) un système olivier – rotation (blé-orge-pois d'hiver) – laitue avec changement des surfaces cultivées. Ce système diversifié présente un rendement total de parcelle accru, avec un LER (Land Equivalent Ratio) proche de 2. Le Land Equivalent Ratio est un indicateur qui compare les rendements des cultures du système agroforestier en comparaison avec le rendement des cultures cultivées sur une parcelle en monoculture. Cependant, ce système dépend fortement de la fertilisation et de l'irrigation. Malgré cela, les systèmes diversifiés montrent une

diminution de l'évaporation d'eau du sol, mais une augmentation du lessivage et de la volatilisation de l'azote.

Ces résultats mettent en évidence à la fois les avantages et les limites des systèmes étudiés. Cette étude ouvre également de nouvelles perspectives de recherche, notamment en évaluant ces systèmes dans des conditions climatiques futures. Concernant le système combinant olivier - pois d'hiver, des essais avec d'autres espèces de légumineuses telles que le trèfle ou la vesce, qui présentent des besoins spatiaux et temporels différents, pourraient s'avérer intéressants. Pour optimiser la gestion de la ressource en eau, des tests pourraient être réalisés avec le système olivier – rotation des cultures - laitue en réduisant les apports d'eau et d'azote.

B) La première version de l'article (non soumis)

Towards sustainable olive production: exploring the performance of diversified olive-tree based systems using the Hi-sAFe agroforestry model

Review: COMPUT ELECTRON AGR or AGROFORESTRY SYSTEMS

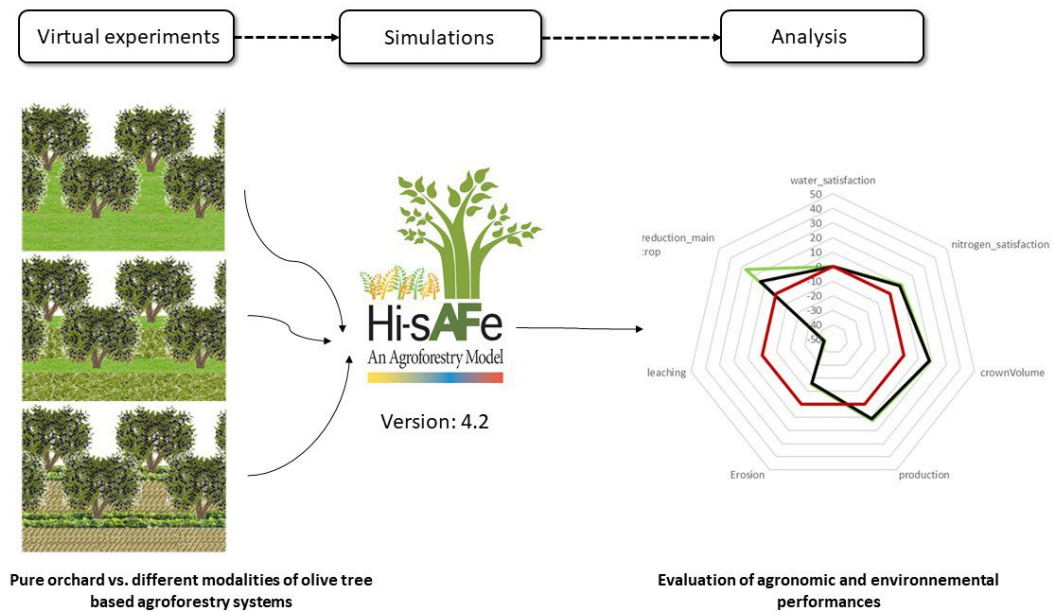
N. Barbault, C. Dupraz, P.E. Lauri, I. Lecomte, M. Gosme
ABSys, Univ Montpellier, CIHEAM-IAMM, CIRAD, INRAE, Institut Agro, Montpellier, France

nicolas.barbault@inrae.fr

Abstract

In olive orchards, agronomic and environmental challenges like nitrogen leaching and soil water evaporation were addressed through a co-design workshop. Two agroforestry systems were identified: i) olive-winter pea, and ii) olive-lettuce with a three-year rotation (winter pea, wheat, and barley). Virtual experiments using Hi-sAFe model assessed their performances over time. In system i, legumes did not fully compensate for fertilization, leading to water competition, delayed olive growth, reduced olive yield, and increased nitrogen leaching. However, soil water evaporation decreased. In system ii, diversification increased total yield (LER = 2) but depended heavily on fertilization and irrigation. Nitrogen leaching and nitrogen volatilization increased compared to a traditional olive grove, while soil water evaporation decreased. These findings highlight the potential benefits and challenges of adopting olive trees based agroforestry systems.

Graphical abstract



Keywords: olive tree, agroforestry, diversification, legumes, LER, performances

Acknowledgements:

First and foremost, we would like to express our sincere gratitude to the network of olive experts for their invaluable contribution in the co-construction of diversified systems based on olive trees. We would also like to extend our heartfelt thanks to Hélène Lasserre for sharing the soil description and technical itinerary.

Formatting of funding sources:

This work was supported by the Biodiversify project [European Union, PRIMA, 2020-2023]; and the Modolivier project [Fondation de France, 2020-2023].

Introduction

Regions that produce olives or olive oil exhibit a great diversity of cultivation systems, each with distinct characteristics. The three main systems are traditional, intensive, and super intensive. The traditional system is the oldest and most widespread, characterized by low planting density and low yields but often high-quality oil. The intensive system has a higher planting density and higher yields, but slightly lower oil quality. The super intensive system involves very high planting density and very high yields, but potentially lower oil quality, and presents a high risk of environmental degradation (Fernández-Escobar et al., 2013; Russo et al., 2016).

In addition to agronomic challenges, olive farming systems face environmental issues such as soil degradation (erosion, nitrogen leaching, etc.), loss of biodiversity in flora and fauna (Carpio et al., 2016; Gómez et al., 2009; Loumou and Giourga, 2003; Vanwalleghem et al., 2011).

To address these various environmental and agronomic issues, one solution could be diversified systems, including agroforestry systems (Daoui and Fatemi, 2014; Matson et al., 1997). This term is defined as a set of agricultural practices that combine trees with annual crops and/or livestock (den Herder et al., 2017; USDA Agroforestry Strategic Framework, 2019). This system can increase the total yield of the

plot (LER) while also reducing certain environmental problems. This optimization of space is based on a better understanding and control of three specific mechanisms: competition, complementarity and facilitation (Dupraz and Liagre, 2011; Jose et al., 2000). These systems that combine multiple species have advantages but also disadvantages. For example, the shade provided by trees can reduce the amount of light received by the underlying plants, whether grass, shrub or other tree, thus limiting their photosynthesis (Chirko et al., 1996) and modifying their architecture and fruiting potentials (Pitchers et al., 2021). Competition phenomena for resources, whether spatial or temporal, can also occur and lead to negative effects on the development and productivity of the system (Dupraz and Liagre, 2011).

Agroforestry systems mixing olive trees with various other fruit tree species, annual or perennial intercrops, and/or animals have a long tradition and are documented in literature (Smith, 2010). For instance, in the “Treaty of the Olive Tree” written in 1784 by Pierre Joseph Amoreux, combinations of olive trees with annual crops were mentioned (Amoreux, 1784). Other forms of combinations such as vine and olive tree have also been practiced (Lasserre and Barbault, 2022). Currently, agroforestry systems with olive trees are developed and combine olive trees with various crops such as cereals, vegetables, vines, flower bulbs, or livestock such as sheep or chickens (Lauri et al., 2019; Pantera et al., 2018, 2016; Paris et al., 2019; Warlop, 2016).

In the face of current challenges in olive farming systems, it is crucial to consider not only species choice but also their spatial and temporal arrangements, as well as their management, to benefit from their interactions and maximize the production of ecosystem services. Furthermore, it is essential to conduct thorough evaluations of agroforestry systems on both agronomic and environmental aspects to determine their sustainability compared to traditional olive farming systems. However, there is limited data on the long-term performance of these diversified systems, due to the fact that there is less research on diversified systems than on monocrops, and that the huge number of possible combinations of crop species, spatial and temporal arrangements make it impossible to test them all in the field. Modelling is a powerful tool to overcome this limitation as far as we have a minimum knowledge on how plants react to changes in the abiotic (light, water) and biotic (proximity of other plants). In this case, using mechanistic model, it is possible to test a much larger number of systems, in a shorter time, and at a much lower cost than in the field. This opens up the possibility to perform virtual experiments, where different modalities of systems, soils or climates can be systematically combined to explore their effects on any variable included in the model, including total yield, exploitation of water and mineral resources, fertilizer use, etc. Such evaluation could help identify the potential advantages (and also disadvantages) of diversified agroforestry systems.

We used this approach with the Hi-sAFe agroforestry simulation model to verify if diversified agroforestry systems based on olive trees improve the agronomic and environmental performances of the system compared to monospecific orchard. We tested two different agroforestry systems, one based on olive trees and winter peas, and the other based on olive trees, lettuce, and a three-year rotation (winter peas, wheat, and barley).

Materials & methods

1) The general approach

In order to answer questions that are relevant to olive growers, we based our simulation on systems that were co-designed by a group of olive experts (growers, agricultural advisers, and researchers) from the South of France during a co-design workshop held on June 8, 2021.

One subgroup aimed to co-design a diversified olive system with the goal of improving the system's fertility and reducing its dependence on mineral fertilizer inputs. The considered plot was situated on a hillslope, with a shallow soil depth and a rocky and poor fertility soil. The second subgroup worked on co-designing a diversified system with the goal of improving the overall production of the system while

enhancing environmental performances, in a deep, non-rocky, and fertile soil, with no slope. The co-designed systems are presented in supplementary material (appendix A and B).

To investigate the agronomic and environmental performance of the systems, the Hi-sAFe model was selected. Compared to other existing models, Hi-sAFe is the only agroforestry model capable of simulating olive-based agroforestry systems (Barbault et al., submitted).

However, prior to the simulations, the co-designed systems were adapted to the simulation capabilities of the system. Indeed, certain crops or spatial arrangements were not available in the model. Thus, for each co-designed system, we designed a virtual experiment that is able to address questions that came up during the co-design workshop, even if the system itself is not exactly the same as the co-designed system. In each virtual experiment, the reference system was a traditional olive grove with grass interrows. Figure 1 summarizes the general approach.

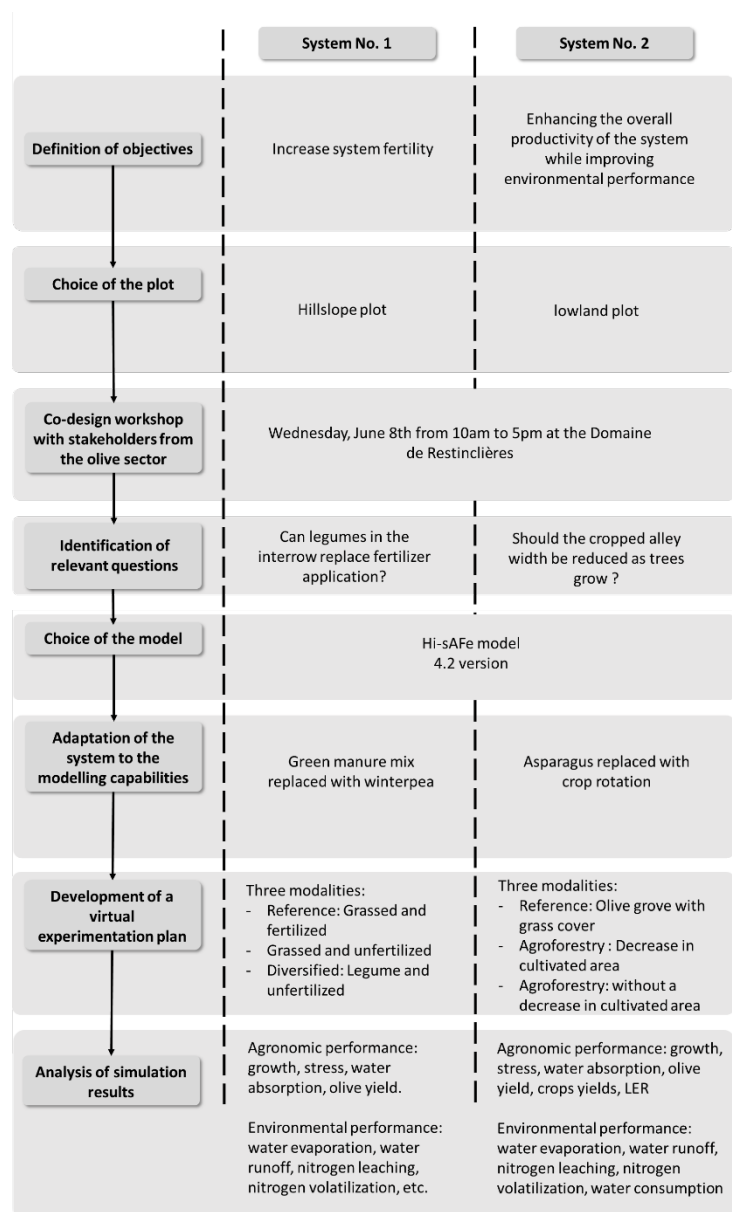


Figure 1: General approach used to explore the agronomic and environmental performances of diversified olive-based systems.

2) A focus on the agroforestry model Hi-sAFe

The Hi-sAFe model (Dupraz et al 2019) is a daily time-step agroforestry mechanistic model capable of simulating the development of trees and crops according to water, nitrogen, and light competition. This 3D model allows exploration of the system behaviour from plantation to end-of-life. The model consists of various input files, partially completed by the user. The model needs as inputs a climate database, as well as a description of the soil of the plot. The user then specifies the crops associated, whether trees or intercrops, with their technical itineraries. This input information allow the simulation of a scene (composed of one or more trees and one or more crops). The user can then launch the simulations with the Capsis platform (<https://www1.montpellier.inra.fr/wp-inra/hi-safe/>) and analyse the results (with Excel or the hisafer R package (www.github.com/kevinwolz/hisafer)). Numerous output variables are available concerning soil, trees, crops, etc. (Figure2).

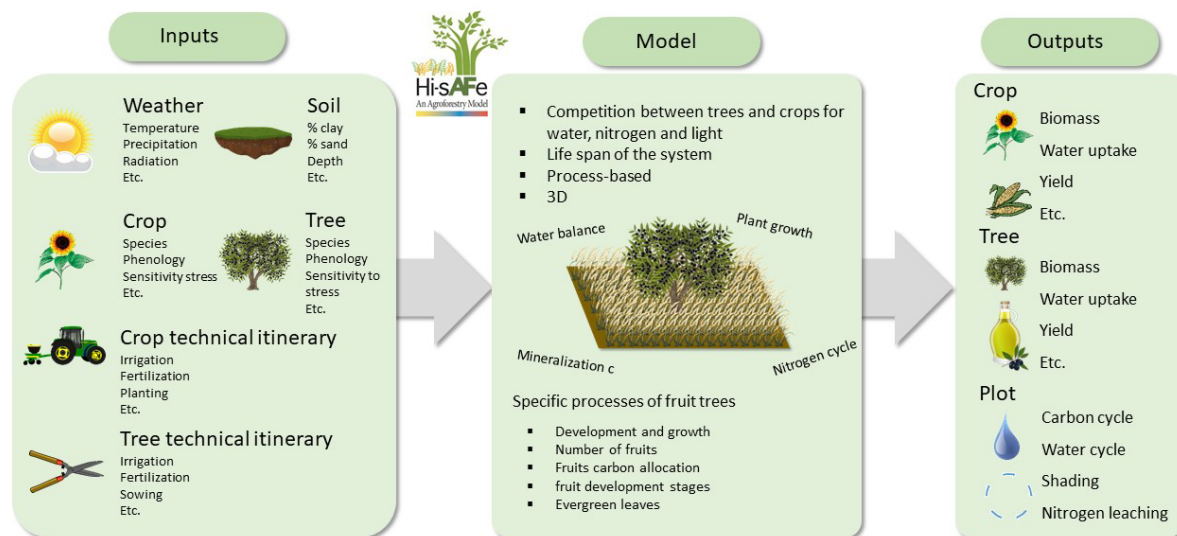


Figure 2: Schematic representation of the inputs and outputs of the agroforestry model Hi-sAFe.

This model provides an opportunity to explore different spatial arrangements, rotations, cultural practices, and other variables to evaluate the agronomic and environmental performance of agroforestry systems. Although not all crops are included in this model, it appears to be capable of addressing the research question related to the evaluation of agronomic and environmental performance of diversified systems based on olive trees. The model can be used to compare different spatial arrangements, rotations, and cultural practices in terms of agronomic and environmental performances.

3) The plans for virtual experiments

a) System 1: olive trees – winterpea

The simulated scene includes two olive trees planted in quincunx with 6 m between trees along the row and 5 m between tree rows, corresponding to a density of 167 trees/ha (Figure 3). Hi-sAFe's boundary conditions ensure that this pattern is replicated in all directions to represent a large orchard. The virtual experiment comprises three treatments: i) Reference: Grassed and fertilized (G_N+), ii) Grassed and unfertilized (G_N-), iii) Diversified: Pea and unfertilized (P_N-) (Table I). Only crop species, soil management and application of fertilizers vary in this virtual experiment.

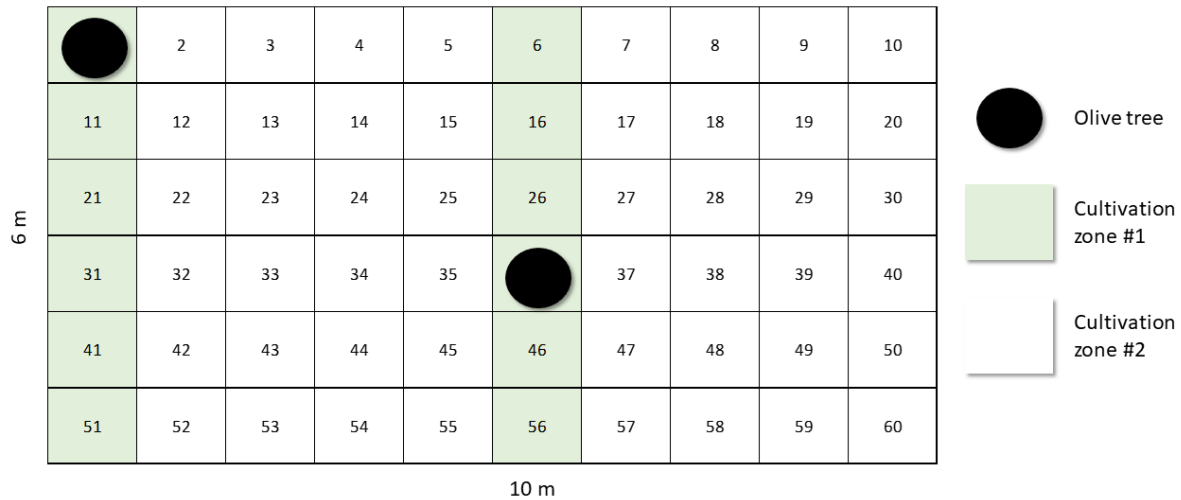


Figure 3: Scene simulated by the Hi-sAFe model for the olive tree-legume experiment. Depending on the virtual experimental design, the spatial arrangement of crops varies. The scene is comprised of multiple cells, and each number corresponds to a cell within the simulated scene.

Table I: Virtual experimental design to test the agronomic and environmental performances of olive - legume systems.

Systems	Cultivation zone 1	Cultivation zone 2	Fertilisation	Tillage
P_N-	Grass	Winter pea	None	No
G_N-	Grass	Grass	None	No
G_N+	Grass	Grass	80 Kg/ha	Yes

The system was simulated on a hillslope plot characterized by low soil depth (0.7 m) and low fertility (C/N ratio of 19). The soil, composed of 15% stones, contains 0.97% organic matter and the texture is 22% sand, 40% clay and 40% limestone. The climatic data that was used for the simulation was collected between 1994 and 2018 at the Restinclières Domain (north of Montpellier). In the simulations, pruning was performed on the olive trees (cut back from 4.5 m height to 3.70 m on the row and inter-row).

The reference system (G_N+) is a grassed, non-irrigated orchard fertilized with ammonium sulphate. Fertilization was applied every year in three applications: 30 kg/ha on April 10, 30 kg/ha on June 14, and 20 kg/ha on June 30. In the G_N- treatment, no fertilization is applied. In the "P_N-" treatment, winter pea is sown every year on December 10 at a density of 72 seeds/m² and cut before being returned to the soil on May 5.

b) System: olive trees - lettuce - rotation (winter pea, barley, wheat)

The simulated scene includes only one olive tree to represent a square pattern of plantation. The scene is 8 x 8 m, corresponding to a tree density of 156 trees/ha (Figure 4). The virtual experiment comprises three treatments: i) Reference: Olive grove with grass cover (G), ii) Agroforestry: olive trees associated with lettuce on 1 m width and arable rotation (Pea-Wheat-Barley) on 7 m width (L1R7), iii) Agroforestry with a decrease in inter-row area: olive trees associated with lettuce on 1 m at the beginning and then 3 m after 9 years (L1/3R7/5). In this experiment, only the crops (along with their technical itineraries) in the three zones changed (Table II).

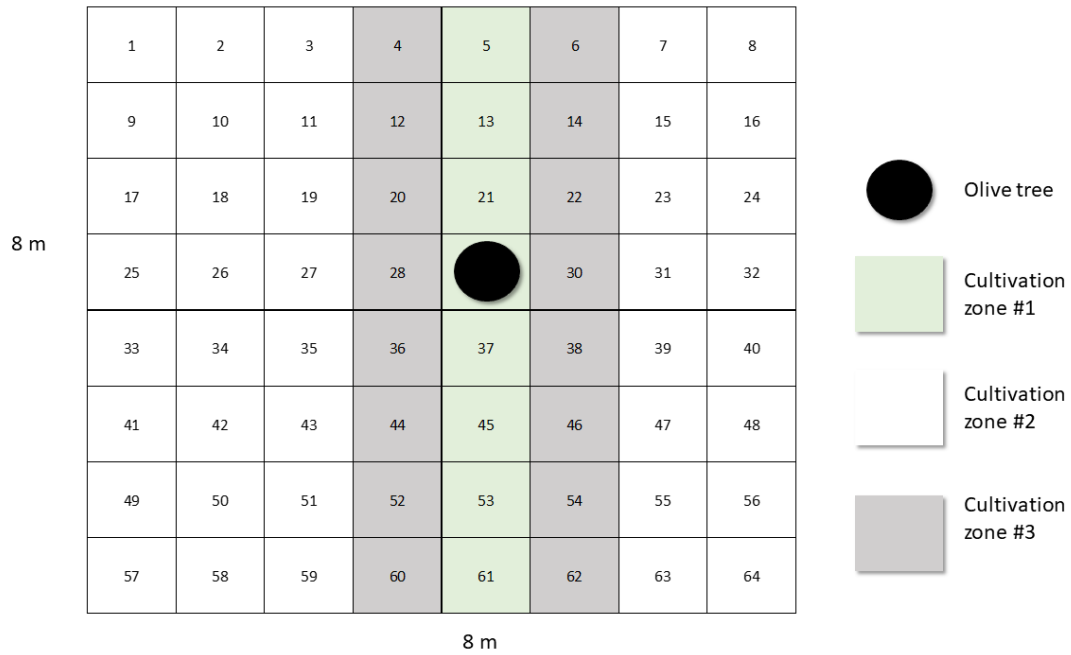


Figure 4: Scene simulated by the Hi-sAFe model. Depending on the virtual experimental design, the spatial arrangement of crops varies. The scene is comprised of multiple cells, and each number corresponds to a cell within the simulated scene.

Table II: Virtual experimental design to test the agronomic and environmental performances of olive trees - lettuce - rotation (winter pea, barley, wheat).

Systems	Cultivation zone 1	Cultivation zone 2	Cultivation zone 3
G	Grass	Grass	Grass
L1R7	Lettuce	Crops rotation	Crops rotation
L1/3R7/5	Lettuce	Crops rotation	Crop rotation -> Lettuce

The system was simulated on a flat plot characterized by deep soil depth (2.4 m) and high fertility (C/N ratio of 11). The soil, composed of 13% stones, contains 1.2 % organic matter and is composed of 48% sand, 17% clay, and 28% limestone.

The climatic data used were collected between 2002 and 2021 at the INRAE Domain (Mauguio). In the simulations, pruning was performed on the olive trees (cut back from 3.2 m height to 2.2 m on the row and inter-row).

The control is a grassed, non-irrigated orchard and fertilized with ammonium sulphate. Fertilization is applied every year in three applications: 30 kg/ha on April 10, 30 kg/ha on June 14, and 20 kg/ha on June 30. In agroforestry treatments, a three-year crop rotation is implemented in the inter-row area, consisting of winter pea, wheat, and barley. Between each crop, spontaneous vegetation is allowed to grow. On the tree row, the farmers wanted to test the cultivation of lettuce. Fertilisation and irrigation were applied to the lettuce area, according to the needs of the crop, and the inter-row area was fertilized according to the needs of the crop for wheat and barley (but not for pea).

4) Statistical analysis

To compare the output variables among different modalities, statistical analyses were performed. Initially, if the assumptions of normality of data and homogeneity of variances were met, an ANOVA

was conducted. Subsequently, a post-hoc test, such as the Tukey test, was performed. If the assumptions of ANOVA are not met, a Kruskal-Wallis test is used, followed by a Dunn's post-hoc test.

Additionally, an annual Land Equivalent Ratio (LER) (Equation 1) and a total LER are calculated for the two agroforestry systems (L1R7 and L1-3R7-5 systems)(Equation 2).

Equation n°1

$$LER_{AFS\text{-annual}} = LER_{AFS\text{annual-olive tree}} + LER_{AFS\text{annual-crops rotation}} + LER_{AFS\text{annual-lettuce}}$$

$$LER_{AFS\text{annual-olive tree}} = \frac{\text{AFS yield of olive tree}}{\text{Control yield of olive tree}}$$

$$LER_{AFS\text{annual-crops rotation}} = \frac{\text{AFS yield of crops rotation}}{\text{Control yield of crops rotation}}$$

$$LER_{AFS\text{annual-lettuce}} = \frac{\text{AFS biomass of lettuce}}{\text{Control biomass of lettuce}}$$

Equation n°2

$$LER_{AFS\text{-total}} = LER_{AFS\text{-olive tree}} + LER_{AFS\text{-crops}} + LER_{AFS\text{-lettuce}}$$

$$LER_{AFS\text{total-olive tree}} = \frac{\sum_{1996}^{2014} \text{AFS yield of olive tree}}{\sum_{1996}^{2014} \text{Control yield of olive tree}}$$

$$\begin{aligned} LER_{AFS\text{total-crops}} &= \left(\frac{1}{3} \times \left(\frac{\sum_{1996}^{2014} \text{AFS yield of winter pea}}{\sum_{1996}^{2014} \text{Control yield of winter pea}} \right) \right) \\ &+ \left(\frac{1}{3} \times \left(\frac{\sum_{1996}^{2014} \text{AFS yield of durum wheat}}{\sum_{1996}^{2014} \text{Control yield of durum wheat}} \right) \right) \\ &+ \left(\frac{1}{3} \times \left(\frac{\sum_{1996}^{2014} \text{AFS yield of barley}}{\sum_{1996}^{2014} \text{Control yield of barley}} \right) \right) \end{aligned}$$

$$LER_{AFS\text{total-lettuce}} = \frac{\sum_{1996}^{2014} \text{AFS biomass of lettuce}}{\sum_{1996}^{2014} \text{Control biomass of lettuce}}$$

Results

1) System: olive trees – legumes

a) Agronomic performance

The agronomic performances of the different systems are assessed by considering the development of olive trees, biomass of pea, and olive yield. Note that in this experiment, the pea was used as green manure and was not harvested.

In the model, several output variables are used to assess tree growth, such as total leaf area, canopy volume, height, row width, and inter-row width, DBH, root length etc. The different modalities have a consistent impact on all of these variables. For example, Figure 5 shows the effect on crown volume, height and total root length. In the reference modality (G_N+), olive trees exhibit greater growth compared to the other modalities. In the diversified system (P_N-), olive trees show intermediate growth between those in the reference system and those in the herbaceous and non-fertilized system (G_N-). The analysis of the olive tree root system in the different modalities includes several output variables,

including total root length and the ratio of shoots to roots. Olive trees in the diversified modality with a leguminous crop exhibit greater root length in the early years following planting compared to olive trees in the other two modalities (until 2000). The more pronounced development of the root system in the diversified system in the early years highlights a higher water stress and a greater allocation of carbon to the root system to compensate for this water constraint.

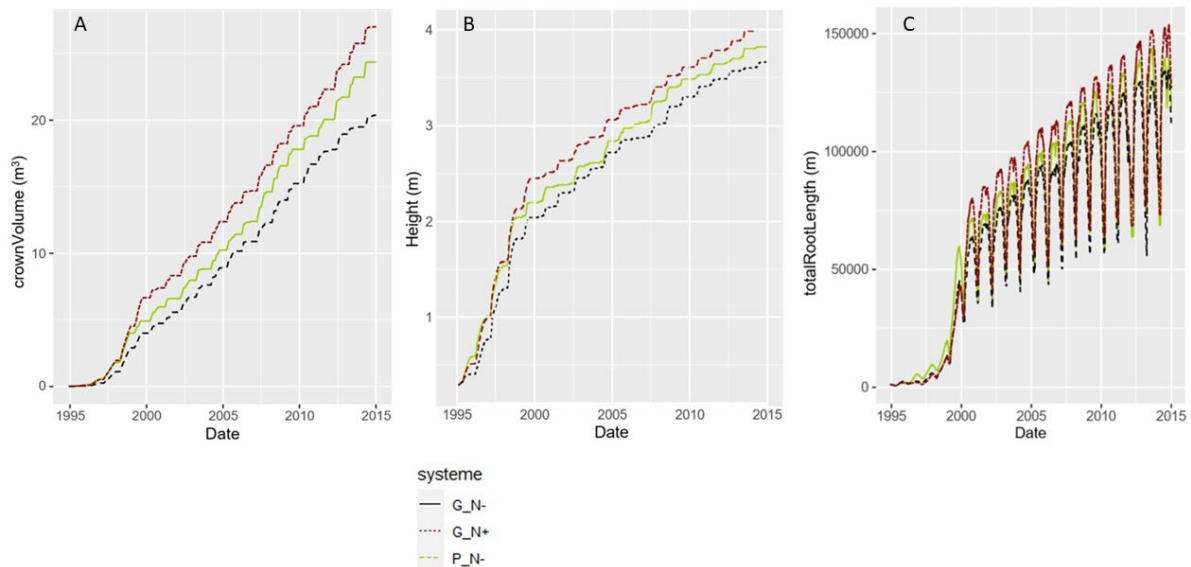


Figure 5: Growth dynamics of olive trees across different modalities. A) Growth dynamics of canopy volume. B) Growth dynamics in height. C) Growth dynamics of root length. G_N+ corresponds to the reference system where olive trees are fertilized. G_N- corresponds to the reference system where olive trees are not fertilized, and P_N- corresponds to the system based on winter peas and not fertilized.

The tree water stress index is also analyzed (Figure 6A and 6B). Olive trees in a diversified system experience a higher water stress, especially in the early years, compared to olive trees in other systems. A closer examination of the stress index at daily time step during the years 1999 and 2000 reveals that this stress increases, particularly in May and June. There appears to be a significant water competition between olive trees and winter pea, which limits the growth of the olive trees. In all modalities, olive trees also exhibit significant nitrogen stress (figure 6C and 6D), leading to delayed development and growth of the tree. Starting from the 2000s, this nitrogen stress decreases significantly for all three modalities (figure 7C). However, in the diversified system, olive trees show a less pronounced nitrogen stress compared to fertilized olive trees in the reference system, and obviously to the unfertilized trees with grass in the inter-row.

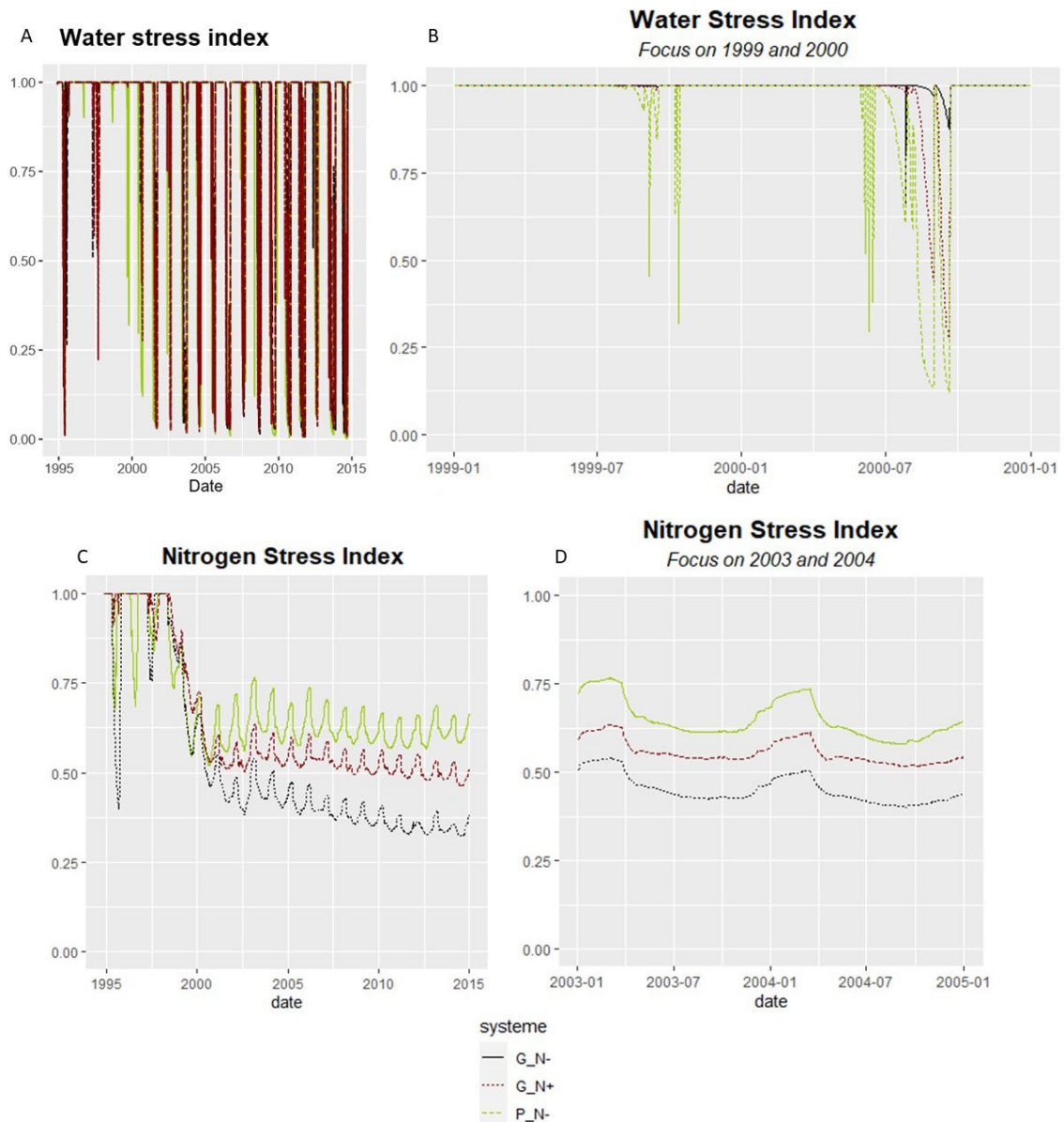


Figure 6: Dynamics of water (A and B) and nitrogen stress (C and D) index across different modalities. The water and nitrogen stress index varies from 1 to 0, representing the absence of water stress for 1 and extreme stress for 0. G_N+ corresponds to the reference system where olive trees are fertilized. G_N- corresponds to the reference system where olive trees are not fertilized, and P_N- corresponds to the system based on winter peas and not fertilized.

To further explore this water competition between olive trees and crops, the dynamics of water demand and absorption of the crops are analyzed (Figure 7). The water consumption dynamics differ significantly between the permanent vegetation cover (grass) and winter pea. Winter pea appears to consume three times more water than the permanent vegetation cover alone (Figure 8). This high water consumption by winter pea leads to significant competition for this valuable resource. The olive tree, due to this water competition, experiences greater stress, resulting in reduced development and growth. These two species, in shallow soil conditions, do not seem to be complementary. To mitigate this competition, the olive tree develops a slightly deeper root system, but it is quickly limited by the shallow soil depth.

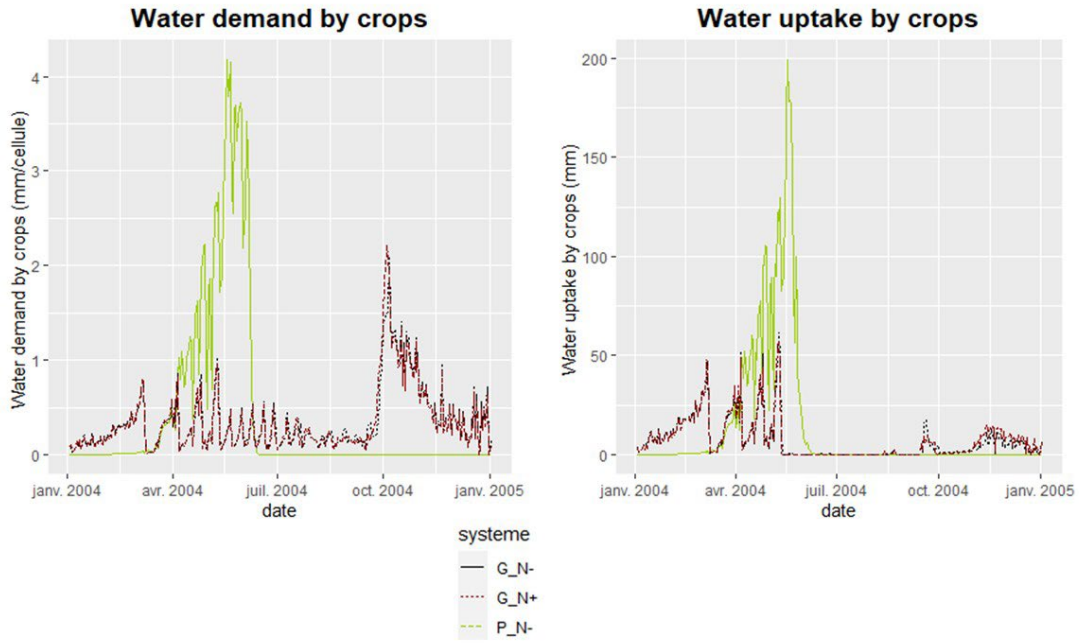


Figure 7: Dynamics of water and demand water by crops across different modalities (focus on 2004). G_N+ corresponds to the reference system where olive trees are fertilized. G_N- corresponds to the reference system where olive trees are not fertilized, and P_N- corresponds to the system based on winter peas and not fertilized.

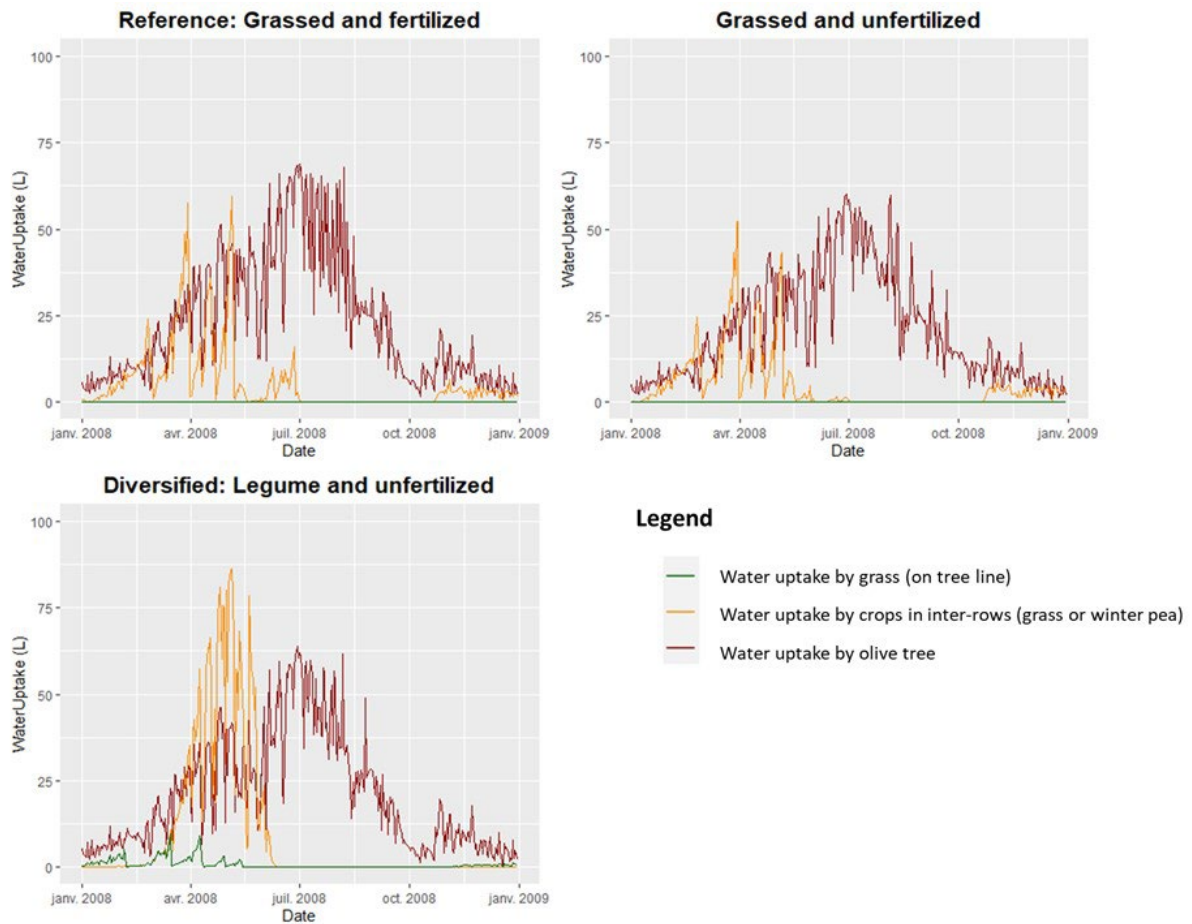


Figure 8: For all three treatments, water uptake dynamics in 2008 were analyzed for the olive tree, the grass on the row, and the crop in the inter-row (grass or winter pea).

**The difference in root system density between the tree
in the Diversified system and the Reference: Grassed and fertilized system.**

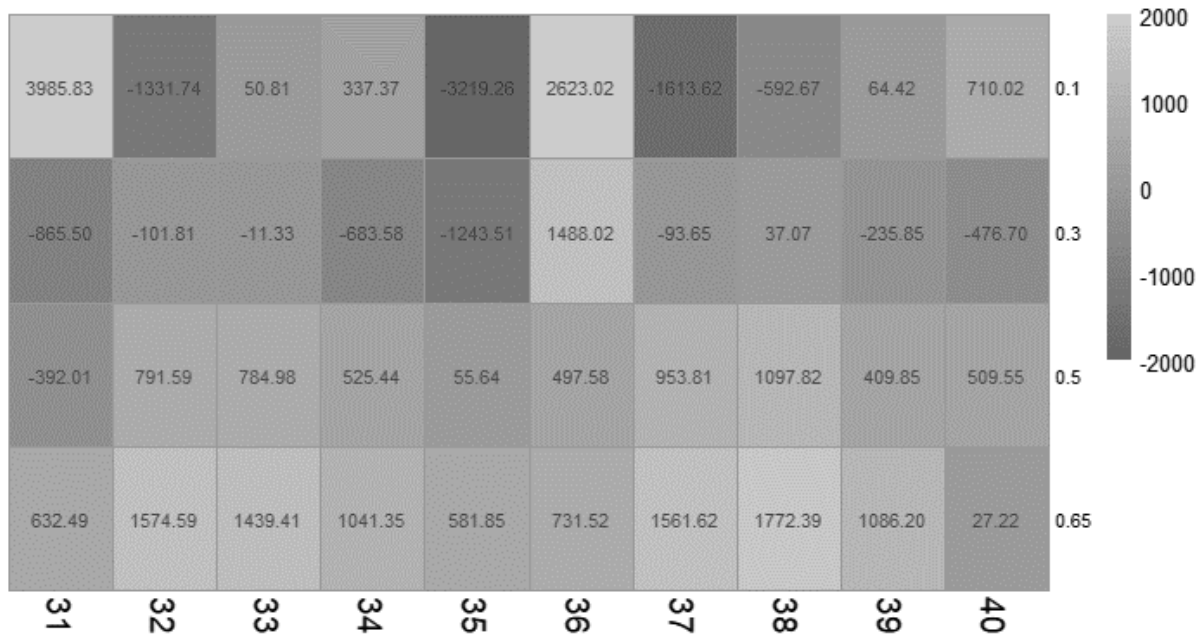


Figure 9: The difference in the root system density of the olive tree is observed between the reference system (G_N+) and the diversified system (P_N-). The X-axis represents the selected cells for the transect, and the Y-axis represents the soil depth. The transect was conducted on April 14, 1999.

The difference in root density (m of roots / m³ of soil) of an olive tree between a diversified system and the reference system varies according to both depth in the soil and distance from the tree trunk. This figure represents a transect conducted transversally to the cropped alley, on both sides of an olive tree, with cells 31 to 40 (see figure 3) selected as the sample cells, from left to right, and voxel depth (in cm) from top to bottom. This transect was conducted on April 15, 1999. This graph (Figure 9) shows that the main differences in rooting pattern mostly happen near the surface, and to a lower extent in the deepest layers of soil, with similar root densities in the intermediate layers. On the horizontal axis, there are much more roots of trees in the diversified system (P_N-) than in the reference system (G_N+) on the tree line, while in the cropped alley, there are less tree roots in the diversified system (P_N-, with pea in the alley) than in the reference system (G_N+, with grass in the alley).

The productivity of olive trees also varies according to the different cropping systems (Figure 10). In this virtual experiment on shallow soil, the productivity of the olive grove is low, reaching only 3 to 4 kg of olive dry matter per tree. Constraints related to water stress limit both growth and productivity of the trees. In the diversified system (P_N-), the yield of olive trees is even lower than in the other modalities, however it is not significantly different from the yield in the grassed and non-fertilized olive grove (G_N-). On the contrary, the olive productivity of the reference system (G_N+) is significantly higher than that of the diversified system (Kruskal-Wallis, p-value = 0.03).

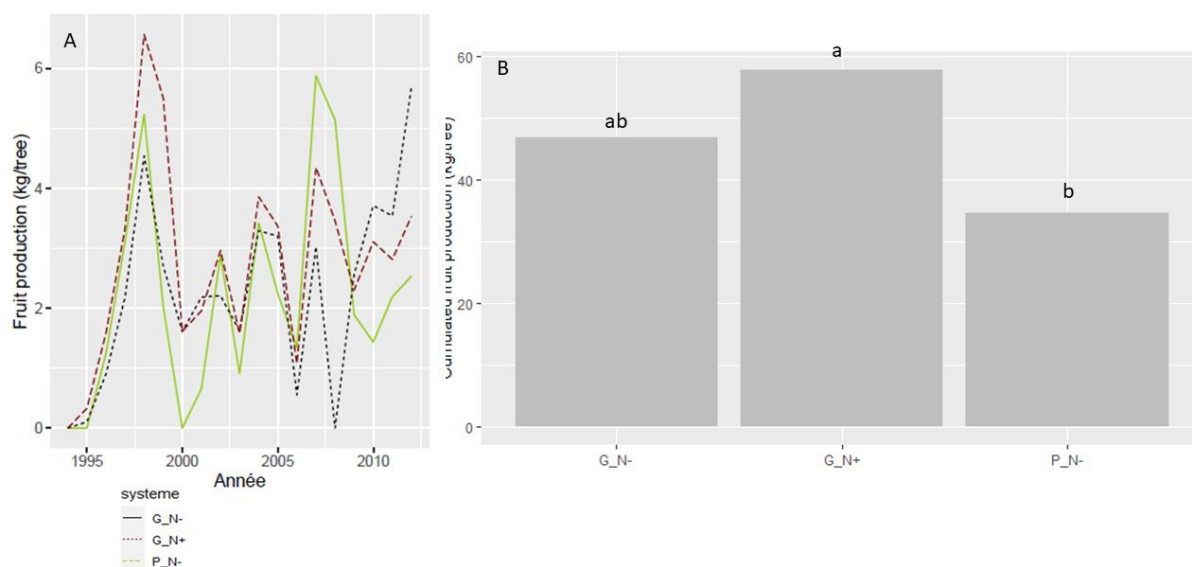


Figure 10: A) Dynamics of production according to different modalities. B) Cumulative fruit production since planting. Mean values with the same letters are not statistically different (Kruskal-Wallis test, followed by a post-hoc Dunn test. $P < 0.05$). G_N+ corresponds to the reference system where olive trees are fertilized. G_N- corresponds to the reference system where olive trees are not fertilized, and P_N- corresponds to the system based on winter peas and not fertilized.

b) Environmental performance

The impact of the system on the environment is assessed considering the following variables: soil water evaporation, water runoff on the ground (a proxy for soil erosion), nitrogen leaching, and nitrogen volatilization (Figure 11).

Regarding soil water evaporation, the diversified system reduces water evaporation by 11% compared to the reference olive orchard since the system's establishment. No significant difference was observed between a fertilized and non-fertilized olive orchard.

For water runoff, no significant difference was observed between the systems in cumulative runoff since the date of plantation.

In terms of nitrogen leaching, the diversified system shows a 28% increase in leached nitrogen compared to the reference system (fertilized). However, in the non-fertilized olive orchard, the leached nitrogen decreases by 12% compared to the reference system.

Regarding nitrogen volatilization, only the fertilized reference system exhibits nitrogen loss through volatilization due to the application of mineral nitrogen.

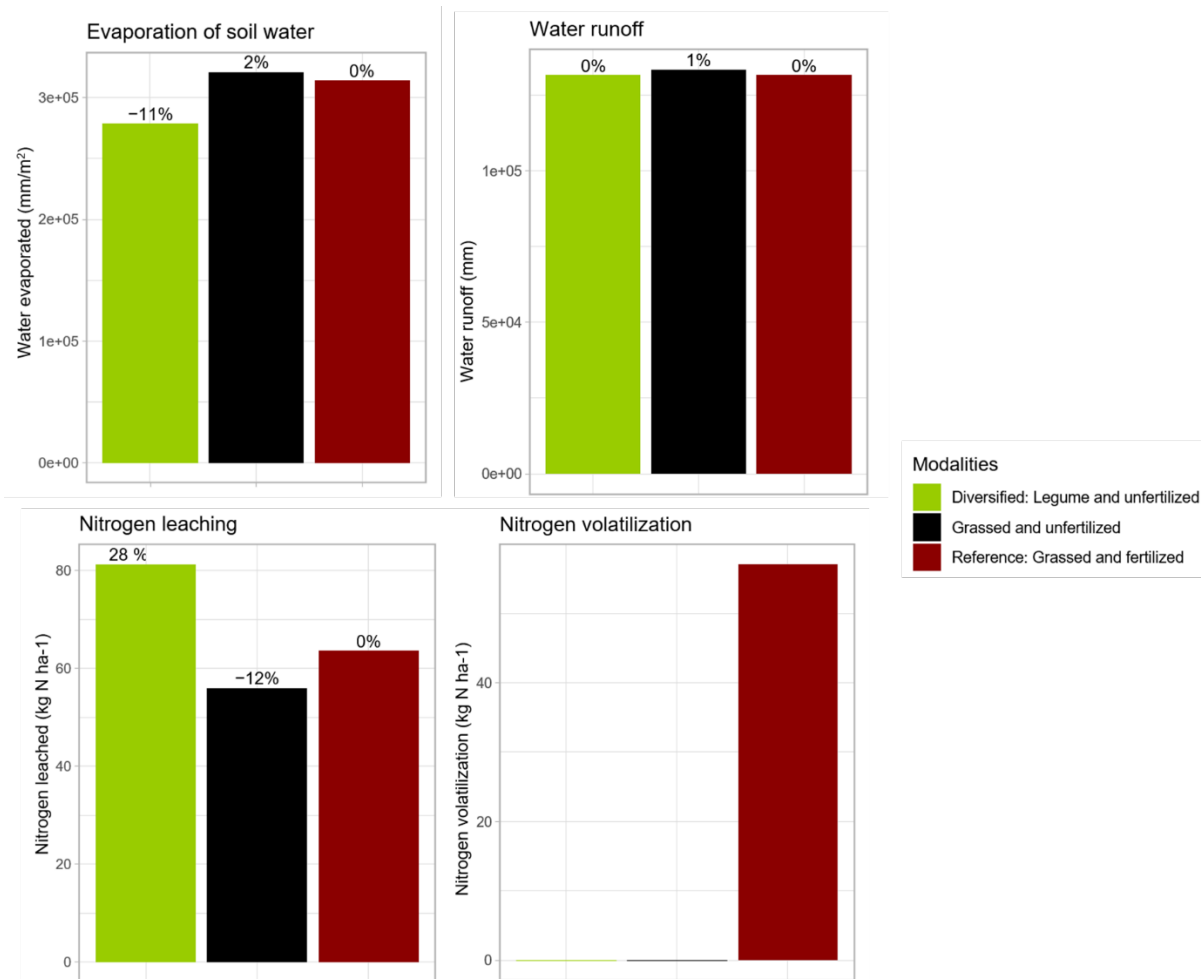


Figure 11: cumulated values from planting date were calculated for various environmental variables including soil water evaporation, nitrogen leaching, water runoff, and nitrogen volatilization

c) Conclusion of virtual experiment 1

In comparison to grassed olive groves, the winter pea-based system leads to a decrease in soil evaporation and an increase in nitrogen satisfaction. However, this diversified system, when compared to the grassed and fertilized olive grove, restricts the development and productivity of the olive trees (mainly due to water stress). Furthermore, the diversified system increases nitrogen leaching (Figure 12).

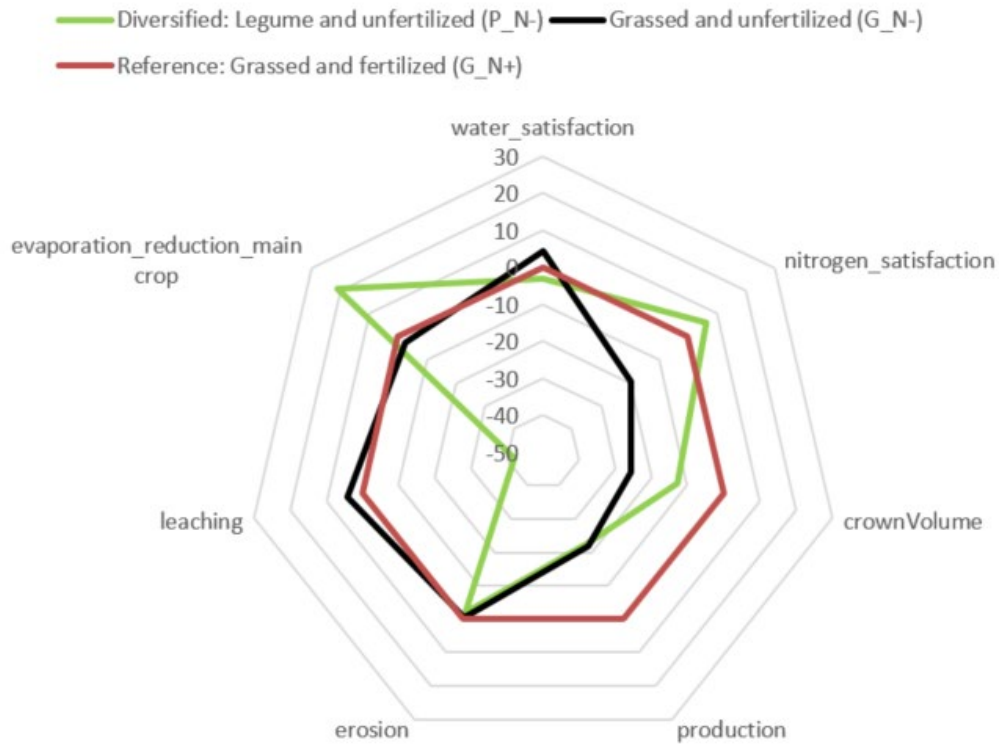


Figure 12: Evaluation of agronomic and environmental performances of different modalities of olive orchards. Values are indicated as a percentage of increase or decrease compared to the reference system (G_N+), with values flipped for nitrogen leaching, erosion, and evaporation so that the desired outcome is always towards higher values. G_N+ corresponds to the reference system where olive trees are fertilized (red color). G_N- corresponds to the reference system where olive trees are not fertilized (black color), and P_N- corresponds to the system based on winter peas and not fertilized (green color).

2) System: olive trees - lettuce - rotation (winter pea, barley, wheat)

a) Agronomic performance

Development and productivity of olive trees

The olive trees in the agroforestry systems have a quicker initial growth than the olive tree in the reference system (Figure 13). This difference in growth can be partially attributed to a higher level of water and nitrogen stress in the reference system olive trees (Figure 14).

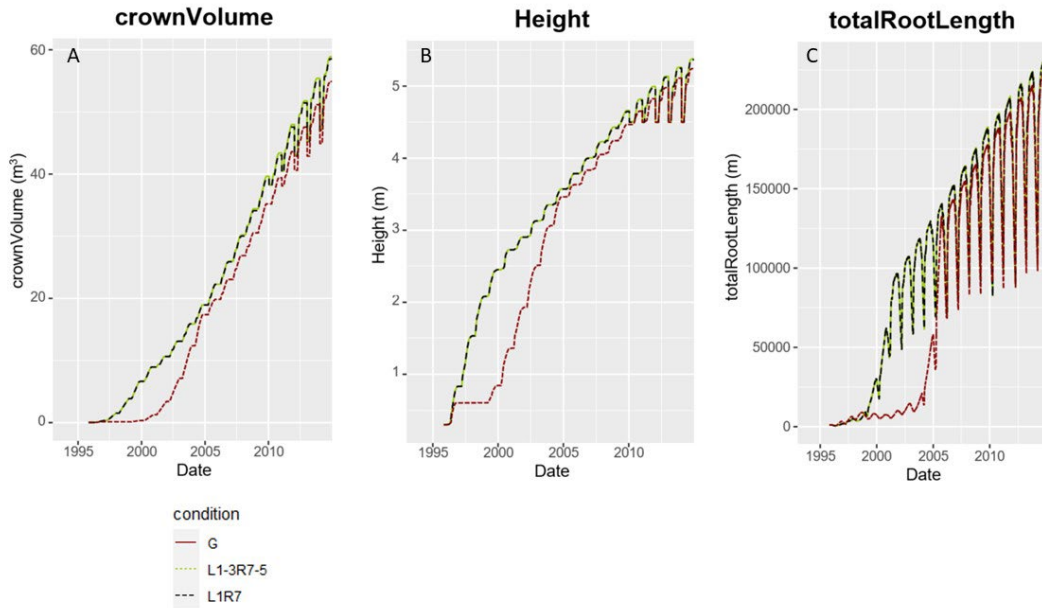


Figure 13: Growth dynamics of olive trees across different modalities. A) Canopy volume. B) Height. C) Root length. G corresponds to the reference modality (olive grove with grass). L1-3R7-5 corresponds to the Agroforestry modality with a decrease in inter-row area: olive trees associated with lettuce on 1 m at the beginning and then 3 m after 9 years, and L1R7 corresponds to the Agroforestry modality : olive trees associated with lettuce on 1 m width and arable rotation (Pea-Wheat-Barley) on 7 m width.

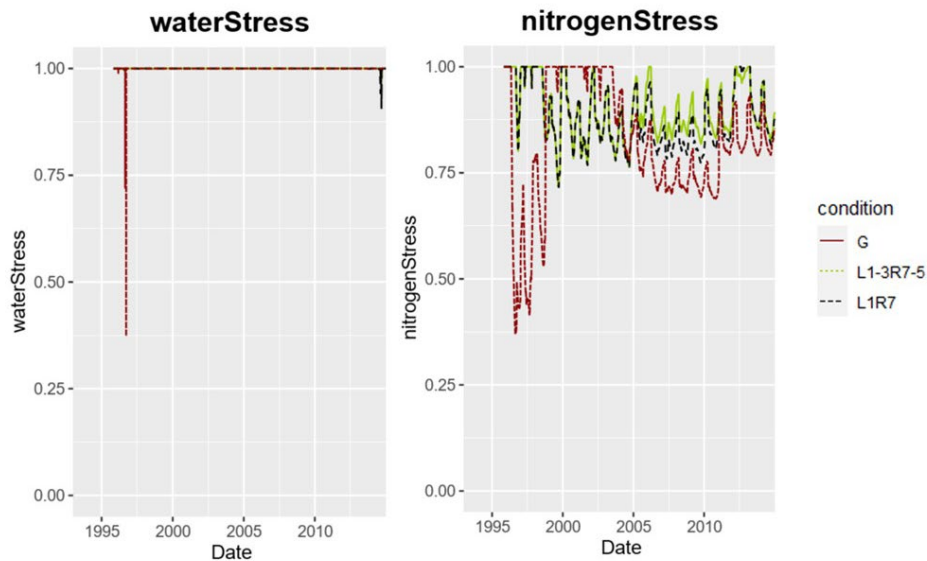


Figure 14: Dynamics of water and nitrogen stress index across different modalities. G corresponds to the reference modalities. L1-3R7-5 corresponds to the Agroforestry modality with a decrease in inter-row area: olive trees associated with lettuce on 1 m at the beginning and then 3 m after 9 years, and L1R7

corresponds to the Agroforestry modality : olive trees associated with lettuce on 1 m width and arable rotation (Pea-Wheat-Barley) on 7 m width.

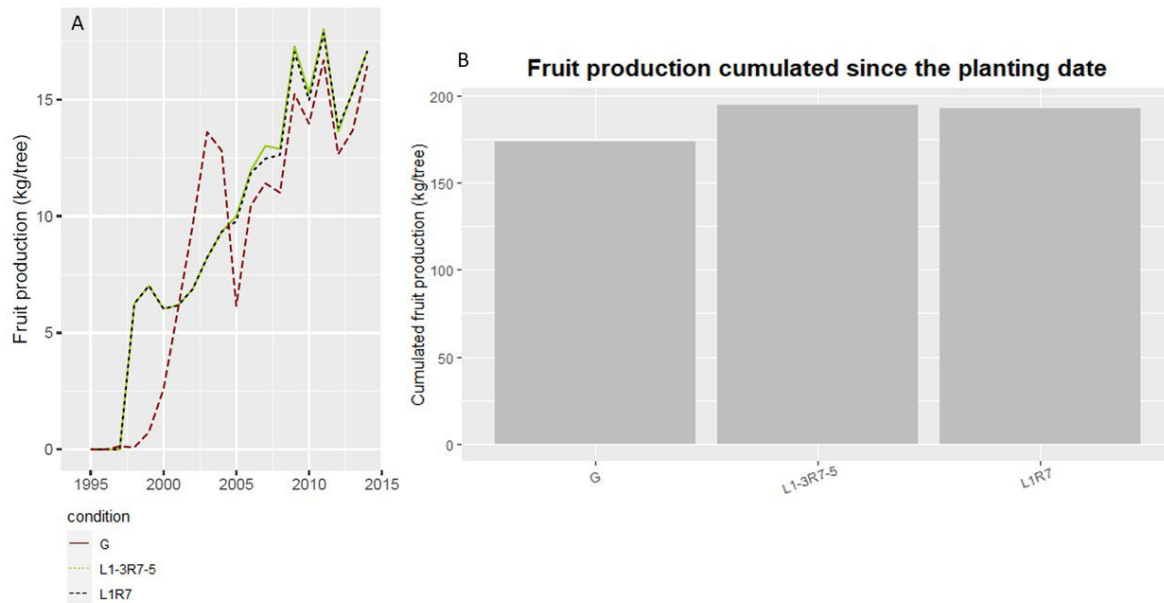


Figure 15: A) Dynamics of production according to different modalities. B) Cumulative fruit production since planting. The Kruskal-Wallis test showed no effect of type of system ($p > 0.05$). G corresponds to the reference modality (olive grove with grass). L1-3R7-5 corresponds to the Agroforestry modality with a decrease in inter-row area: olive trees associated with lettuce on 1 m at the beginning and then 3 m after 9 years, and L1R7 corresponds to the Agroforestry modality : olive trees associated with lettuce on 1 m width and arable rotation (Pea-Wheat-Barley) on 7 m width.

The olive production dynamics differ between agroforestry systems and the reference system. In the grassed orchard, the onset of olive production is delayed compared to agroforestry modalities. This difference can be primarily attributed to higher water and nitrogen stress in the reference orchard in the first 4 years (Figure 15). However, mean olive production over the whole life of the system is not significantly different between the modalities (figure 15B). Thus, olive production in an agroforestry system does not appear to decrease but, on the contrary, tends to increase. This is due to the additional benefits olive trees derive from the fertilization and irrigation of the associated crops.

Development and productivity of intercrops (winter pea-barley-wheat rotation)

To assess the production dynamics of crops in the three-year rotation, the yields of each species are compared to a reference modality (monoculture without trees). No significant difference in yield is observed between the different modalities for each species. Consequently, agroforestry crops show neither an increase nor a decrease in yield (Figure 16), although there is a trend for higher wheat production in agroforestry without a decrease in area under rotation.

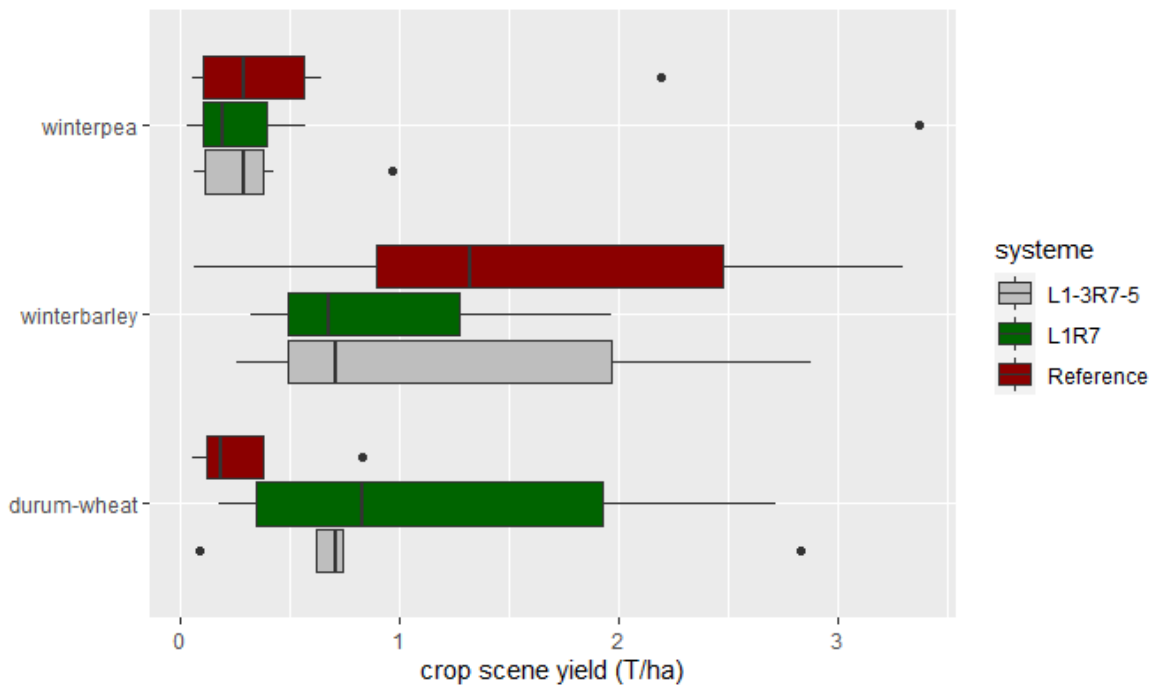


Figure 16: Boxplot representation of crop yields (in t/ha) for the different modalities in the rotation. No significant difference was observed (Kruskal-Wallis test) with a significance threshold of 0.05. G corresponds to the reference modality (olive grove with grass). L1-3R7-5 corresponds to the Agroforestry modality with a decrease in inter-row area: olive trees associated with lettuce on 1 m at the beginning and then 3 m after 9 years, and L1R7 corresponds to the Agroforestry modality : olive trees associated with lettuce on 1 m width and arable rotation (Pea-Wheat-Barley) on 7 m width.

Development and productivity of lettuce

For lettuce, the production (fresh weight) varies over time in the control monoculture treatment. The yield per hectare decreases due to a reduction in the cultivated area (only along the olive tree rows). However, in the Agroforestry with a decrease in cultivated treatment, the cultivated area for lettuce increases, resulting in an increase in yield per hectare (Figure 17).

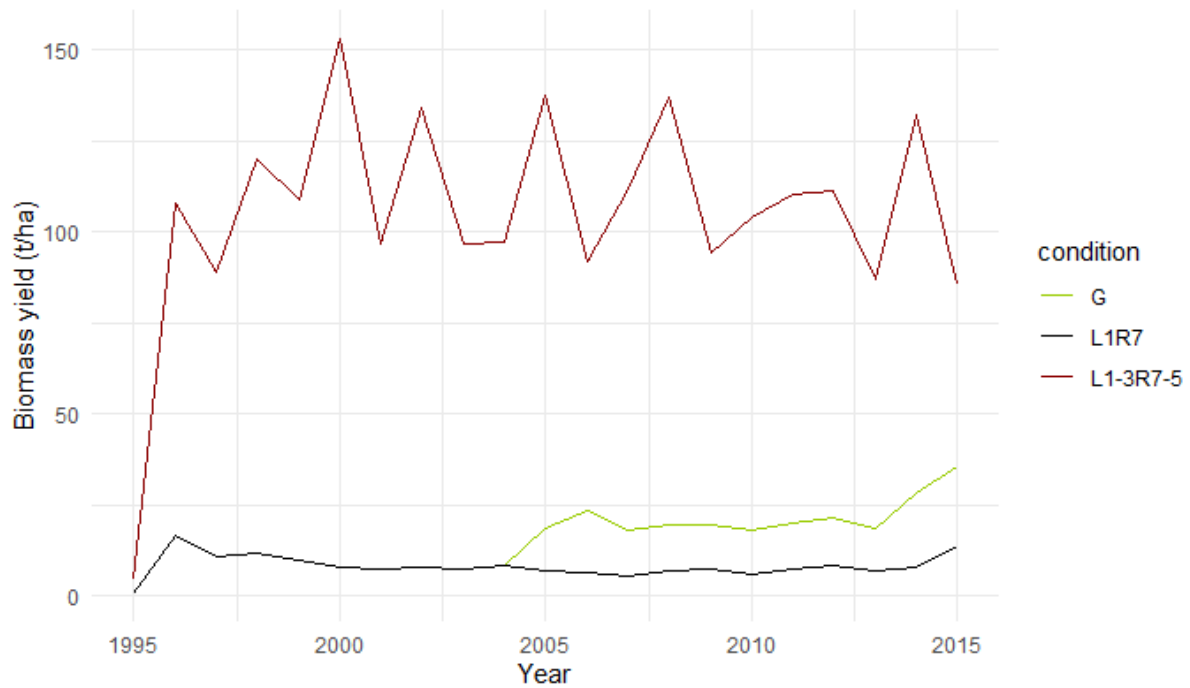


Figure 17: Production dynamics (t/ha of fresh weight over the whole area of the plot) as a function of different systems. G corresponds to the reference modality (olive grove with grass). L1-3R7-5 corresponds to the Agroforestry modality with a decrease in inter-row area: olive trees associated with lettuce on 1 m at the beginning and then 3 m after 9 years, and L1R7 corresponds to the Agroforestry modality : olive trees associated with lettuce on 1 m width and arable rotation (Pea-Wheat-Barley) on 7 m width.

LER (Land Equivalent Ratio)

To study the yield of agroforestry plots, the Land Equivalent Ratio (LER) is calculated for each system (figure 18)(Mead and Willey, 1980). Overall, the LER is greater than 1, indicating that the agroforestry system is more productive than monocultures. Overall, the LER of agroforestry systems is greater than 1 in all cases. Thus, agroforestry appears to increase the overall system production, for a fertilized and irrigated system. There is very little difference between the two agroforestry modalities. The total LER over the whole systems's life are respectively 1.99 and 2.02 for L1R7 and LI-3R7-5 modalities (Figure 18).

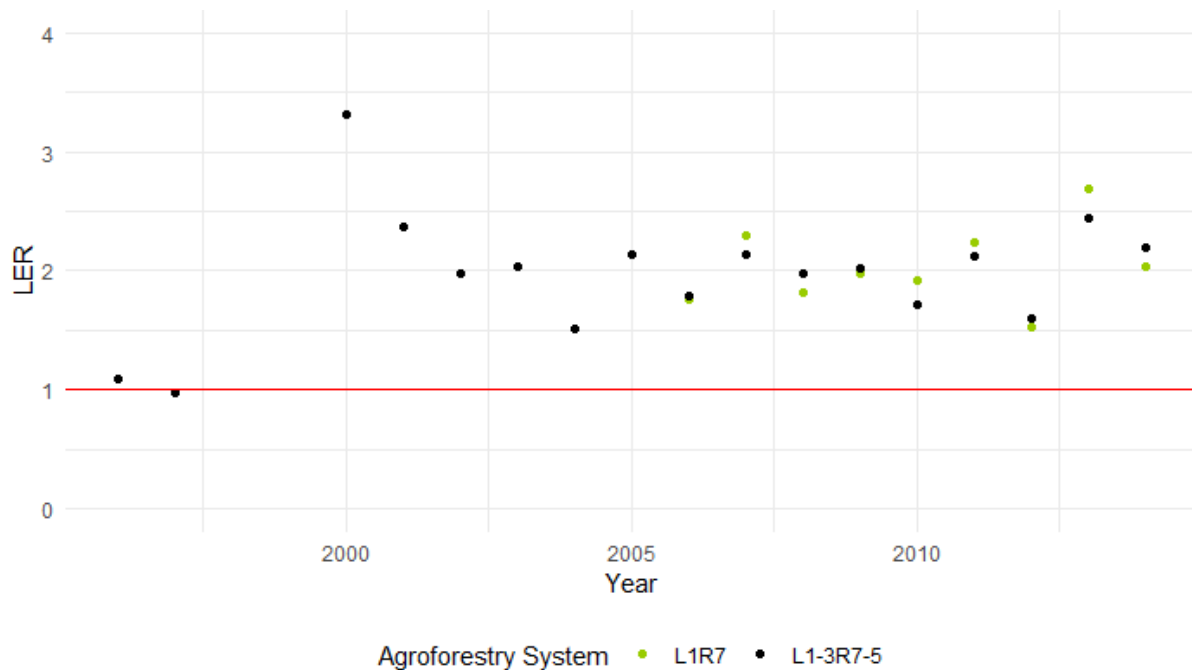


Figure 18: Temporal dynamics of LER in agroforestry systems. L1-3R7-5 corresponds to the Agroforestry modality with a decrease in inter-row area: olive trees associated with lettuce on 1 m at the beginning and then 3 m after 9 years, and L1R7 corresponds to the Agroforestry modality : olive trees associated with lettuce on 1 m width and arable rotation (Pea-Wheat-Barley) on 7 m width.

b) Environmental performances

To evaluate the environmental performances of these systems, multiple aspects are taken into account (Figure 19). In the L1-5R7-5 system, a reduction of 18% in soil water evaporation is observed. However, this reduction is only 4% in the L1R7 system. This difference can be explained by the fact that lettuce is irrigated, leading to higher evaporation in this system. Additionally, in agroforestry systems (L1R7 and L1-3R7-5), an additional nitrogen input is applied for lettuce cultivation. Regarding water runoff, it decreases in agroforestry modalities (L1R7 and L1-3R7-5) compared to the grass-covered olive system (G system). Furthermore, an increase in nitrogen volatilization is observed in agroforestry systems, partly due to the application of fertilizers for lettuce cultivation. As for soil organic matter, it is higher in agroforestry systems compared to a crop rotation system.

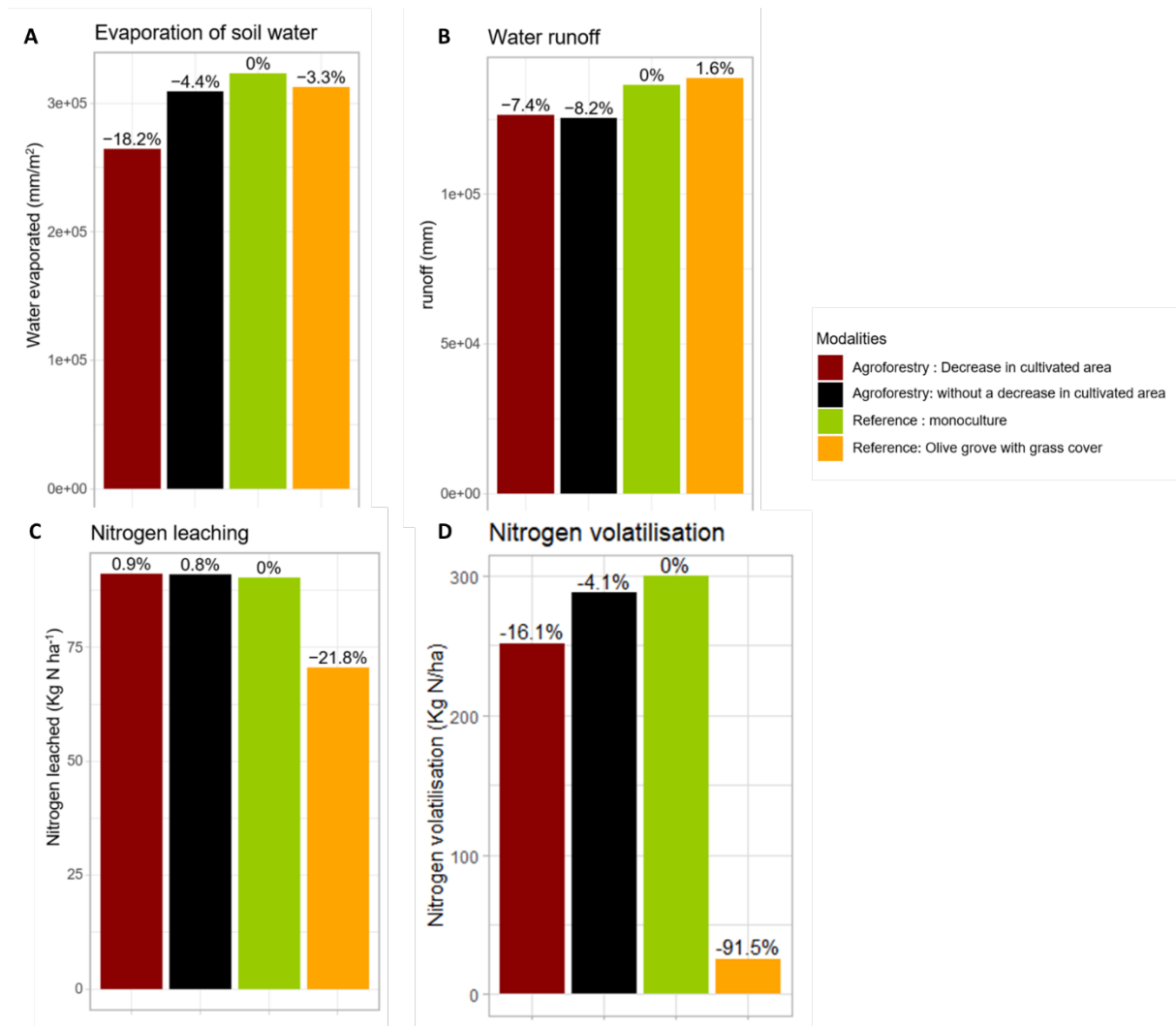


Figure 19: cumulated values from planting date to the system's end of life for various environmental variables: evaporation of soil water (A), water runoff (B), nitrogen leaching (C) and nitrogen volatilization (D).

c) Conclusion of virtual experiment 2

Compared to the reference orchards (G system), olive trees in agroforestry systems (L1R7 and L1-3R7-5 systems) exhibit faster growth and earlier onset of production. In terms of environmental performance, agroforestry systems are characterized by reduced evaporation and water runoff in the soil. However,

due to the additional fertilization associated with lettuce cultivation, greater nitrogen leaching is observed (Figure 20).

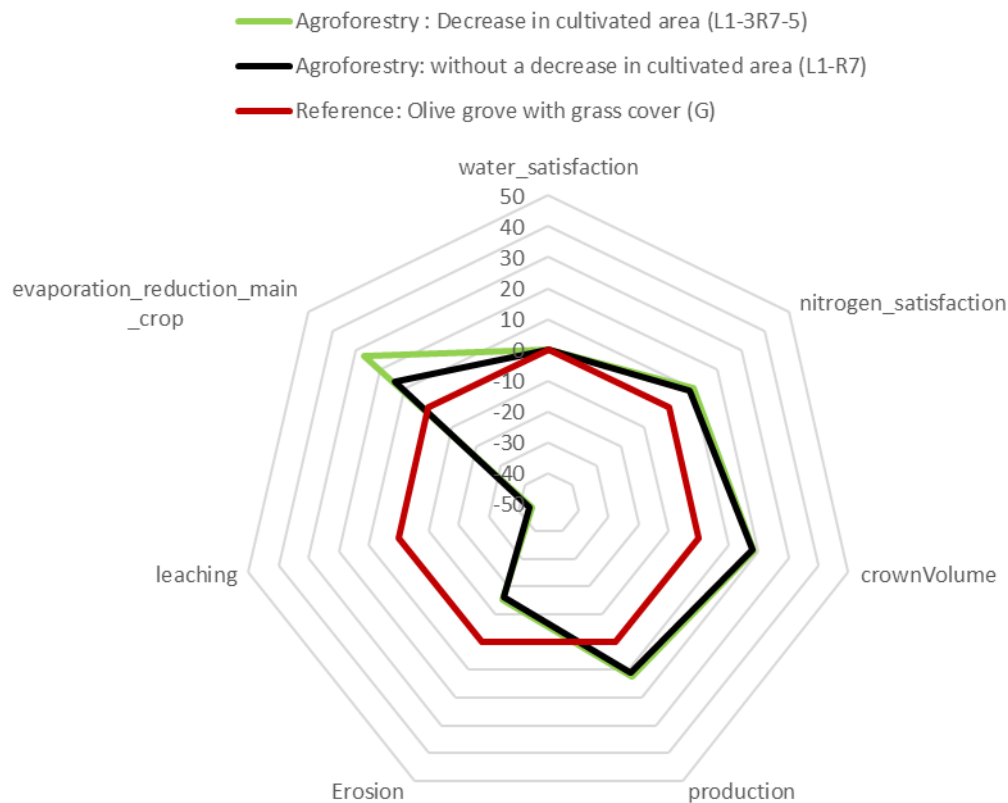


Figure 20: Evaluation of agronomic and environmental performance of different modalities of olive orchards. Values are indicated as a percentage of increase or decrease compared to the reference system (G), with values flipped for nitrogen leaching, erosion, and evaporation so that the desired outcome is always towards higher values. G corresponds to the reference modality (olive grove with grass). L1-3R7-5 corresponds to the Agroforestry modality with a decrease in inter-row area: olive trees associated with lettuce on 1 m at the beginning and then 3 m after 9 years, and L1R7 corresponds to the Agroforestry modality : olive trees associated with lettuce on 1 m width and arable rotation (Pea-Wheat-Barley) on 7 m width.

Discussion

System: olive trees – legumes

The system combining olive trees and winter pea exhibits a decrease in soil evaporation and a slight increase in nitrogen satisfaction. In the literature, a study demonstrates the benefits of vegetative cover with leguminous plants in controlling soil erosion, water runoff, and soil restoration (Zuazo et al., 2020). However, it has been demonstrated in the literature that nitrogen contribution by legumes is limited (Rodrigues et al., 2013, 2011). Indeed, the decomposition of biomass transfers only a negligible amount of nitrogen, contributing minimally to the nitrogen needs of olive trees. Additionally, this biomass decomposition primarily occurs in autumn, which can result in nitrogen leaching during periods of heavy winter rainfall (Rodrigues et al., 2013). In the olive and winter pea system, nitrogen leaching has increased compared to herbaceous olive groves. This difference can be partly attributed to this phenomenon.

Moreover, winter pea absorb more water, and at the wrong period of year relative to the needs of the olive trees, compared to a permanent vegetative cover. Olive trees directly compete with winter peas in April during their peak growth phase. Ultimately, winter peas and olive trees do not appear to be

complementary, both temporally and in terms of above-ground competition due to root system competition. This effect might have been exacerbated by the shallow soil, which prevented spatial niche differentiation of roots.

Furthermore, olive trees in the diversified system exhibit slowed growth, falling between those in grassed and fertilized olive groves and grassed and non-fertilized systems. The growth of olive trees in the diversified system is higher than that of non-fertilized olive trees since legumes still increase the available nitrogen reserves, reducing nitrogen stress. However, legumes do not enable olive trees to grow as much as those in fertilized olive groves. Additionally, the yield in the diversified system is similar, if not slightly lower, than that of olive trees in a non-fertilized system. This is in contradiction with literature demonstrating a slight growth increase with the use of legumes compared to non-fertilized olive groves (Rodrigues et al., 2013).

As demonstrated in studies, legumes contribute to enhancing the sustainability of olive groves as well as productivity (Correia et al., 2015). A study demonstrates that a leguminous cover crop leads to an increase in fresh biomass compared to spontaneous vegetation, and contributes to elevated carbon sequestration in the soil (Repullo-Ruibérriz de Torres et al., 2021; Tul et al., 2022). In another study, a comparison is made between mineral fertilizer application and green fertilizer application using *Sulla coronaria*, inoculated with *Rhizobium sullae*. This study demonstrates the feasibility of entirely replacing mineral fertilizer input with *Sulla coronaria* green fertilizer (Zullo and Ciafardini, 2020). *Sulla coronaria* (*Sulla coronaria* L. Medik syn. *Hedysarum coronarium* L.) is a perennial plant well-suited to water stress conditions (Choi and Ohashi, 2003).

As demonstrated in our study, winter peas and olive trees compete for water resources, especially in April. On hillslope soil, these two species do not appear to be complementary. However, with perennial legumes (like that *Sulla Coronaria*) and their indeterminate growth, the competition for water resources could be different. This perennial legume could fix nitrogen throughout the year and potentially increase the long-term availability of nitrogen for the olive tree.

System: olive trees - salad - rotation (winter peas, barley, wheat)

Compared to a grass-covered olive orchard (System G), agroforestry systems (with increased nitrogen and water inputs) promote a faster growth of olive trees, resulting in an earlier onset of production compared to traditional System G. A study has also substantiated this observation, indicating that intercropping practices, particularly fertilization, enhance the growth and production of intercropped crops as well as the olive trees themselves (Mantzanas et al., 2021). In our study, no significant difference between systems is observed in terms of cumulative olive yield, indicating that agroforestry systems do not lead to a decrease in olive productivity. Other studies also suggest that olive tree yield does not appear to vary between monoculture and agroforestry conditions (Panozzo et al., 2020; Temani et al., 2021, 2018). In the study by Temani et al., 2021, the olive yield (t/ha) does not vary between the control modality (olive orchard) and the agroforestry modalities: olive - wheat and olive - fava bean (Temani et al., 2021).

Regarding intercropped crops, in our study, no significant difference is observed between the systems for intercropped crop yields. In comparison with other studies, intercropped crop yields tend to decrease, primarily due to resource competition (Mantzanas et al., 2021). In a study by Temani et al., 2021, the authors demonstrated that shading caused by the olive tree canopies reduced crop yields regardless of the water regime (Temani et al., 2021). In our study, the olive trees have only reached the mature phase (less than 20 years old). The light competition is not maximal, and the planting density is low (167 trees/ha). For agroforestry, it is recommended to have a planting density of less than 200 trees/ha to avoid excessive competition between trees and crops (Singh et al., 2007). It is also recommended not to sow intercropped crops like wheat under the olive tree canopy. Razouk et al. recommend that for a 7m

high of olive tree, sowing should not be done within 2m of the trunk (Razouk et al., 2016). In our study, light competition is minimized, and water and nitrogen competition is very low. These circumstances can partly explain the stagnation of intercropped crop yields.

The Land Equivalent Ratio (LER) of agroforestry systems is around 2, demonstrating their higher overall productivity compared to monoculture rotations on the same land area (Mead and Willey, 1980). Other studies have also demonstrated LER values close to 2, highlighting the productivity advantage of agroforestry systems. (Amassaghrou et al., 2023; Lehmann et al., 2020; Panozzo et al., 2020; Temani et al., 2021, 2018). However, compared to an olive orchard, agroforestry systems require higher inputs of water and nitrogen, particularly for lettuce cultivation.

In terms of environmental performance, agroforestry systems appear to reduce water runoff and soil water evaporation. As studies have shown, agroforestry systems decrease soil erosion (reducing water runoff) and enhance soil fertility. These systems also increase carbon sequestration in the soil and enhance biodiversity within the plot (Amassaghrou et al., 2016; Jose, 2009; Jose et al., 2000; Ramachandran Nair et al., 2010; Shi et al., 2018). However, due to the additional nitrogen inputs for lettuce cultivation, agroforestry systems (L1R7 and L1-3R7-5) experience increased nitrogen leaching. Furthermore, compared to rotation cropping systems without trees, carbon storage in the soil is slightly enhanced in agroforestry systems.

Conclusion and perspectives

In the olive - winter pea system, the species are not complementary in terms of temporal and spatial dynamics, particularly in relation to their root systems. Winter peas are unable to fully substitute for the necessary mineral fertilizer inputs. Although they fix nitrogen, the quantity produced is insufficient to meet the system's needs. Furthermore, the biomass of winter peas mineralizes in autumn, resulting in leaching of a portion of the nitrogen.

In the olive - lettuce - rotation system, agroforestry systems show no decrease in olive yield. Additionally, they exhibit earlier onset of production for olive trees compared to traditional systems. The Land Equivalent Ratio (LER) reaches 2, indicating greater productivity of agroforestry systems. However, the cultivation of lettuce in these systems requires additional irrigation and fertilization. Intercropped crops in agroforestry systems do not show any decrease in yield. In terms of environmental performance, agroforestry systems demonstrate better overall performance, with the exception of nitrogen leaching.

Following this study, several avenues can be explored to improve the assessment of agronomic and environmental performance of agroforestry systems based on olive trees. One potential avenue would be to evaluate these diversified systems considering climate projections and comparing different scenarios. Additionally, it would be relevant to explore the olive-legume system by integrating another perennial legume species such as clover or crownvetch. Simultaneously, evaluating the olive-salad-rotation system by applying a gradient of irrigation reduction to preserve this precious resource commonly referred to as "blue gold" is also an interesting perspective. Another research direction would be to test system number 2 using the upcoming version 4.3 (currently under development) to evaluate a reduction in inter-row spacing without increasing the crop density per row. Moreover, exploring systems with more than two cultivation zones, as suggested during the co-design workshop and made possible by the future version 4.3, is relevant. Furthermore, it is necessary to diversify the number of available species to test more diversified systems as proposed by the participants during the co-design workshop, including crops such as asparagus, artichoke, raspberry, etc. Finally, there are plans to develop a new model version capable of simulating systems incorporating animals such as sheep.

Bibliography

- Amassaghrou, A., Barkaoui, K., Bouaziz, A., Alaoui, S.B., Fatemi, Z.E.A., Daoui, K., 2023. Yield and related traits of three legume crops grown in olive-based agroforestry under an intense drought in the South Mediterranean. *Saudi J. Biol. Sci.* 30, 103597. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2023.103597>
- Amassaghrou, A., Bouaziz, A., Karrou, M., Barkaoui, K., Razouk, R., Daoui, K., 2016. Agroforestry systems in Morocco, grain legumes and olive trees in Saïs region: Moulay Driss Zerhoun case. Presented at the Marrakech, International Conference on Pulses (ICP). Daoui K on Jul, p. 2016.
- Amoreux, P.J., 1784. *Traité de l'olivier: contenant l'histoire & la culture de cet arbre, les différentes manieres d'exprimer l'huile d'olive, celles de la conserver, &c.* Chez la Veuve Gontier.
- Carpio, A.J., Oteros, J., Tortosa, F.S., Guerrero-Casado, J., 2016. Land use and biodiversity patterns of the herpetofauna: The role of olive groves. *Acta Oecologica* 70, 103–111. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2015.12.007>
- Chirko, C.P., Gold, M.A., Nguyen, P.V., Jiang, J., 1996. Influence of direction and distance from trees on wheat yield and photosynthetic photon flux density (Qp) in a Paulownia and wheat intercropping system. *For. Ecol. Manag.* 83, 171–180.
- Choi, B.-H., Ohashi, H., 2003. Generic criteria and an infrageneric system for Hedysarum and related genera (Papilionoideae-Leguminosae). *Taxon* 52, 567–576.
- Correia, C.M., Brito, C., Sampaio, A., Dias, A., Bacelar, E., Gonçalves, B., Ferreira, H., Moutinho-Pereira, J., Rodrigues, M., 2015. Leguminous cover crops improve the profitability and the sustainability of rainfed olive (*Olea europaea* L.) orchards: from soil biology to physiology of yield determination. *Procedia Environ. Sci.* 29, 282–283.
- Daoui, K., Fatemi, Z.E.A., 2014. Agroforestry systems in Morocco: the case of olive tree and annual crops association in Saïs region. *Sci. Policy Polit. Mod. Agric. Syst. Glob. Context Local Dyn. Sustain. Agric.* 281–289.
- den Herder, M., Moreno, G., Mosquera-Losada, R.M., Palma, J.H.N., Sidiropoulou, A., Santiago Freijanes, J.J., Crous-Duran, J., Paulo, J.A., Tomé, M., Pantera, A., Papanastasis, V.P., Mantzanas, K., Pachana, P., Papadopoulos, A., Plieninger, T., Burgess, P.J., 2017. Current extent and stratification of agroforestry in the European Union. *Agric. Ecosyst. Environ.* 241, 121–132. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.03.005>
- Dupraz, C., Liagre, F., 2011. *Agroforesterie. Des arbres et des cultures.*, France Agricole. ed, Agriproduction.
- Fernández-Escobar, R., Gil-Ribes, J.A., Quesada-Moraga, E., Trapero, A., Msallem, M., 2013. Evolution and sustainability of the olive production systems.
- Gómez, J.A., Álvarez, S., Soriano, M.-A., 2009. Development of a soil degradation assessment tool for organic olive groves in southern Spain. *CATENA* 79, 9–17. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2009.05.002>
- Jose, S., 2009. Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. *Agrofor. Syst.* 76, 1–10. <https://doi.org/10.1007/s10457-009-9229-7>
- Jose, S., Gillespie, A., Seifert, J., Biehle, D., 2000. Defining competition vectors in a temperate alley cropping system in the midwestern USA: 2. Competition for water. *Agrofor. Syst.* 48, 41–59.
- Lasserre, H., Barbault, N., 2022. Complantations à base d'oliviers: un exemple de système agroforestier. *Nouv. Oliv.* 129, 34–30.
- Lauri, P.-É., Barkaoui, K., Ater, M., Rosati, A., 2019. Agroforestry for fruit trees in Europe and Mediterranean North Africa, in: *Burleigh Dodds Series in Agricultural Science*. Burleigh Dodds Science Publishing, pp. 385–418. <https://doi.org/10.19103/AS.2018.0041.18>
- Lehmann, L.M., Smith, J., Westaway, S., Pisanelli, A., Russo, G., Borek, R., Sandor, M., Gliga, A., Smith, L., Ghaley, B.B., 2020. Productivity and economic evaluation of agroforestry systems for sustainable production of food and non-food products. *Sustainability* 12, 5429.
- Loumou, A., Giourga, C., 2003. Olive groves: "The life and identity of the Mediterranean". *Agric. Hum. Values* 10.

- Mantzanas, K., Pantera, A., Koutsoulis, D., Papadopoulos, A., Kapsalis, D., Ispikoudis, S., Fotiadis, G., Sidiropoulou, A., Papanastasis, V., 2021. Intercrop of olive trees with cereals and legumes in Chalkidiki, Northern Greece. *Agrofor. Syst.* 95, 895–905.
- Matson, P.A., Parton, W.J., Power, A.G., Swift, M.J., 1997. Agricultural intensification and ecosystem properties. *Science* 277, 504–509.
- Mead, R., Willey, R., 1980. The concept of a 'land equivalent ratio' and advantages in yields from intercropping. *Exp. Agric.* 16, 217–228.
- Panozzo, A., Bernazeau, B., Desclaux, D., 2020. Durum wheat in organic olive orchard: good deal for the farmers? *Agrofor. Syst.* 94, 707–717. <https://doi.org/10.1007/s10457-019-00441-0>
- Pantera, A., Burgess, P.J., Mosquera Losada, R., Moreno, G., López-Díaz, M.L., Corroyer, N., McAdam, J., Rosati, A., Papadopoulos, A.M., Graves, A., Rigueiro Rodríguez, A., Ferreiro-Domínguez, N., Fernández Lorenzo, J.L., González-Hernández, M.P., Papanastasis, V.P., Mantzanas, K., Van Lerberghe, P., Malignier, N., 2018. Agroforestry for high value tree systems in Europe. *Agrofor. Syst.* 92, 945–959. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0181-7>
- Pantera, A., Papadopoulos, A., Kitsikopoulos, D., Mantzanas, K., Papanastasis, V., Fotiadis, G., 2016. System report: olive agroforestry in Molos, Central Greece. *AGFORWARD Deliv* 3.
- Paris, P., Camilli, F., Rosati, A., Mantino, A., Mezzalana, G., Dalla Valle, C., Franca, A., Seddaiu, G., Pisanelli, A., Lauteri, M., Brunori, A., Re, G.A., Sanna, F., Ragagnoli, G., Mele, M., Ferrario, V., Burgess, P.J., 2019. What is the future for agroforestry in Italy? *Agrofor. Syst.* 93, 2243–2256. <https://doi.org/10.1007/s10457-019-00346-y>
- Ramachandran Nair, Nair, V.D., Mohan Kumar, B., Showalter, J.M., 2010. Carbon Sequestration in Agroforestry Systems, in: *Advances in Agronomy*. Elsevier, pp. 237–307. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)08005-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)08005-3)
- Razouk, R., Daoui, K., Ramdani, A., Chergaoui, A., 2016. Optimal distance between olive trees and annual crops in rainfed intercropping system in northern Morocco. *J. Crop Sci. Res.* 1, 23–32.
- Repullo-Ruibérriz de Torres, M.A., Moreno-García, M., Ordóñez-Fernández, R., Rodríguez-Lizana, A., Carceles Rodríguez, B., García-Tejero, I.F., Durán Zuazo, V.H., Carbonell-Bojollo, R.M., 2021. Cover crop contributions to improve the soil nitrogen and carbon sequestration in almond orchards (SW Spain). *Agronomy* 11, 387.
- Rodrigues, M.Â., Correia, C.M., Claro, A.M., Ferreira, I.Q., Barbosa, J.C., Moutinho-Pereira, J.M., Bacelar, E.A., Fernandes-Silva, A.A., Arrobas, M., 2013. Soil nitrogen availability in olive orchards after mulching legume cover crop residues. *Sci. Hortic.* 158, 45–51.
- Rodrigues, M.Â., Pavão, F., Lopes, J.I., Gomes, V., Arrobas, M., Moutinho-Pereira, J., Ruivo, S., Cabanas, J.E., Correia, C.M., 2011. Olive yields and tree nutritional status during a four-year period without nitrogen and boron fertilization. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 42, 803–814.
- Russo, C., Cappelletti, G., Nicoletti, G., Di Noia, A., Michalopoulos, G., 2016. Comparison of European Olive Production Systems. *Sustainability* 8, 825. <https://doi.org/10.3390/su8080825>
- Shi, L., Feng, W., Xu, J., Kuzyakov, Y., 2018. Agroforestry systems: Meta-analysis of soil carbon stocks, sequestration processes, and future potentials. *Land Degrad. Dev.* 29, 3886–3897.
- Singh, G., Mutha, S., Bala, N., 2007. Effect of tree density on productivity of a *Prosopis cineraria* agroforestry system in North Western India. *J. Arid Environ.* 70, 152–163.
- Smith, J., 2010. The history of temperate agroforestry.
- Temani, F., Barkaoui, K., Bouaziz, A., Wery, J., 2018. Assessment of olive tree-barley interactions in Mediterranean agroforestry: barley grain and straw along a rainfall gradient in Morocco. *PoS1-64. Agroscope*.
- Temani, F., Bouaziz, A., Daoui, K., Wery, J., Barkaoui, K., 2021. Olive agroforestry can improve land productivity even under low water availability in the South Mediterranean. *Agric. Ecosyst. Environ.* 307, 107234.

Tul, S., Manolikaki, I., Digalaki, N., Psarras, G., Koufakis, I., Kalaitzaki, A., Sergentani, C., Koubouris, G., 2022. Contribution of a seeded cover crop mixture on biomass production and nutrition status compared to natural vegetation in a Mediterranean olive grove. *Int. J. Plant Biol.* 13, 235–244.

USDA Agroforestry Strategic Framework, 2019. Agroforestry Strategic Framework: Fiscal Years 2019-2024.

Vanwalleghem, T., Amate, J.I., de Molina, M.G., Fernández, D.S., Gómez, J.A., 2011. Quantifying the effect of historical soil management on soil erosion rates in Mediterranean olive orchards. *Agric. Ecosyst. Environ.* 142, 341–351. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.06.003>

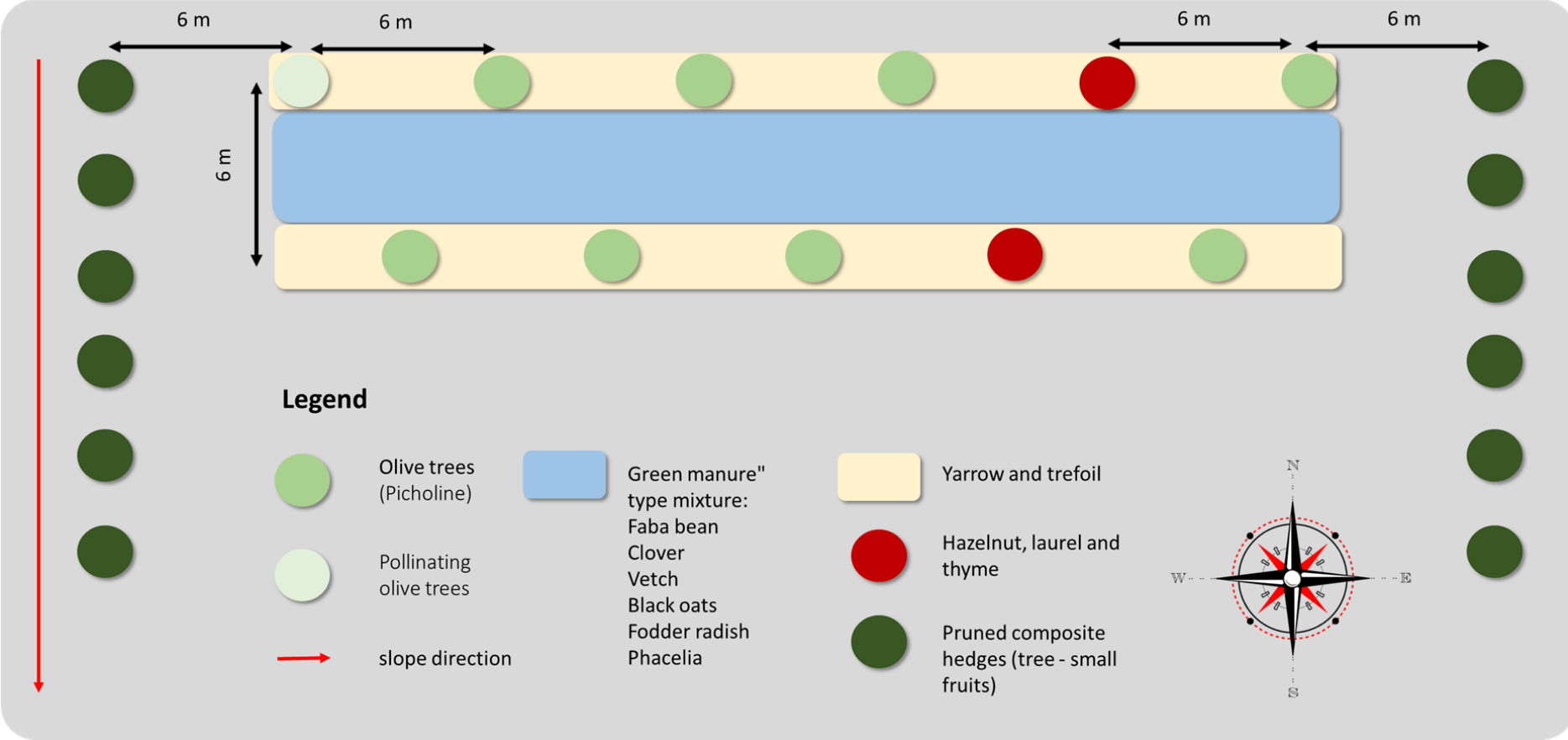
Warlop, F., 2016. The smart project: a focus on fruit trees and vegetables agroforestry systems in France. Presented at the 3rd European Agroforestry Conference Montpellier, 23-25 May 2016, EURAF.

Zuazo, V.H.D., Rodríguez, B.C., García-Tejero, I.F., Ruiz, B.G., Tavira, S.C., 2020. Benefits of organic olive rainfed systems to control soil erosion and runoff and improve soil health restoration. *Agron. Sustain. Dev.* 40, 41.

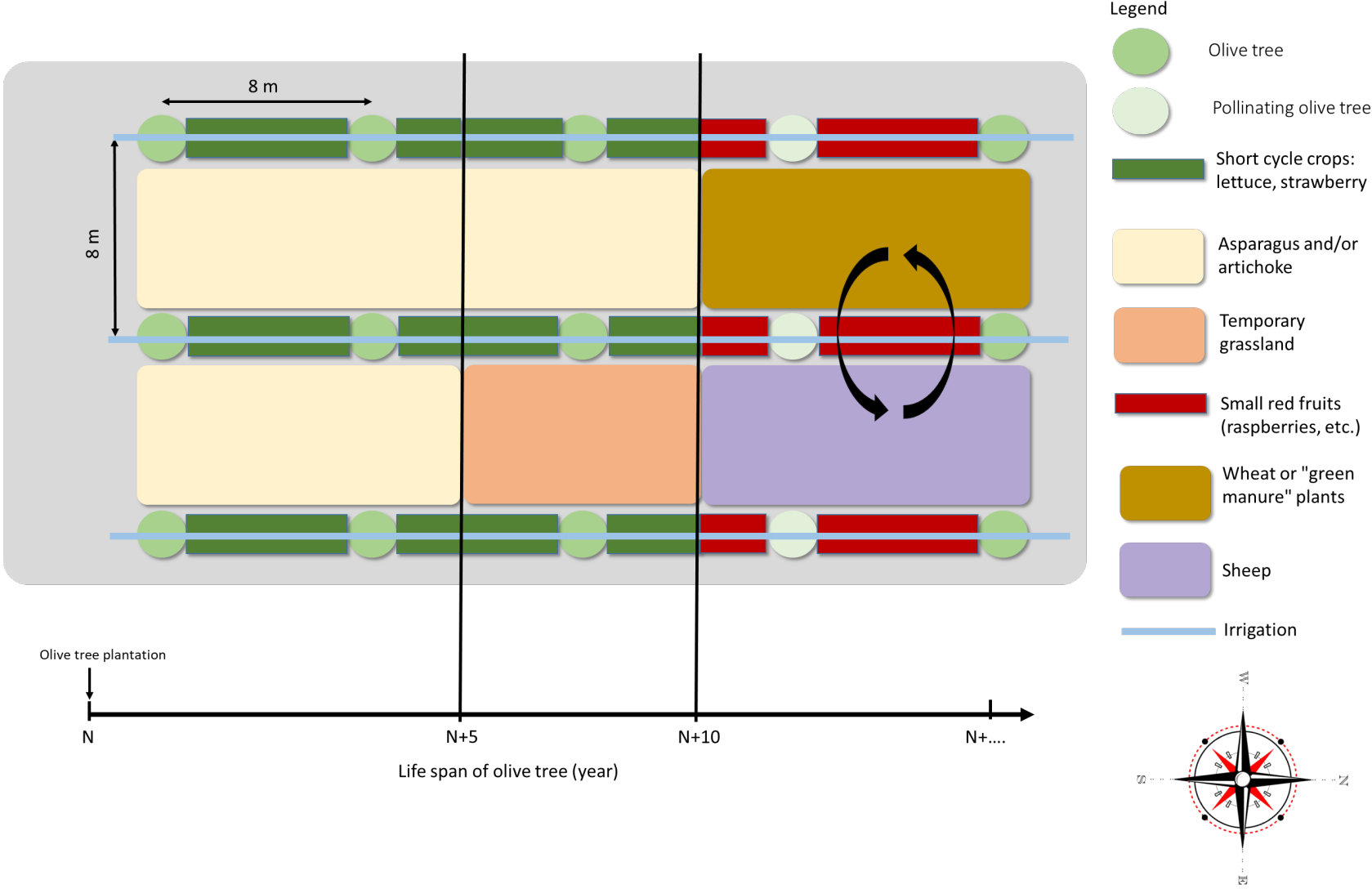
Zullo, B.A., Ciafardini, G., 2020. Potential of *Rhizobium sulae*–*Sulla coronaria* symbiotic biological nitrogen fixation to supplement synthetic mineral nitrogen in olive tree fertilization. *Agronomy* 10, 270.

Appendix

Appendix A: Co-constructed agroforestry system based on olive trees by French olive network (Involving olive growers, agricultural advisors, french olive association representatives, and researchers). The objective of the system is to reduce mineral fertilizer inputs and increase system performance.



Appendix B: Co-constructed agroforestry system based on olive trees by French olive network (Involving olive growers, agricultural advisors, french olive association representatives, and researchers). The objective of the system is to increase crop diversification and enhance system performance.



Chapitre 8 : L'impact du changement climatique sur les systèmes oléicoles traditionnels et agroforestiers

Le chapitre 8 se focalise sur l'évaluation par simulation des performances agronomiques et environnementales des systèmes oléicoles traditionnels et agroforestiers dans un contexte de climat futur (RCP 4.5).

1) Résumé de l'article

Cet article évalue les performances agronomiques et environnementales de systèmes oléicoles et agroforestiers en fonction de divers facteurs : systèmes de culture (différentes densités de plantation pour les systèmes agroforestiers), types de sol (plaine ou costière) et périodes climatiques (actuelle ou future).

Pour effectuer ces évaluations, différentes expérimentations virtuelles sont effectuées en utilisant la version 4.2 du modèle agroforestier Hi-sAFé. Les données météorologiques combinant des projections passées et futures (150 ans de données journalières) sont obtenues via l'outil Clipick®. Après nettoyage et correction des données climatiques, deux expérimentations virtuelles sont effectuées et comprennent chacune trois modalités : i) une oliveraie traditionnelle, ii) un système agroforestier avec une faible densité de plantation d'oliviers, iii) un système agroforestier avec une forte densité de plantation d'oliviers. Une expérimentation virtuelle est lancée sur un sol de type plaine (profond et riche en nutriments) et une seconde sur un sol de type costière (peu profond et pauvre en nutriment). Les simulations sont ensuite lancées puis analysées sur le logiciel R Studio avec le package hisafer.

Les performances agronomiques et environnementales varient en fonction du type de sol. Sur un sol de Costière, le développement et la productivité des oliviers, ainsi que des cultures intercalaires, sont réduits.

Les performances divergent également en fonction des systèmes. Le rendement en olives est stable entre les systèmes. Dans les systèmes agroforestiers, les cultures intercalaires n'affectent pas la productivité des oliviers. Par rapport à la monoculture, le rendement du blé reste stable entre les systèmes. Cependant, le rendement de l'orge et des pois d'hiver diminue dans les systèmes agroforestiers. Néanmoins, le calcul du LER moyen montre un gain de production pour les systèmes agroforestiers à base d'oliviers par rapport à la monoculture, avec un LER supérieur à 1, quel que soit le type de sol.

Face aux conséquences du changement climatique, les performances agronomiques et environnementales des systèmes oléicoles traditionnels et agroforestiers divergent en fonction des conditions pédologiques. Sur un sol de Costière peu profond avec une réserve en eau utile limitée, le rendement des oliviers stagne, voire diminue sous climat futur, de même que le rendement des cultures intercalaires. En revanche, sur un sol de plaine profond avec une réserve en eau plus importante, le rendement des oliviers augmente sous climat futur. Cette augmentation s'explique par l'absence de stress hydrique pour les oliviers, une hausse du rayonnement global et des capacités photosynthétiques accrues. Cependant, cette augmentation des rendements doit être pondérée en raison des limites et incertitudes du modèle Hi-sAFé et des données météorologiques qui sont également issues d'un modèle. Bien que certaines oliveraies puissent connaître une hausse de rendement, des études ont démontré une diminution globale de la productivité des oliveraies sous climat futur (Bouregaa, 2019; Brilli et al., 2019; Fraga et al., 2020a, 2020b).

En outre, les systèmes agroforestiers (tous types de sols et périodes climatiques confondues) réduisent le ruissellement de l'eau (indicateur de l'érosion) et la lixiviation de l'azote, ce qui améliore les performances environnementales sur ces aspects.

Cette étude semble confirmer les performances agronomiques et environnementales supérieures des systèmes agroforestiers à base d'oliviers par rapport à des oliveraies traditionnelles, tant sous climat actuel que futur (projection climatique RCP 4.5). Considérés comme une stratégie d'adaptation face au changement climatique par les membres du GIEC, les systèmes agroforestiers ont démontré des performances agronomiques et environnementales plus importantes que des oliveraies traditionnelles. Cependant, des études supplémentaires sont nécessaires pour confirmer ces résultats prometteurs et explorer davantage le fonctionnement des systèmes agroforestiers à base d'oliviers dans différents contextes pédoclimatiques.

2) La première version de l'article (non soumis)

The impact of climate change on traditional and agroforestry systems based on olive tree, simulation on a French case study

AGROFORESTRY SYSTEMS

N. Barbault, N. Poulailon, C. Dupraz, P.E. Lauri, I. Lecomte, M. Gosme (ordre des noms non définitif)

ABSys, Univ Montpellier, CIHEAM-IAMM, CIRAD, INRAE, Institut Agro, Montpellier, France

nicolas.barbault@inrae.fr

Abstract

This article assesses the agronomic and environmental performances of olive grove and olive-tree based agroforestry systems, based on factors such as planting density, soil type, and climatic period. After cleaning and correcting climatic data (from 1951 to 2100), virtual experiments employing the Hi-sAFe model (v4.2) were conducted, and the outputs were analyzed. Soil type exerts an influence on the results. On hillslope soil, yields (both olives and intercrops) are diminished in the future compared to current yields. Performance also varies based on the system: olive yield remains steady across all systems, while agroforestry sustains olive productivity, both in current and future climates. Agroforestry systems exhibit Land Equivalent Ratios (LER) above 1, signifying increased production compared to monoculture plots. Climate change impacts diverge depending on pedological conditions: yields remain stable or decrease on hillslope soil, yet increase on flat soil due to reduced water stress and higher photosynthesis. Agroforestry systems mitigate water runoff and nitrogen leaching. The study underscores the agro-environmental advantages of olive-tree based agroforestry systems under past and future climates (RCP 4.5).

Keywords: Olive tree, agroforestry systems, olive grove, climate change, soil conditions

Acknowledgements:

We would like to thank Hélène Lasserre for sharing the soil description and technical itinerary data (hillslope soil).

Formatting of funding sources:

This work was supported by the Biodiversify project [European Union, PRIMA, 2020-2023]; and the Modolivier project [Fondation de France, 2020-2023].

Introduction

The olive tree is one of the iconic crops in the Mediterranean region and has been cultivated for hundreds of years for its fruits, olives. Thus, in the Mediterranean landscape, several olive-tree based systems coexist: i) traditional or extensive systems, characterized by low planting density (less than 140 olive trees ha⁻¹), ii) intensive or semi-intensive systems, with planting densities ranging from 140 to 400 trees ha⁻¹, and iii) super-intensive systems, with planting densities ranging from 400 to 2500 trees ha⁻¹ (Fernández-Escobar et al., 2013; Russo et al., 2016). These systems can be associated with environmental degradation such as soil loss and mineral content decrease (Beaufoy, 2001; Nawaz et al., 2013; Vanwalleghem et al., 2011) and biodiversity loss (Carpio et al., 2016; Gkisakis et al., 2016; Solomou and Sfougaris, 2015).

Furthermore, studies mention the vulnerability of olive-tree systems to the consequences of climate change. Since the pre-industrial period until today, the average surface temperature has increased by 1 C and continues to rise (Lee et al., 2023). To explore the consequences of climate change, the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) considered, in its 5th assessment report, four Representative Concentration Pathways (RCP) scenarios: RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, and RCP 8.5 (Lee et al., 2023). The RCP 2.6 scenario represents the most optimistic option drastically limiting greenhouse gas (GHG) emissions to meet the goals of the Paris Agreement. Its main objective is to keep global warming below 1.5 C. The RCP 4.5 scenario is considered an intermediate scenario, aiming to limit GHG emissions to a relatively low level by the end of the 21st century to keep global warming below 2 C. The RCP 6.0 scenario proposes measures to limit GHG emissions to a moderate level by the end of the 21st century, targeting a maximum warming of 3 C. Conversely, the RCP 8.5 scenario is regarded as the most pessimistic, assuming that GHG emissions will continue to increase at the current rate. In this scenario, a temperature increase of over 4 C is expected. Studies suggest that olive yields could decrease by 20% with just a 2 C increase in temperature. In non-irrigated systems in the Maghreb countries, yield reductions could reach 65% with a 3 C increase in average temperature (Bouregaa, 2019; Brilli et al., 2019; Fraga et al., 2020a).

As mentioned in the IPCC studies, agroforestry represents a relevant adaptation option to mitigate the consequences of climate change. Agroforestry is a farming practice that combines trees and crops (or animals) on the same plot (den Herder et al., 2017; USDA Agroforestry Strategic Framework, 2019). This practice can improve agronomic performance and increase the total yield of the plot (calculated with the Land Equivalent Ratio, LER), including for olive-tree based systems (Panozzo et al., 2020; Temani et al., 2021). These systems allow for better resource exploitation within the environment, relying on spatial and temporal complementarity between plants. However, agroforestry systems need to be further studied in terms of increased competition for resources (Dupraz and Liagre, 2011; Jose et al., 2000; Ong et al., 1998, 2014). They also contribute to improved environmental performance, such as erosion and leaching reduction, while creating a microclimate that benefits intercropping (Basche and

DeLonge, 2019; Bentrup et al., 2019; Bohada-Murillo et al., 2020; De Stefano and Jacobson, 2018; Fan et al., 2023; Jose et al., 2000; Monteith et al., 1991; Shi et al., 2018).

Currently, olive-tree based agroforestry systems are marginal compared to conventional production systems in France. However, olive-tree based agroforestry systems can be observed in the Mediterranean landscape, such as olive tree-grapevine, olive tree-vegetables, olive tree-MAP (Medicinal and Aromatic Plants) intercropping (Lasserre and Barbault, 2022; Lauri et al., 2019). These systems are being studied and seem to be developing. Nonetheless, it is worth noting that few studies explore the sustainability of these systems in the face of climate change.

Thus, the objective of this article is to study the agronomic and environmental performances of olive-tree based agroforestry systems and traditional olive orchards in the context of climate change. In this article, simulations are conducted using the Hi-sAFe model for a pedoclimatic context in the south of France (near Montpellier).

Materials & methods

The agroforestry model Hi-sAFe

In order to assess the agronomic and environmental performances of agroforestry systems, the Hi-sAFe agroforestry model was chosen (Figure 1). It is specifically designed to simulate the long-term development and productivity of agroforestry systems (Dupraz et al., 2019), and has been recently adapted to olive trees (Barbault et al., 2023).

This model simulates the development and productivity of agroforestry systems based on competitions for water, nitrogen, and light. In this model, the system is simplified as a 3D scene composed of cells. Each cell can contain species of trees (represented in 3D with simple geometric shapes) or intercropped crops (represented with STICS model (Brisson et al., 2003)). It is also possible to represent crop rotations over time. The soil is represented by a maximum of five layers, each with distinct pedological properties. To achieve three-dimensional volume units (3D), the layers are discretized into voxels (Dupraz et al., 2019).

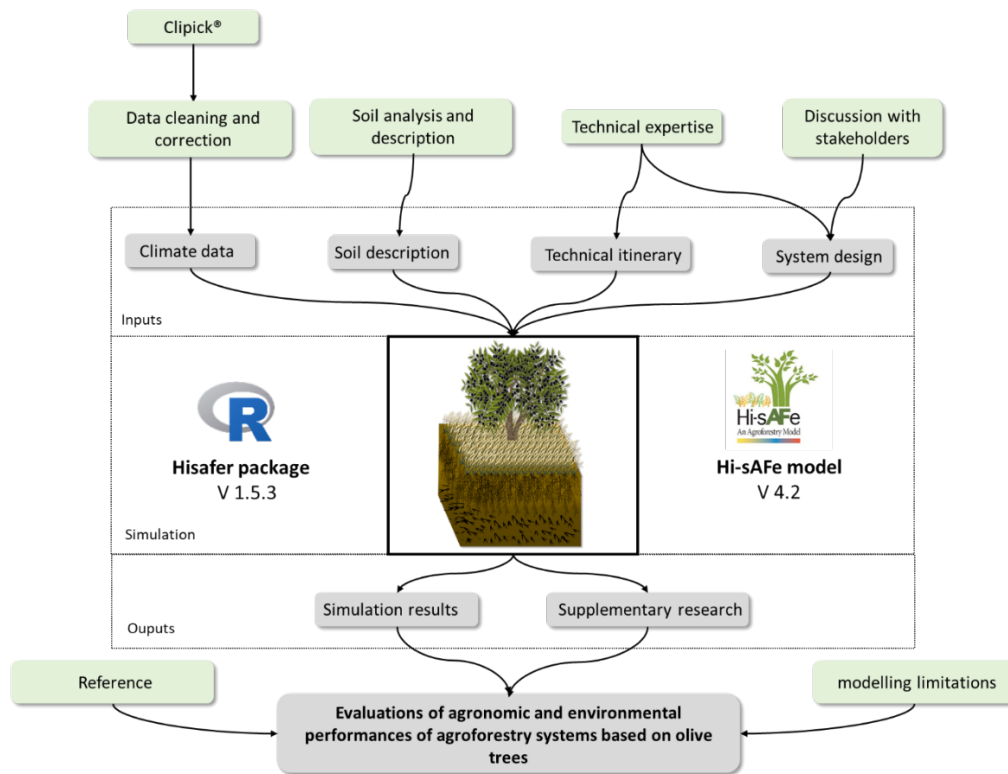


Figure 1: Schematic representation of the approach used to test the performance of olive-based systems in response to climate change.

The model consists of various input data, adjustable variables according to the user's needs, as well as parameterised, calibrated, and validated parameters. Thus, the user must provide the following elements as input data (Figure 1): i) climate database, ii) soil description, iii) technical itinerary for trees, iv) technical itinerary for intercropped crops, and v) system design to simulate.

Different types of variables can be explored as outputs of the model: i) development and productivity of intercropped crops, ii) development and productivity of fruit trees, iii) biogeochemical cycles (water, nitrogen, and carbon), and iv) tree root system.

To simulate fruit trees, version 4.2 of the model is used. This version has been parameterized (Barbault et al., 2023), calibrated, and validated for olive trees (Barbault et al. submitted).

Choice of climate scenario and acquisition of climate data

To explore the response of olive tree based agroforestry systems and traditional olive groves to climate change, the RCP 4.5 scenario is utilized, corresponding to a temperature increase of over 2.5°C by 2100 (Lee et al., 2023).

The climatic data for the period from 1951 to 2100 was downloaded using Clipick (Palma, 2017). These data were adjusted for input into the Hi-sAFe model, cleaned, and corrected for precipitation (progressive reduction of 13% in cumulative precipitation). As mentioned in the IPCC reports, precipitation is expected to decrease by 30% in Southern European countries. Consequently, when downloading climatic data, no difference in precipitation intensity was evident. Therefore, in order to align with this decreasing precipitation trend, the precipitation intensity has been adjusted by 13% (in cumulative precipitation over the study period). Only precipitation amounts have been altered to preserve seasonal and interannual variability (Reyes et al., 2021; Vautard et al., 2014).

To analyze the data, the 150-year climate sequence is divided into two periods: i) the past climate (1951 to 2025), and ii) the future climate (2026 to 2100). To differentiate between the development phases of olive trees (Gratsea et al., 2022; Stillitano et al., 2016), these two periods are further divided into two phases: i) the juvenile phase and ii) the mature phase (Figure 2).

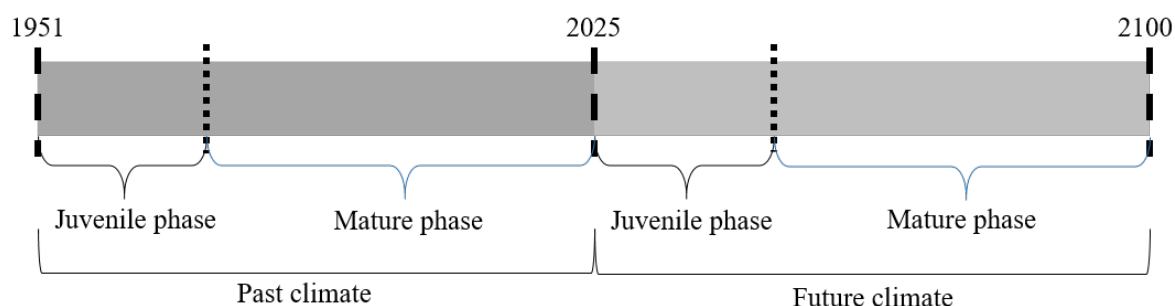


Figure 2: Timeline of climatic period. The RCP 4.5 scenario is divided into two climatic periods: past climate (1951-2025) and future climate (2025-2100). Each climate period is further divided in two phases corresponding to olive tree ageing juvenile and mature.

Description of the pedological context

The study compares two soil types: i) flat soil, sandy clay loam, with a depth of 2.4 m and very few stones, and ii) hillslope soil, typical of the Mediterranean region, with a depth of 0.7 m. The soils were parameterized using actual soils for which soil analyses were available. The shallow soil is based on a farmer's plot, the deep soil is based on an experimental plot near Montpellier where an olive-tree based agroforestry system is being developed.

Description of the virtual experimentation plan

To evaluate the performance of olive-tree based systems, several modalities compound the virtual experimentations: i) Intercropped control (three-year rotation), ii) Traditional olive grove, iii) Agroforestry: olive tree - low-density three-year rotation, iv) Agroforestry: olive tree - high-density three-year rotation. Two virtual experiments are conducted: one on a flat soil and the second on a hillslope soil.

The agricultural control, referred to as "TR" in the analyses, consists of a three-year rotation of winter pea, durum wheat, and barley. Spontaneous vegetation growth between cycles is also simulated. These systems are neither irrigated nor fertilized. Depending on the crops, the sowing date and sowing density may vary (Table I). Harvesting takes place on day 200.

Table I: Description of the sowing in the triennial rotation.

Crops	Sowing date (Day of year)	Sowing density (number of seeds/m ²)
Winter pea	344	72
Durum-wheat	297	311
Barley	300	268

The traditional olive grove, referred to as "TOG" in the analyses, consists of olive trees planted with a planting density of 7x7m (204 trees ha⁻¹). This olive grove is non-irrigated and non-fertilized. Permanent vegetation cover is maintained and cut once a year (DOY 135).

For the low-density agroforestry system, referred to as "LDA" in the analyses, olive trees are planted with a spacing of 9x9m (123 trees ha⁻¹). Similar to the previous system, the olive grove is non-irrigated and non-fertilized. In the inter-row spaces, the three-year rotation of winter pea, durum wheat, and barley is sown and harvested over a width of 4m. The same crop management plans as for the agricultural control.

For the high-density agroforestry system, referred to as "HDA" in the analyses, olive trees are planted with a spacing of 7x7m (204 trees ha⁻¹), as in the traditional olive grove. Similarly, the olive grove is non-irrigated and non-fertilized. In the inter-row spaces, the three-year rotation of winter pea, durum wheat, and barley is sown and harvested over a width of 6m, with the same crop management plans as the agricultural control.

In these different systems, olive trees are planted on the first day of simulation and initialized with a height of 30 cm. Canopy reduction interventions are scheduled from the 10th year (DOY 15) and performed if certain thresholds are exceeded.

Criteria for evaluating agronomic and environmental performances

In order to evaluate the agronomic and environmental performances of the systems, several output variables are selected from among the more than 500 variables simulated by Hi-sAFe model. To assess agronomic performance, the dynamics of the three-year crop production are analyzed, as well as the dynamics of olive production. Additionally, an annual Land Equivalent Ratio (LER)(Mead and Willey, 1980) (Equation 1) and a mean LER are calculated based on the climatic periods (Equation 2).

Equation n°1

$$LER_{AFS} = LER_{AFS-olive\ tree} + LER_{AFS-crops}$$

$$LER_{AFS-olive\ tree} = \frac{AFS\ yield\ of\ olive\ tree}{Control\ yield\ of\ olive\ tree}$$

$$LER_{AFS-crops} = \frac{AFS\ yield\ of\ crops}{Control\ yield\ of\ crops}$$

Equation n°2

$$LER_{AFS-climate} = LER_{AFS-olive\ tree} + LER_{AFS-crops}$$

$$LER_{AFS-olive\ tree} = \frac{\sum_{1951}^{2100} AFS\ yield\ of\ olive\ tree}{\sum_{1951}^{2100} Control\ yield\ of\ olive\ tree}$$

$$LER_{AFS-crops} = \left(\frac{1}{3} \times \left(\frac{\sum_{1951}^{2100} AFS\ yield\ of\ winter\ pea}{\sum_{1951}^{2100} Control\ yield\ of\ winter\ pea} \right) \right) + \left(\frac{1}{3} \times \left(\frac{\sum_{1951}^{2100} AFS\ yield\ of\ durum\ wheat}{\sum_{1951}^{2100} Control\ yield\ of\ durum\ wheat} \right) \right) + \left(\frac{1}{3} \times \left(\frac{\sum_{1951}^{2100} AFS\ yield\ of\ barley}{\sum_{1951}^{2100} Control\ yield\ of\ barley} \right) \right)$$

To assess environmental performances, variables related to the water and nitrogen cycles are analyzed, such as nitrogen leaching, soil water evaporation, soil water runoff, etc.

Statistical analyses

Comparisons between different soil types, systems and climatic periods are performed. To compare the systems among each other, after verifying the assumptions for the tests, parametric tests such as Student's t-test or ANOVA are conducted. In cases where the assumptions are not met, non-parametric tests like the Kruskal-Wallis test are performed, followed by post-hoc tests such as the Dunn's test.

Results

Agronomic performances

Yield of olive trees

Depending on the soil type (flat soil or hillslope soil), olive yield exhibits significant variations. In flat soil, olive trees will produce a higher quantity of olives than in the hillslope soil, with this difference being particularly pronounced during the mature phase of the olive tree's growth.

Furthermore, climate also plays a crucial role and appears to lead to a slight increase in olive yields under future climatic conditions compared to the past, especially in the flat soil. However, this increase is nearly negligible for hillslope soils. As a result, climate significantly enhances yields during the mature phase of olive trees, specifically for the TOG and LDA modalities (Figure 3).

Olive yields vary based on the system (TOG, HDA, LDA). In the TOG system, olive trees seem to be more productive than those in the LDA modalities. Indeed, the planting density is higher, leading to an increased yield per hectare. No significant difference is observed between the TOG and HDA modalities (Figure 3). The results of the statistical tests are available in the appendices (Appendix IV to IX).

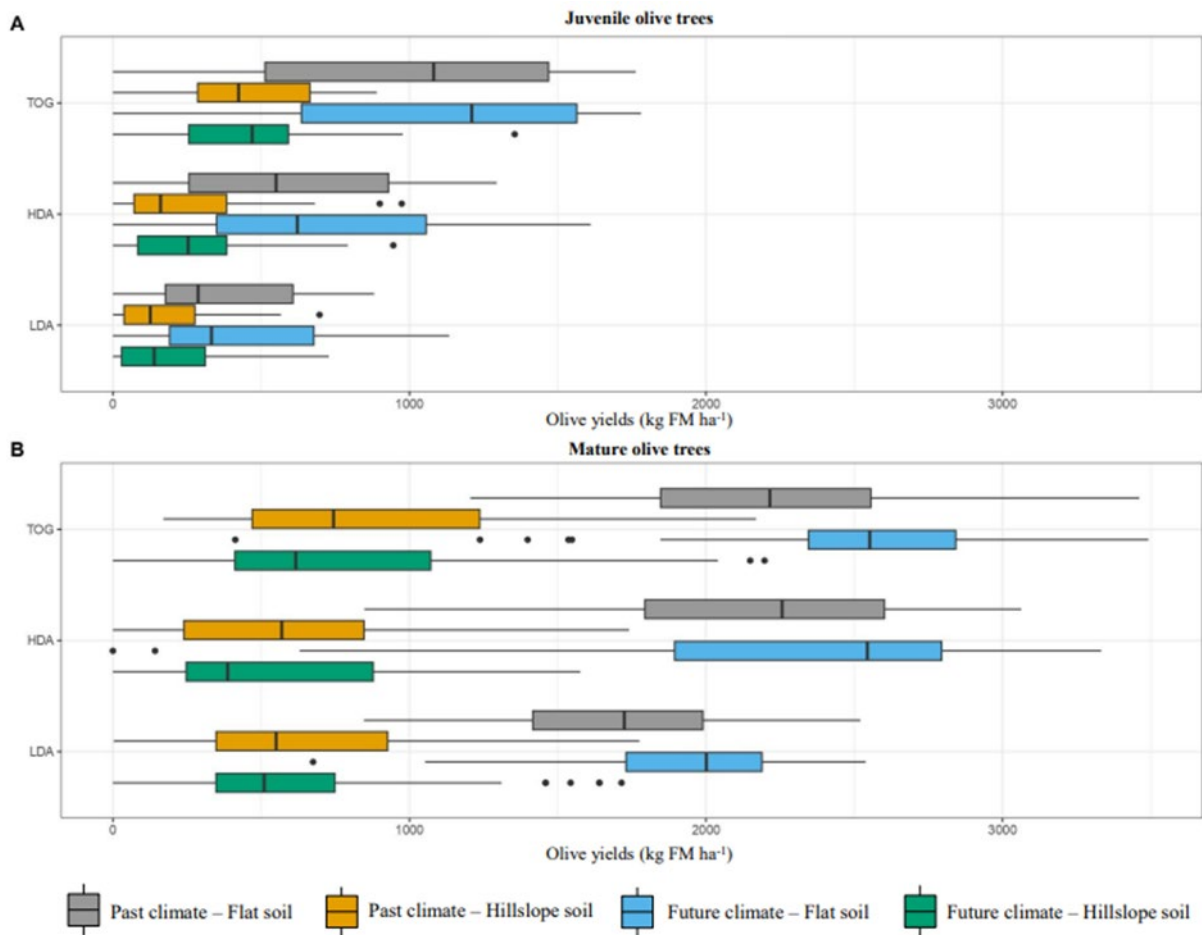


Figure 3: Boxplot of olive yields in fresh matter (kg ha⁻¹) as a function of climatic period, soil type and system, with A showing results for the juvenile phase of the olive trees and B showing yields for the mature phase. Comparison of yields as a function of climate and soil type for a given system and olive tree phases, Student's tests and Kruskal-Wallis tests with 95% significance level. Planting density: TOG (204 trees ha⁻¹), HDA (204 trees ha⁻¹) and LDA (123 trees ha⁻¹).

The yield of intercrops

On a hillslope soil, intercropping yields decrease compared to a deep flat soil. This difference is even more pronounced for winter pea and barley, while it is very slight for wheat.

Under future climate conditions, crop yields on hillslope soil decrease dramatically. However, on flat soil, crop yields vary depending on modalities and crops. For wheat and barley, yields slightly increase (+2%) under future climate in the control rotation modality. Conversely, under future climate and agroforestry modalities, yields decrease. For winter pea, pea yield decreases under future climate in all modalities.

Crop yields vary depending on modalities. For wheat, yields remain stable regardless of the modality. On the other hand, for barley and winter pea, yields are higher in the agricultural control modality than in the agroforestry systems (LDA and HAD modalities) (Figure 4).

Supplementary data, including tables for each crop with average yields, cumulative yields, and other information, are available (Appendix I).

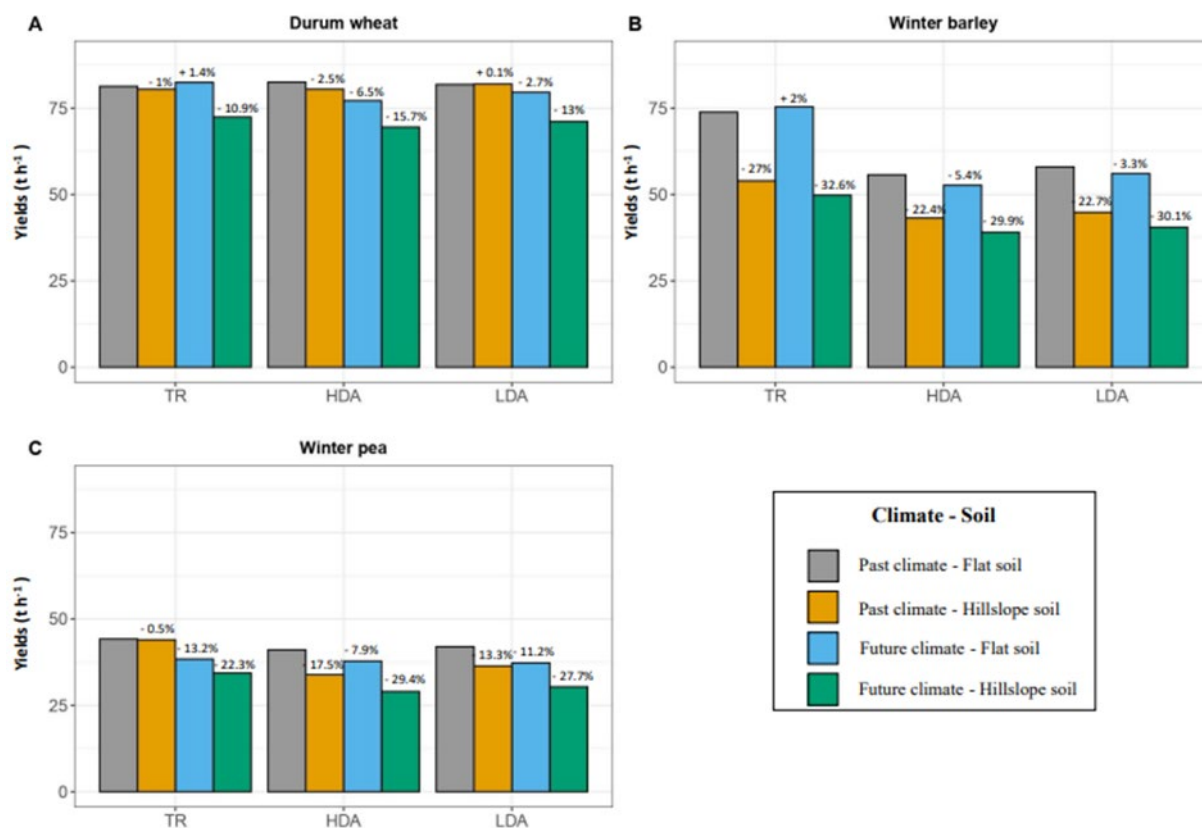


Figure 4: Barplot of crops yields cumulated (kg ha⁻¹) as a function of climatic period, soil type and system, with A showing results for durum wheat, B for barley and C for winter pea. Planting density: TOG (204 trees ha⁻¹), HDA (204 trees ha⁻¹) and LDA (123 trees ha⁻¹).

LER

For a deep flat soil, under past climate conditions, the average LER is 1.75 and 1.57 for the HDA and LDA systems, respectively. Under future climate conditions, the average LER is 1.72 and 1.59 for the HDA and LDA systems, respectively (Figure 5 A and B).

For a hillslope soil, under past climate conditions, the average LER is 1.38 and 1.53 for the HDA and LDA systems, respectively. Under future climate conditions, the average LER is 1.4 and 1.51 for the HDA and LDA systems, respectively (Figure 5 C and D).

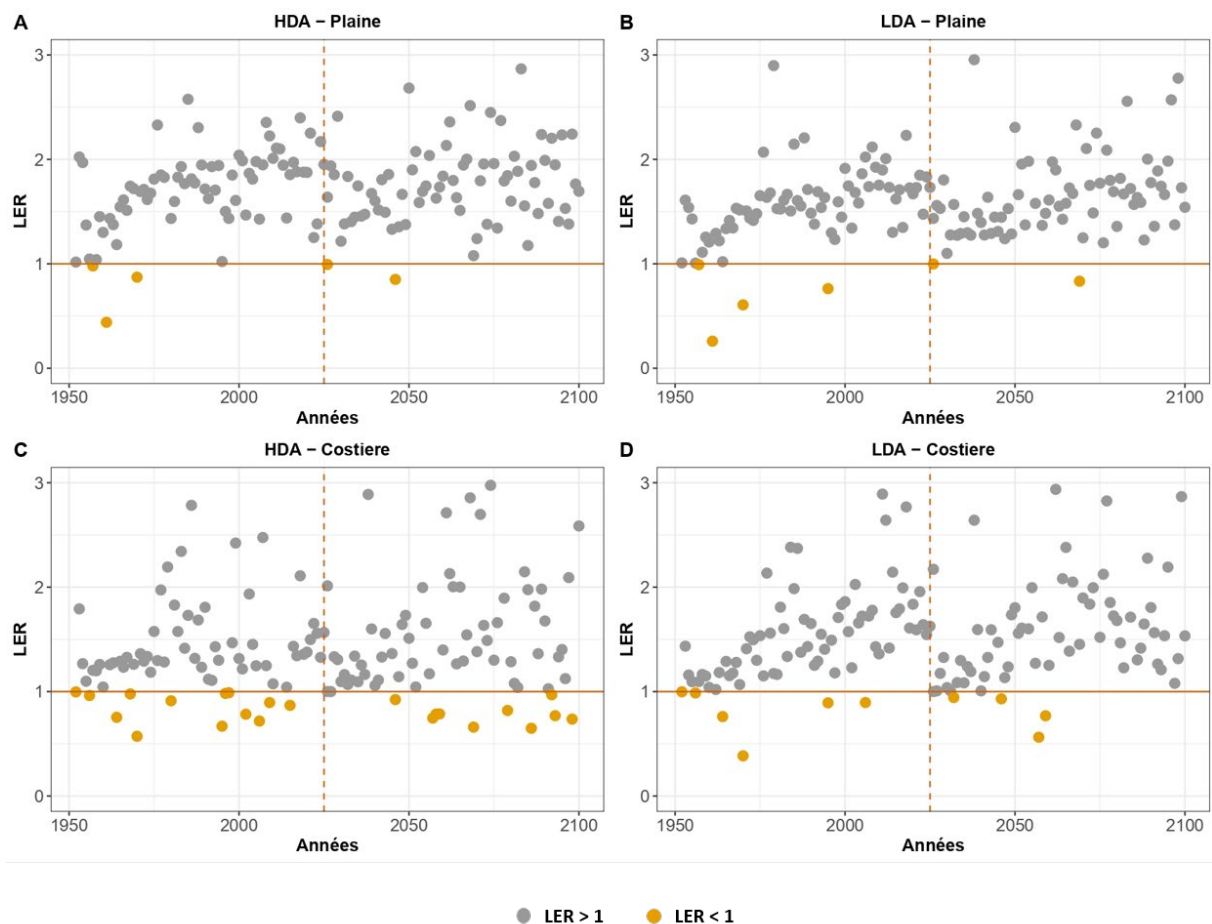


Figure 5: Scatter plot of annual LER values, with A showing results for the HDA system with “Flat” soil, B for the LDA system with “Flat” soil, C for the HDA system with “hillslope” soil and D for LDA system with “hillslope” soil. A point represents a LER value for a given year and soil type (in orange, LERs < 1 soil and in grey, LERs > 1). Presence of a horizontal axis with a threshold of one, and a dotted vertical axis in 2025 to separate the past and future climate.

Tree water stress

To assess competition for resources, two stresses are studied for trees: water stress and nitrogen stress.

For water stress, olive trees on hillslope soil experience very high levels of stress, while olive trees on flat soils are rarely stressed. For comparison, on a flat soil in summer and under past climate conditions, olive trees over a 75-year period are subjected to only 8, 165, and 0 days of very severe water stress for the TOG, HDA, and LDA modalities, respectively. Under the same conditions but on a hillslope soil, olive trees experience 2982, 3482, and 2864 days of very severe water stress, respectively, for the TOG, HDA, and LDA modalities. The same pattern holds for nitrogen stress.

Water stresses are also more frequent and severe under future climate conditions. For comparison, on a flat soil in summer and under past climate conditions, olive trees over a 75-year period experience only 87, 120, and 82 days of significant water stress for the TOG, HDA, and LDA modalities, respectively. Under the same conditions but under future climate, olive trees are subjected to 222, 299, and 103 days of significant water stress, respectively, for the TOG, HDA, and LDA modalities. This difference is even more pronounced on a hillslope soil. In contrast, nitrogen stress does not increase and even appears to decrease.

Water stresses also appear to vary depending on the systems. Olive trees in the agroforestry system HDA generally experience more days of water stress than olive trees in the TOG and LDA systems. The same pattern applies to nitrogen stress.

Additional information regarding water and nitrogen constraints is provided in the appendix (Appendix II et Appendix III). These stresses for the tree are assessed, considering various systems, soil types, and climatic conditions, for each of the four seasons of the year (spring, summer, autumn, and winter).

Environmental performances

To assess the environmental performances of different systems based on climatic periods and soil types, several variables are analyzed, including nitrogen leaching, water runoff and soil water evaporation.

Nitrogen leaching

Nitrogen leaching is reduced on a hillslope plot compared to a flat soil. Similarly, nitrogen leaching decreases under future climate conditions. Nitrogen leaching also varies between systems: in agroforestry systems (LDA and HDA modalities), leaching can be reduced by 40% compared to an olive grove (TOG modality) (Figure 6).

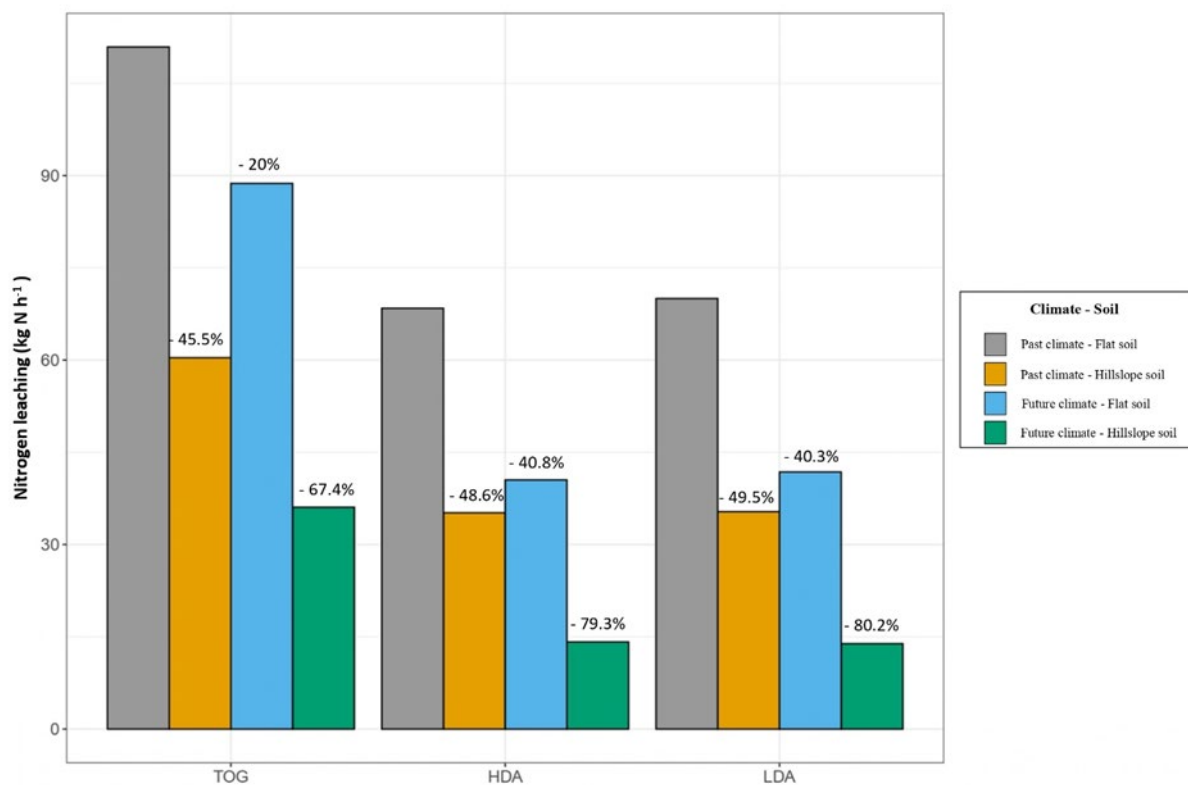


Figure 6: Barplot of cumulative nitrogen leaching over 75 years (kg N ha⁻¹) as a function of system, soil and period. Planting density: TOG (204 trees ha⁻¹), HDA (204 trees ha⁻¹) and LDA (123 trees ha⁻¹).

Water runoff

Water runoff is increase on a hillslope plot compared to a flat soil. In contrast, water runoff decreases under future climate conditions. Water runoff varies minimally among the different systems (Figure 7).

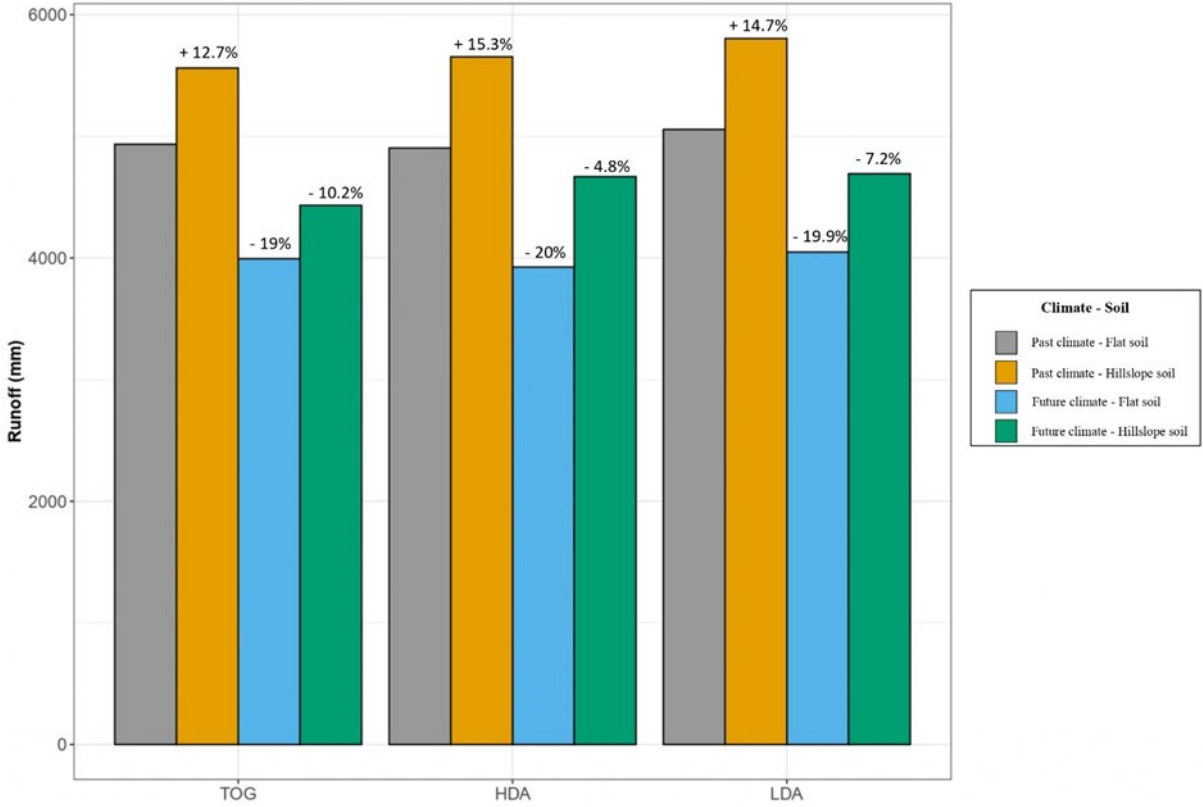


Figure 7: Barplot of cumulative runoff over 75 years (mm) as a function of system, soil and period. Planting density: TOG (204 trees ha-1), HDA (204 trees ha-1) and LDA (123 trees ha-1).

Soil water evaporation

Soil water evaporation is increased on a hillslope plot compared to a flat soil. In contrast, soil water evaporation decreases under future climate conditions. Soil water evaporation also varies between systems: in agroforestry systems (LDA and HDA modalities), soil water evaporation can be increased compared to an olive grove (TOG modality) (Figure 8).

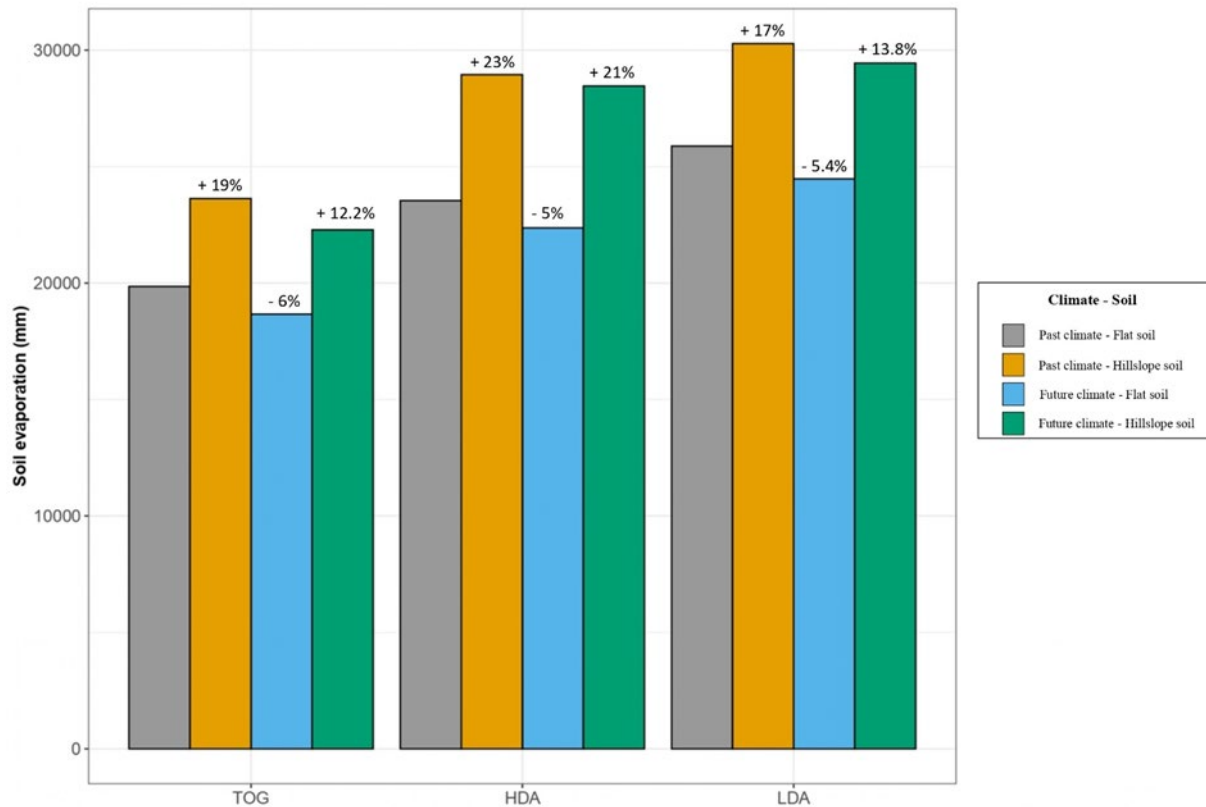


Figure 8: Barplot of cumulative soil evaporation over 75 years (mm) as a function of system, soil and period. Planting density: TOG (204 trees ha⁻¹), HDA (204 trees ha⁻¹) and LDA (123 trees ha⁻¹).

Discussion

Impact of the soil context

In terms of agronomic performances, olive orchards are known to produce more yield in deep soils compared to those on shallow hillslope soils. Our study confirms this trend. This difference in yield can be partially attributed to a better resource supply on richer and deeper soils. Olive trees on hillslope soils experience significantly more days of water and nitrogen stress than olive trees on flat soils. Similar to olive production, intercropped crop yields are reduced on hillslope soils compared to flat soils. In reality, it is impossible to distinguish the effect of soil and system, because traditional systems are cultivated on slopes and poor soils, resulting in lower yields while semi-intensive and intensive systems are planted in valleys, leading to higher yields (Fraga et al., 2020a; Russo et al., 2016). Modelling allows disentangling these effects. For example, our results show that in the deep soil, agroforestry systems (HDA) allow similar olive yield as traditional orchards (TOG) for mature trees in the past climate, while in the shallow soil, agroforestry conditions reduce olive yield compared to the traditional orchard. This leads to the LER of agroforestry systems being higher in the deep soil than in the shallow soil, and to the “best” agroforestry system being different in shallow and deep soils: in the deep soil, the high density agroforestry system (204 trees/ha) has the best LER, while in the shallow soil, it is preferable to reduce the density of trees (123 trees/ha) to obtain the best LER.

For environmental performances, hillslope soils show reduced nitrogen leaching and increased water runoff and soil evaporation compared to flat soils. Hillslope soils are nitrogen-deficient, leading to reduced leaching. Moreover, due to water scarcity (pronounced water stress), hillslope soils have lower

vegetation cover. This lack of cover makes the soil more susceptible to erosion through water runoff. Additionally, the reduced vegetation cover leads to higher water evaporation from the soil compared to flat soils.

Impact of production systems

This study also enables a comparison of different cultivation systems: traditional olive orchards (TOG, with a planting density of 204 trees/ha), an agroforestry system (LDA, with a planting density of 123 trees/ha), and another agroforestry system (HDA, with a planting density of 204 trees/ha).

In terms of agronomic performances, olive production does not seem to be affected in olive-tree based agroforestry systems, nor does wheat production. As demonstrated in previous studies, olive yields do not decrease between control and agroforestry modalities (Panozzo et al., 2020; Temani et al., 2021, 2018). The olive tree is a drought-tolerant species and is therefore capable of adapting to water competition with intercropped crops (Moriani et al., 2003; Temani et al., 2021). However, the production of barley and winter pea decreases significantly. When analyzing the average LER for each system, it consistently remains above 1.38, indicating that agroforestry systems are more productive than two separate monoculture plots (Mead and Willey, 1980). The LER even reaches 1.75 for the past climate in flat areas and the HDA system. On hillslope soils, the agroforestry system LDA is more productive than the HDA system. Conversely, on flat soils, the agroforestry system HDA will be more productive based on the average LER. As mentioned in the literature, agroforestry systems often exhibit average LER values exceeding 1 and can reach up to 2.42 depending on soil types and systems (Amassaghrou et al., 2023; Panozzo et al., 2020; Temani et al., 2021).

Regarding environmental performances, in olive-tree based agroforestry systems, nitrogen leaching is reduced, while soil water evaporation increases. However, water runoff remains unchanged. Furthermore, in agroforestry systems, a greater amount of carbon is stored in the soil compared to traditional olive orchards.

Impact of climatic periods

In terms of agronomic performances, under future climate conditions and on hillslope soils, olive trees exhibit stable or slightly decreased yields. However, under future climate conditions and on flat soils, olive yields increase. This surprising yield increase can be explained by several factors that depend on pedoclimatic conditions. Under future climate conditions, precipitation decreases, and temperatures rise. Interestingly, this change appears to favor olive-tree cultivation on deep soils. In the Montpellier region, the annual water regime exceeds 750 mm/year under both past and future climates. To be limiting, precipitation must be below 500 mm/year for a density of 200 trees/ha in a non-irrigated system (Masmoudi-Charfi and Mechlia, 2008). In an article by Morugan-Corondo et al., 2020, the suggested limit is even lower, at 470 mm of precipitation (Morugán-Coronado et al., 2020). For survival, the threshold is 350 mm/year (Ponti et al., 2014). Water needs are met in deep soils in both past and future climate. However, on shallow hillslope soils, the olive tree experiences more water stress due to limited water resource availability. Under future climate conditions, the lack of precipitation will lead to stagnation or even a decrease in yields. Furthermore, the photosynthetic capacity of plants can be boosted by climate warming. The increase in temperatures can enhance the photosynthetic activity of plants. The olive tree exhibits optimal photosynthetic activity between 15 and 25°C, and no photosynthesis above 35°C and below 0°C (Koubouris et al., 2009; Mancuso and Azzarello, 2002; Moriondo et al., 2013). In the model, the Leaf-Level Light Use Efficiency Temperature (LUE Temperature) stress index is used to measure and quantify the stress on the photosynthetic capacity of trees. Thus, under future climate conditions, our simulation results indicate a decrease in thermal stress and consequently an increase in photosynthetic capacity, particularly in autumn and winter. Moreover, upon analyzing the meteorological database, a slight increase in overall radiation is visible in spring and

summer. While not statistically significant ($P=0.12$ and 0.08 , respectively for spring and summer), a trend towards increased overall radiation might, to a lesser extent, explain a slight yield increase through optimal photosynthetic capacity. However, this study does not account for the risks of flower, fruit, and shoot burning due to more frequent and intense heatwaves (Koubouris et al., 2009; López-Bernal et al., 2018). Furthermore, it should be noted that the Hi-sAFe model does not consider the impact of pests on olive trees. Under more favorable conditions, the number of pest generations may increase, leading to more significant damage to both olive trees and olives. Currently, limited data or predictions are available regarding the distribution and dynamics of pests (Caselli and Petacchi, 2021). This yield increase must therefore be taken with caution. For intercropped crops, productivity can also be influenced by climate change. For wheat and barley, production increases under future climate conditions for the monoculture system. Similar results have been found for walnut-wheat systems (Reyes et al., 2021). However, the production of winter pea decreases, and the production of wheat and barley in agroforestry also decreases. As demonstrated in the literature, intercropped crop yields tend to decrease in agroforestry systems (Amassaghrou et al., 2023, 2021; Mantzanas et al., 2021; Morugán-Coronado et al., 2020; Temani et al., 2021, 2018) mainly due to competition for resources. However, under certain conditions, intercropped crops can exhibit higher biomass and production (Arenas-Corraliza et al., 2021; Haddad et al., 2023). To reduce competition (for water, nutrients, and light) between olive trees and intercropped crops, it is advisable to adjust the width of the cultivated area according to the dimensions of the olive tree. For an olive tree with a height of seven meters, it is recommended to plant more than two meters away from the trunk to avoid significant reductions in the growth and yields of both crops (Razouk et al., 2016). This decrease can be partially attributed to increased water competition between olive trees and intercropped crops, particularly more significant under future climate conditions due to reduced precipitation levels compared to the past climate. Climate change will indeed impact crop yields. However, the specific impact of climate change can vary based on soil types, available water reserves, and technical management practices (Burgess et al., 2022). Under certain conditions, the latter can even provide an advantage in production. However, these findings should be taken with caution as they are based solely on simulation results, which come with various limitations and uncertainties. Other studies have found that olive yields should decrease under future climate conditions (Bouregaa, 2019; Brillì et al., 2019; Fraga et al., 2020b). The temperature increase will impact the phenology of olive trees (Fraga et al., 2019; Villalobos et al., 2006) and thus affect the quantity and quality of yields (Fraga et al., 2020b). Furthermore, drought events and heatwaves will have a negative impact on yields. However, the increase in atmospheric CO_2 levels, whose effect is not yet represented in the model, could also potentially contribute to enhancing olive tree productivity (Kheir et al., 2019). However, the effect of climate change will be heterogeneous based on pedoclimatic conditions (Cabezas et al., 2020) and in some cases, productivity could increase (Orlandi et al., 2020; Ponti et al., 2014). The impact of climate change appears challenging to predict due to numerous inaccuracies and uncertainties. However, studies converge on the notion that in arid and semi-arid regions, climate change will lead to a decrease in olive yields (Fraga et al., 2020a).

In terms of environmental performances, under future climate conditions, due to decreased precipitation, nitrogen leaching and water runoff are reduced (Guettaf, 2021). Our study corroborates these findings. Furthermore, with reduced precipitation, the amount of evaporated water is also decreased under future climate conditions. As demonstrated by studies, the environmental performances of olive-tree based agroforestry systems are superior to traditional olive orchards. For instance, the soils are richer and better structured, erosion and water runoff are reduced, and carbon storage is higher compared to traditional olive orchards. (Amassaghrou et al., 2016; Jose, 2009; Jose et al., 2000; Ong et al., 1998; Ramachandran Nair et al., 2010; Shi et al., 2018).

Conclusion & perspectives

This study evaluated the agronomic and environmental performances of traditional olive systems and agroforestry systems, varying planting densities, soil types (hillslope or flat soil), and climatic period (past and future).

Agroforestry systems exhibited varying production dynamics depending on soil type. In hillslope soils, the productivity of olive trees and crops was reduced due to water and nitrogen constraints. However, resource competition did not alter olive tree yields in these systems, although intercropped crop yields (barley and winter peas) decreased. Agroforestry systems demonstrated a favorable LER ratio, indicating an overall productivity gain compared to monocultures. These systems also outperformed traditional olive orchards in terms of productivity and environmental performances, with reduced nitrogen leaching and water runoff. In the face of climate change (RCP 4.5 scenario), results showed divergent agronomic and environmental performances based on soil characteristics. Hillslope plots experienced stagnating or diminishing yields, while flat soils potentially saw yield increases. These increases could be attributed to factors such as increased photosynthetic capacity in autumn and winter, a mild water stress (despite reduced precipitation), and increased overall radiation.

However, it is important to note that these results are nuanced by uncertainties in the Hi-sAFe model and climate data derived from a climate model. The Hi-sAFe model does not account for certain thermal stresses, leaf burns, and pest impacts on crops. Additionally, despite potential yield increases in some scenarios, other studies suggest an overall decline in olive tree productivity under future climates. Interestingly, these results are opposite to what was found in other pedoclimatic conditions (Bouregaa, 2019; Brilli et al., 2019; Fraga et al., 2020b). Further research is thus necessary to disentangle the effects of thermal and water stresses. Conversely, in cases of deep soil and significant water reserves, olive tree productivity may increase, as simulated in our study.

Furthermore, these results stem from meteorological data of the RCP 4.5 scenario. In this intermediate scenario, the objective is to limit global warming below 2°C. However, given the current climatic context and the recent record-breaking temperature highs, conducting this analysis with climate data from the RCP 8.5 scenario, aimed at limiting global warming below 4°C, would be interesting.

In response to climate change, it is essential to implement adaptation and mitigation strategies recommended by the IPCC. Agroforestry stands out as a promising practice to enhance both agronomic and environmental performances, as suggested by our study. Nonetheless, further research is necessary to deepen our understanding of these systems, under both past and future climates.

Reference

- Amassaghrou, A., Barkaoui, K., Bouaziz, A., Alaoui, S.B., Fatemi, Z.E.A., Daoui, K., 2023. Yield and related traits of three legume crops grown in olive-based agroforestry under an intense drought in the South Mediterranean. *Saudi J. Biol. Sci.* 30, 103597. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2023.103597>
- Amassaghrou, A., Bouaziz, A., Daoui, K., Belhouchette, H., Ezzahouani, A., Barkaoui, K., 2021. Productivité et efficacité des systèmes agroforestiers à base d'oliviers au Maroc: cas de Moulay Driss Zerhoun. *Cah. Agric. EDP Sci.* 30. <https://doi.org/10.1051/cagri/2020041>
- Amassaghrou, A., Bouaziz, A., Karrou, M., Barkaoui, K., Razouk, R., Daoui, K., 2016. Agroforestry systems in Morocco, grain legumes and olive trees in Saïs region: Moulay Driss Zerhoun case. Presented at the Marrakech, International Conference on Pulses (ICP). Daoui K on Jul, p. 2016.
- Arenas-Corraliza, M.G., López-Díaz, M.L., Rolo, V., Moreno, G., 2021. Wheat and barley cultivars show plant traits acclimation and increase grain yield under simulated shade in Mediterranean conditions. *J. Agron. Crop Sci.* 207, 100–119. <https://doi.org/10.1111/jac.12465>
- Barbault, N., Dupraz, C., Lauri, P.E., Gosme, M., 2023. Parametrization of an agroforestry model: from forest trees to olive trees. *Acta Hort.* 211–218. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2023.1366.24>

- Basche, A.D., DeLonge, M.S., 2019. Comparing infiltration rates in soils managed with conventional and alternative farming methods: A meta-analysis. *PLoS One* 14, e0215702.
- Beaufoy, G., 2001. EU Policies for olive farming-Unsustainable on all Counts. [Httpwww Wwf Org Ukfilelibrarypdfoliveoil Pdf](http://www.wwf.org.uk/filelibrary/pdf/oliveoil.pdf).
- Bentrup, G., Hopwood, J., Adamson, N.L., Vaughan, M., 2019. Temperate Agroforestry Systems and Insect Pollinators: A Review. *Forests* 10, 981. <https://doi.org/10.3390/f10110981>
- Bohada-Murillo, M., Castaño-Villa, G.J., Fonturbel, F.E., 2020. The effects of forestry and agroforestry plantations on bird diversity: A global synthesis. *Land Degrad. Dev.* 31, 646–654.
- Bouregaa, T., 2019. Impact of climate change on yield and water requirement of rainfed crops in the Setif region. *Manag. Environ. Qual. Int. J.* 30, 851–863.
- Brilli, L., Lugato, E., Moriondo, M., Gioli, B., Toscano, P., Zaldei, A., Leolini, L., Cantini, C., Caruso, G., Gucci, R., Merante, P., Dibari, C., Ferrise, R., Bindi, M., Costafreda-Aumedes, S., 2019. Carbon sequestration capacity and productivity responses of Mediterranean olive groves under future climates and management options. *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Change* 24, 467–491. <https://doi.org/10.1007/s11027-018-9824-x>
- Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., 2003. An overview of the crop model STICS. *Eur. J. Agron.* 18, 309–332. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00110-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00110-7)
- Burgess, A.J., Cano, M.E.C., Parkes, B., 2022. The deployment of intercropping and agroforestry as adaptation to climate change. *Crop Environ.* 1, 145–160.
- Cabezas, J., Ruiz-Ramos, M., Soriano, M., Gabaldón-Leal, C., Santos, C., Lorite, I., 2020. Identifying adaptation strategies to climate change for Mediterranean olive orchards using impact response surfaces. *Agric. Syst.* 185, 102937.
- Carpio, A.J., Oteros, J., Tortosa, F.S., Guerrero-Casado, J., 2016. Land use and biodiversity patterns of the herpetofauna: The role of olive groves. *Acta Oecologica* 70, 103–111. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2015.12.007>
- Caselli, A., Petacchi, R., 2021. Climate change and major pests of Mediterranean olive orchards: are we ready to face the global heating? *Insects* 12, 802.
- De Stefano, A., Jacobson, M.G., 2018. Soil carbon sequestration in agroforestry systems: a meta-analysis. *Agrofor. Syst.* 92, 285–299.
- den Herder, M., Moreno, G., Mosquera-Losada, R.M., Palma, J.H.N., Sidiropoulou, A., Santiago Freijanes, J.J., Crous-Duran, J., Paulo, J.A., Tomé, M., Pantera, A., Papanastasis, V.P., Mantzanas, K., Pachana, P., Papadopoulos, A., Plieninger, T., Burgess, P.J., 2017. Current extent and stratification of agroforestry in the European Union. *Agric. Ecosyst. Environ.* 241, 121–132. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.03.005>
- Dupraz, C., Liagre, F., 2011. *Agroforesterie. Des arbres et des cultures.*, France Agricole. ed, Agriproduction.
- Dupraz, C., Wolz, K., Lecomte, I., Talbot, G., Vincent, G., Mulia, R., Bussièrre, F., Ozier-Lafontaine, H., Andrianarisoa, S., Jackson, N., Lawson, G., Dones, N., Sinoquet, H., Lusiana, B., Harja, D., Domenicano, S., Reyes, F., Gosme, M., Van Noordwijk, M., 2019. Hi-sAFe: A 3D Agroforestry Model for Integrating Dynamic Tree–Crop Interactions. *Sustainability* 11, 2293. <https://doi.org/10.3390/su11082293>
- Fan, X., Hao, X., Zhang, S., Zhao, Z., Zhang, J., Li, Y., 2023. *Populus euphratica* counteracts drought stress through the dew coupling and root hydraulic redistribution processes. *Ann. Bot.*
- Fernández-Escobar, R., De la Rosa, R., Leon, L., Gomez, J., Testi, L., Orgaz, F., Gil-Ribes, J., Quesada-Moraga, E., Trapero, A., Masallem, M., 2013. Evolution and sustainability of the olive production systems. *Options Mediterr.* 106, 11–42.

- Fraga, H., Moriondo, M., Leolini, L., Santos, J.A., 2020a. Mediterranean olive orchards under climate change: A review of future impacts and adaptation strategies. *Agronomy* 11, 56.
- Fraga, H., Pinto, J.G., Santos, J.A., 2019. Climate change projections for chilling and heat forcing conditions in European vineyards and olive orchards: A multi-model assessment. *Clim. Change* 152, 179–193.
- Fraga, H., Pinto, J.G., Viola, F., Santos, J.A., 2020b. Climate change projections for olive yields in the Mediterranean Basin. *Int. J. Climatol.* 40, 769–781.
- Gkisakis, V., Volakakis, N., Kollaros, D., Bàrberi, P., Kabourakis, E.M., 2016. Soil arthropod community in the olive agroecosystem: Determined by environment and farming practices in different management systems and agroecological zones. *Agric. Ecosyst. Environ.* 218, 178–189.
- Gratsea, M., Varotsos, K., López-Nevado, J., López-Feria, S., Giannakopoulos, C., 2022. Assessing the long-term impact of climate change on olive crops and olive fly in Andalusia, Spain, through climate indices and return period analysis. *Clim. Serv.* 28, 100325.
- Guettaf, R., 2021. Utilisation de l'eau et de l'azote par les cultures associées: olivier-orge et olivier-pois fourrager dans les systèmes agroforestier de la région d'El Eulma.
- Haddad, B., Lambarraa-Lehnhardt, F., Bouras, F.-Z., Kherif, O., Zemmouri, B., Seghouani, M., Guettaf, F., Ferhat, M., Latati, M., 2023. Comparative assessment of agroforestry performances between pea and barley intercropping with olive tree under semi-arid Mediterranean conditions. *Res. Sq.*
- Jose, S., 2009. Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. *Agrofor. Syst.* 76, 1–10. <https://doi.org/10.1007/s10457-009-9229-7>
- Jose, S., Gillespie, A., Seifert, J., Biehle, D., 2000. Defining competition vectors in a temperate alley cropping system in the midwestern USA: 2. Competition for water. *Agrofor. Syst.* 48, 41–59.
- Kheir, A.M., El Baroudy, A., Aiad, M.A., Zoghdan, M.G., Abd El-Aziz, M.A., Ali, M.G., Fullen, M.A., 2019. Impacts of rising temperature, carbon dioxide concentration and sea level on wheat production in North Nile delta. *Sci. Total Environ.* 651, 3161–3173.
- Koubouris, G.C., Metzidakis, I.T., Vasilakakis, M.D., 2009. Impact of temperature on olive (*Olea europaea* L.) pollen performance in relation to relative humidity and genotype. *Environ. Exp. Bot.* 67, 209–214. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.06.002>
- Lasserre, H., Barbault, N., 2022. Complantations à base d'oliviers: un exemple de système agroforestier. *Nouv. Oliv.* 129, 34–30.
- Lauri, P.-É., Barkaoui, K., Ater, M., Rosati, A., 2019. Agroforestry for fruit trees in Europe and Mediterranean North Africa, in: *Burleigh Dodds Series in Agricultural Science*. Burleigh Dodds Science Publishing, pp. 385–418. <https://doi.org/10.19103/AS.2018.0041.18>
- Lee, H., Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., 2023. Synthesis report of the IPCC sixth assessment report (AR6).
- López-Bernal, Á., Morales, A., García-Tejera, O., Testi, L., Orgaz, F., De Melo-Abreu, J.P., Villalobos, F.J., 2018. OliveCan: A Process-Based Model of Development, Growth and Yield of Olive Orchards. *Front. Plant Sci.* 9, 632. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00632>
- Mancuso, S., Azzarello, E., 2002. Heat tolerance in olive. *Heat Toler. Olive* 1000–1006.
- Mantzanas, K., Pantera, A., Koutsoulis, D., Papadopoulos, A., Kapsalis, D., Ispikoudis, S., Fotiadis, G., Sidiropoulou, A., Papanastasis, V.P., 2021. Intercrop of olive trees with cereals and legumes in Chalkidiki, Northern Greece. *Agrofor. Syst.* 95, 895–905. <https://doi.org/10.1007/s10457-021-00618-6>
- Masmoudi-Charfi, C., Mechlia, N.B., 2008. Changes in olive tree height growth during the first years of cultivation. *Adv. Hortic. Sci.* 8–12.
- Mead, R., Willey, R., 1980. The concept of a 'land equivalent ratio' and advantages in yields from intercropping. *Exp. Agric.* 16, 217–228.

- Monteith, J., Ong, C., Corlett, J., 1991. Microclimatic interactions in agroforestry systems. *For. Ecol. Manag.* 45, 31–44.
- Moriana, A., Orgaz, F., Pastor, M., Fereres, E., 2003. Yield responses of a mature olive orchard to water deficits. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 128, 425–431.
- Moriondo, M., Trombi, G., Ferrise, R., Brandani, G., Dibari, C., Ammann, C.M., Lippi, M.M., Bindi, M., 2013. Olive trees as bio-indicators of climate evolution in the Mediterranean Basin: Impact of climate change on olive tree distribution. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 22, 818–833. <https://doi.org/10.1111/geb.12061>
- Morugán-Coronado, A., Linares, C., Gómez-López, M.D., Faz, Á., Zornoza, R., 2020. The impact of intercropping, tillage and fertilizer type on soil and crop yield in fruit orchards under Mediterranean conditions: A meta-analysis of field studies. *Agric. Syst.* 178, 102736.
- Nawaz, M.F., Bourrié, G., Trolard, F., 2013. Soil compaction impact and modelling. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 33, 291–309. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0071-8>
- Ong, C., Black, C., Wilson, J., Muthuri, C., Bayala, J., Jackson, N., 2014. Agroforestry: hydrological impacts.
- Ong, C., Deans, J., Wilson, J., Mutua, J., Khan, A., Lawson, E., 1998. Exploring below ground complementarity in agroforestry using sap flow and root fractal techniques. *Agrofor. Syst.* 44, 89–106.
- Orlandi, F., Rojo, J., Picornell, A., Oteros, J., Pérez-Badia, R., Fornaciari, M., 2020. Impact of climate change on olive crop production in Italy. *Atmosphere* 11, 595.
- Palma, J.H.N., 2017. CliPick – Climate change web picker. A tool bridging daily climate needs in process based modelling in forestry and agriculture. *For. Syst.* 26, eRC01. <https://doi.org/10.5424/fs/2017261-10251>
- Panozzo, A., Bernazeau, B., Desclaux, D., 2020. Durum wheat in organic olive orchard: good deal for the farmers? *Agrofor. Syst.* 94, 707–717. <https://doi.org/10.1007/s10457-019-00441-0>
- Ponti, L., Gutierrez, A.P., Ruti, P.M., Dell’Aquila, A., 2014. Fine-scale ecological and economic assessment of climate change on olive in the Mediterranean Basin reveals winners and losers. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 111, 5598–5603.
- Ramachandran Nair, Nair, V.D., Mohan Kumar, B., Showalter, J.M., 2010. Carbon Sequestration in Agroforestry Systems, in: *Advances in Agronomy*. Elsevier, pp. 237–307. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)08005-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)08005-3)
- Razouk, R., Daoui, K., Ramdani, A., Chergaoui, A., 2016. Optimal distance between olive trees and annual crops in rainfed intercropping system in northern Morocco. *J. Crop Sci. Res.* 1, 23–32.
- Reyes, F., Gosme, M., Wolz, K.J., Lecomte, I., Dupraz, C., 2021. Alley Cropping Mitigates the Impacts of Climate Change on a Wheat Crop in a Mediterranean Environment: A Biophysical Model-Based Assessment. *Agriculture* 11, 356. <https://doi.org/10.3390/agriculture11040356>
- Russo, C., Cappelletti, G., Nicoletti, G., Di Noia, A., Michalopoulos, G., 2016. Comparison of European Olive Production Systems. *Sustainability* 8, 825. <https://doi.org/10.3390/su8080825>
- Shi, L., Feng, W., Xu, J., Kuzyakov, Y., 2018. Agroforestry systems: Meta-analysis of soil carbon stocks, sequestration processes, and future potentials. *Land Degrad. Dev.* 29, 3886–3897.
- Solomou, A.D., Sfougaris, A.I., 2015. Bird community characteristics as indicators of sustainable management in olive grove ecosystems of Central Greece. *J. Nat. Hist.* 49, 301–325.
- Stillitano, T., De Luca, A., Falcone, G., Spada, E., Gulisano, G., Strano, A., 2016. Economic profitability assessment of Mediterranean olive growing systems. *Bulg. J. Agric. Sci.* 22.
- Temani, F., Barkaoui, K., Bouaziz, A., Wery, J., 2018. Assessment of olive tree-barley interactions in Mediterranean agroforestry: barley grain and straw along a rainfall gradient in Morocco. *PoS1-64. Agroscope*.

Temani, F., Bouaziz, A., Daoui, K., Wery, J., Barkaoui, K., 2021. Olive agroforestry can improve land productivity even under low water availability in the South Mediterranean. *Agric. Ecosyst. Environ.* 307, 107234.

USDA Agroforestry Strategic Framework, 2019. *Agroforestry Strategic Framework: Fiscal Years 2019-2024*.

Vanwalleghem, T., Amate, J.I., de Molina, M.G., Fernández, D.S., Gómez, J.A., 2011. Quantifying the effect of historical soil management on soil erosion rates in Mediterranean olive orchards. *Agric. Ecosyst. Environ.* 142, 341–351. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.06.003>

Vautard, R., Gobiet, A., Sobolowski, S., Kjellström, E., Stegehuis, A., Watkiss, P., Mendlik, T., Landgren, O., Nikulin, G., Teichmann, C., 2014. The European climate under a 2° C global warming. *Environ. Res. Lett.* 9, 034006.

Villalobos, F.J., Testi, L., Hidalgo, J., Pastor, M., Orgaz, F., 2006. Modelling potential growth and yield of olive (*Olea europaea* L.) canopies. *Eur. J. Agron.* 24, 296–303. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2005.10.008>

Appendix

Appendix I: Description of intercropping yields (Mean, Standard Deviation, Coefficient of Variation, Cumulative Yields) based on soil types, climatic periods, and cropping systems. A = Durum wheat, B = Winter barley, C = Winter pea.

A – Durum wheat

Soil	Climate	Agricultural system	Mean	SD	CV (%)	Cumulative Yields
Flat	Past	TR	3.13	1.199	38.38	81.29
	Future		3.3	1.185	35.95	82.44
	Past	HDA	3.3	0.419	12.96	82.51
	Future		3.08	0.847	27.46	77.12
	Past	LDA	3.27	0.705	21.55	81.82
	Future		3.18	0.816	25.66	79.57
Hillslope	Past	TR	3.09	1.005	32.47	80.45
	Future		2.9	1.037	35.82	72.41
	Past	HDA	3.22	0.429	13.32	80.46
	Future		2.78	0.988	35.53	69.49
	Past	LDA	3.28	0.425	12.98	81.96
	Future		2.84	0.999	35.14	71.11

B – Winter barley

Soil	Climate	Agricultural system	Mean	SD	CV (%)	Cumulative Yields
Flat	Past	TR	2.84	1.389	48.9	73.84
	Future		3.01	1.532	50.82	75.35
	Past	HDA	2.23	0.607	27.24	55.69
	Future		2.11	0.734	34.86	52.66
	Past	LDA	2.32	0.574	24.77	57.97

Hillslope	Future	TR	2.24	0.824	36.75	56.04
	Past		2.16	0.711	32.95	53.93
	Future	HDA	1.99	0.998	50.12	49.77
	Past		1.73	0.348	20.14	43.19
	Future	LDA	1.56	0.387	24.81	39.04
	Past		1.79	0.359	20.05	44.82
	Future		1.62	0.395	24.38	40.52

C – Winter pea

Soil	Climate	Agricultural system	Mean	SD	CV (%)	Cumulative Yields
Flat	Past	TR	1.92	1.208	62.86	44.2
	Future		1.53	1.377	89.69	38.38
	Past	HDA	1.64	0.88	53.62	41.05
	Future		1.51	0.962	63.59	37.81
	Past	LDA	1.68	0.948	56.43	41.98
	Future		1.49	1.001	67.12	37.28
Hillslope	Past	TR	1.83	1.351	73.77	44.2
	Future		1.37	1.429	103.98	34.35
	Past	HDA	1.35	0.809	59.76	33.86
	Future		1.16	1.032	89.04	28.98
	Past	LDA	1.45	0.89	61.17	36.37
	Future		1.21	1.041	85.81	30.35

Appendix II: Description of the number of days during which the olive tree is subjected to water stress over a 75-year period. The numbers of stress days are calculated based on different thresholds of the water stress index of the model. For a value of 1, the tree is not stressed, whereas a value of 0 indicates maximum water stress. These numbers of days are calculated for each climatic period and soil type, and for four seasons: spring, summer, autumn, and winter.

Climate	Seasons	Stress index	TOG	HDA	LDA
Past climate – Flat soil	Winter	0.9	4	4	4
		0.7	1	2	2
		0.4	0	0	0
		0.2	0	0	0
	Spring	0.9	87	120	82
		0.7	81	105	81
		0.4	74	85	74
		0.2	61	62	61
	Summer	0.9	114	437	117
		0.7	78	323	46
		0.4	40	238	5
		0.2	8	165	0
	Autumn	0.9	6	52	8
		0.7	0	30	2
		0.4	0	10	1
		0.2	0	2	0

Modalite	Seasons	Stress index	TOG	HDA	LDA
Future climate – Flat soil	Winter	0.9	45	47	46
		0.7	43	44	44
		0.4	0	41	41
		0.2	0	39	39
	Spring	0.9	222	299	103
		0.7	171	230	66
		0.4	101	162	18
		0.2	58	97	4
	Summer	0.9	577	1170	357
		0.7	449	908	259
		0.4	323	708	181
		0.2	221	569	77
	Autumn	0.9	146	347	87
		0.7	120	263	49
		0.4	84	169	19
		0.2	32	124	0

Climate	Seasons	Stress index	TOG	HDA	LDA
Past climate – Hillslope soil	Winter	0.9	4	17	25
		0.7	2	4	12
		0.4	0	0	0
		0.2	0	0	0
	Spring	0.9	674	863	574
		0.7	500	641	401
		0.4	320	431	261
		0.2	167	272	146
	Summer	0.9	4134	4353	4058
		0.7	3854	4131	3749
		0.4	3453	3845	3335
		0.2	2982	3482	2864
	Autumn	0.9	459	746	745
		0.7	394	668	682
		0.4	337	607	610
		0.2	291	561	539

Modalite	Seasons	Stress index	TOG	HDA	LDA
Future climate – Hillslope soil	Winter	0.9	98	161	136
		0.7	74	101	111
		0.4	46	70	75
		0.2	35	41	38
	Spring	0.9	1267	1369	864
		0.7	994	1093	646
		0.4	698	801	442
		0.2	470	541	310
	Summer	0.9	4730	4737	4554
		0.7	4508	4543	4248
		0.4	4221	4299	3886
		0.2	3816	4056	3466

	Autumn	0.9	591	1180	1093
		0.7	501	1020	939
		0.4	439	850	775
		0.2	374	697	617

Appendix III: Description of the number of days during which the olive tree is subjected to nitrogen stress over a 75-year period. The numbers of stress days are calculated based on different thresholds of the water stress index of the model. For a value of 1, the tree is not stressed, whereas a value of 0 indicates maximum water stress. These numbers of days are calculated for each climatic period and soil type, and for four seasons: spring, summer, autumn, and winter.

Climate - soil	Seasons	Stress index	TOG	HDA	LDA
Past climate – Flat soil	Winter	0.9	2537	3104	2193
		0.7	636	1545	410
		0.4	0	0	0
		0.2	0	0	0
	Spring	0.9	6264	6171	4628
		0.7	970	1900	1191
		0.4	0	0	0
		0.2	0	0	0
	Summer	0.9	6538	6624	5655
		0.7	1229	2208	1491
		0.4	0	0	0
		0.2	0	0	0
	Autumn	0.9	6374	6522	5249
		0.7	1012	1919	1182
		0.4	0	0	0
		0.2	0	0	0

Climate – soil	Seasons	Stress index	TOG	HDA	LDA
Future climate – Flat soil	Winter	0.9	2434	3162	2312
		0.7	520	1647	1045
		0.4	0	0	0
		0.2	0	0	0

	Spring	0.9	6025	5474	4165
		0.7	789	1861	1510
		0.4	0	0	0
		0.2	0	0	0
	Summer	0.9	6574	6070	4937
		0.7	891	1971	1737
		0.4	0	0	0
		0.2	0	0	0
	Autumn	0.9	6368	5910	4620
		0.7	846	1894	1490
		0.4	0	0	0
		0.2	0	0	0

Climate - soil	Seasons	Stress index	TOG	HDA	LDA
Past climate – Hillslope soil	Winter	0.9	4539	5936	3840
		0.7	1999	4496	1542
		0.4	0	0	0
		0.2	0	0	0
	Spring	0.9	6498	6625	6400
		0.7	2626	5291	2350
		0.4	0	46	42
		0.2	0	0	0
	Summer	0.9	6716	6755	6748
		0.7	2989	5813	2963
		0.4	0	5	2
		0.2	0	0	0
	Autumn	0.9	6362	6642	6467

		0.7	2635	5537	2464
		0.4	0	0	0
		0.2	0	0	0

Climate – soil	Seasons	Stress index	TOG	HDA	LDA
Future climate – Hillslope soil	Winter	0.9	5219	5724	4660
		0.7	2906	4220	2760
		0.4	0	0	0
		0.2	0	0	0
	Spring	0.9	6498	6414	6290
		0.7	3176	4872	3488
		0.4	0	0	0
		0.2	0	0	0
	Summer	0.9	6747	6733	6532
		0.7	3419	5093	3694
		0.4	0	0	0
		0.2	0	0	0
	Autumn	0.9	6501	6500	6403
		0.7	3152	4894	3434
		0.4	0	0	0
		0.2	0	0	0

Appendix IV: Table showing the results of statistical tests (Kruskal test) for the study of olive tree yield as a function of climatic period for a given system. The significance level is 0.05.

Crops	Phases	Agricultural systems	P-value
Olives	Juvenile	TOG	0.0009578 ***
		HDA	0.0001692 ***
		LDA	0.008198 **

	Mature	TOG	< 2.2e-16 ***
		HDA	< 2.2e-16 ***
		LDA	< 2.2e-16 ***

Appendix V: Table showing the results of post-hoc tests (Dunn's test) for the study comparing olive tree yields as a function of climatic periods for the TOG system in the juvenile phase. The significance level is 0.05.

Agricultural systems	Climate periods comparison	P-value
TOG	Past Climate Hillslope – Past Climate Flat Soil	0.039 *
	Past Climate Hillslope – Future Climate Hillslope	0.713
	Past Climate Flat Soil – Future Climate Hillslope	0.02 *
	Past Climate Hillslope – Future Climate Flat Soil	0.008 **
	Past Climate Flat Soil – Future Climate Flat Soil	0.617
	Future Climate Hillslope – Future Climate Flat Soil	0.004 **
HDA	Past Climate Hillslope – Past Climate Flat Soil	0.007 **
	Past Climate Hillslope – Future Climate Hillslope	0.628
	Past Climate Flat Soil – Future Climate Hillslope	0.016 *
	Past Climate Hillslope – Future Climate Flat Soil	0.001 **
	Past Climate Flat Soil – Future Climate Flat Soil	0.506
	Future Climate Hillslope – Future Climate Flat Soil	0.003 **
LDA	Past Climate Hillslope – Past Climate Flat Soil	0.048 *
	Past Climate Hillslope – Future Climate Hillslope	0.735
	Past Climate Flat Soil – Future Climate Hillslope	0.082
	Past Climate Hillslope – Future Climate Flat Soil	0.027 *
	Past Climate Flat Soil – Future Climate Flat Soil	0.619
	Future Climate Hillslope – Future Climate Flat Soil	0.035 *

Appendix VI: Table showing the results of post-hoc tests (Dunn's test) for the study comparing olive tree yields as a function of climatic periods for the TOG system in the juvenile phase. The significance level is 0.05.

Agricultural systems	Climate periods comparison	P-value
TOG	Past Climate Hillslope – Past Climate Flat Soil	4.56e-14 ***
	Past Climate Hillslope – Future Climate Hillslope	6.88e-01
	Past Climate Flat Soil – Future Climate Hillslope	3.08e-15 ***
	Past Climate Hillslope – Future Climate Flat Soil	2.66e-21 ***
	Past Climate Flat Soil – Future Climate Flat Soil	4.36e-02 *
	Future Climate Hillslope – Future Climate Flat Soil	1.44e-22 ***
HDA	Past Climate Hillslope – Past Climate Flat Soil	1.48e-13

	Past Climate Hillslope – Future Climate Hillslope	9.04e-01
	Past Climate Flat Soil – Future Climate Hillslope	1.68e-13 ***
	Past Climate Hillslope – Future Climate Flat Soil	5.8e-16 ***
	Past Climate Flat Soil – Future Climate Flat Soil	5.33e-01
	Future Climate Hillslope – Future Climate Flat Soil	1.08e-15 ***
LDA	Past Climate Hillslope – Past Climate Flat Soil	4.65e-12 ***
	Past Climate Hillslope – Future Climate Hillslope	8.8e-01
	Past Climate Flat Soil – Future Climate Hillslope	1.12e-12 ***
	Past Climate Hillslope – Future Climate Flat Soil	1.8e-19 ***
	Past Climate Flat Soil – Future Climate Flat Soil	3.32e-02 *
	Future Climate Hillslope – Future Climate Flat Soil	2.97e-20 ***

Appendix VII: Table showing the results of statistical tests (Kruskal test) for the study of olive tree yield as a function of system for a given climatic period and soil. The significance threshold is 0.05.

Crops	Phases	Climate	Soil	P-value
Olives	Juvenile	Past	Flat	0.013 *
			Hillslope	0.002 **
		Future	Flat	0.009 **
			Hillslope	0.033 *
	Mature	Past	Flat	3.95e-09 ***
			Hillslope	0.008 **
		Future	Flat	6.81e-10 ***
			Hillslope	0.056

Appendix VIII: Table showing the results of post-hoc tests (Dunn's test) for the study comparing olive tree yields according to juvenile phase systems. The significance level is 0.05.

Climate	Soil	Agricultural systems comparison	P-value
Past	Flat	HDA – LDA	0.181
		HDA – TOG	0.111
		LDA – TOG	0.009 **
	Hillslope	HDA – LDA	0.284
		HDA – TOG	0.014 *
		LDA – TOG	0.002

			**
Future	Flat	HDA – LDA	0.138
		HDA – TOG	0.137
		LDA – TOG	0.006 **
	Hillslope	HDA – LDA	0.243
		HDA – TOG	0.138
		LDA – TOG	0.028 *

Appendix IX: Table showing the results of post-hoc tests (Dunn's test) for the study comparing olive tree yields according to mature systems. The significance level is 0.05.

Climate	Soil	Agricultural systems comparison	P-value
Past	Flat	HDA – LDA	3.53e-07 ***
		HDA – TOG	7.7e-01
		LDA – TOG	5.95e-08 ***
	Hillslope	HDA – LDA	0.348
		HDA – TOG	0.008 **
		LDA – TOG	0.053
Future	Flat	HDA – LDA	1.55e-05 ***
		HDA – TOG	6.19e-02
		LDA – TOG	6.88e-10 ***
	Hillslope	HDA – LDA	0.308
		HDA – TOG	0.054
		LDA – TOG	0.237

PARTIE IV

Discussion

Chapitre 9 : Discussion générale

1) La synthèse des principaux résultats

Mon projet de thèse consiste à répondre à la problématique suivante : les systèmes agroforestiers à base d'oliviers peuvent-ils à la fois améliorer les performances environnementales des oliveraies (en matière de gestion de l'eau, de perte d'azote, d'érosion des sols, de stockage du carbone, etc.) et maintenir les performances agronomiques ? Le recours à la modélisation s'est imposé du fait d'une part de la large gamme de systèmes agroforestiers à tester dans différentes conditions pédoclimatiques, et, d'autre part, du grand nombre de variables descriptives nécessaires pour cette évaluation multicritère, qui doit être faite sur toute la durée de vie de ces systèmes centrés sur une plante pérenne. J'ai donc commencé par i) identifier dans la littérature un modèle permettant de simuler ces différentes variables, puis j'ai (ii) adapté ce modèle aux arbres fruitiers, et en particulier à l'olivier qui présente la particularité d'avoir un feuillage persistant. En parallèle, j'ai (iii) établi un réseau d'acteurs intéressés par la diversification des cultures, pour (iv) concevoir, avec eux, des systèmes oléicoles diversifiés, dont certains innovants. J'ai ainsi évalué par modélisation les performances agronomiques et environnementales de différents systèmes agroforestiers à base d'oliviers, sous climat actuel, et dans un contexte de changement climatique, en faisant des simulations sous le scénario 4.5 du GIEC.

Au travers de mon projet de thèse, quatre questions scientifiques sont abordées :

- Comment adapter le modèle agroforestier Hi-sAFe pour simuler les arbres fruitiers, notamment les oliviers ?
- Quels systèmes diversifiés à base d'oliviers peuvent être co-conçus avec des acteurs pour améliorer les performances agronomiques et environnementales des oliveraies ?
- Quelles sont les performances agronomiques et environnementales de deux de ces systèmes co-conçus avec les acteurs : l'un associant oliviers et légumineuses, et l'autre associant oliviers, laitues et une rotation triennale de blé, d'orge et de pois d'hiver ?
- Face au changement climatique, quelles seront les performances des systèmes oléicoles traditionnels et agroforestiers ?

En début de projet, une revue sur les modèles agroforestiers et fruitiers m'a permis d'identifier le modèle Hi-sAFe comme le plus pertinent sur la base d'une liste de critères pour l'étude des performances agronomiques et environnementales de systèmes agroforestiers (chapitre 2 - article 1). En revanche, le modèle Hi-sAFe ne permettait pas de simuler des oliviers.

J'ai donc adapté le modèle Hi-sAFe aux oliviers et plus largement aux arbres fruitiers. En réponse à la question n°1, j'ai appliqué différents processus de modélisation (implémentation, paramétrisation, calibration, analyse de sensibilité, calibration et validation) afin d'adapter le modèle aux oliviers (chapitre 4 – article 2, chapitre 5 – article 3). Ainsi, pour la paramétrisation, j'ai réalisé des mesures expérimentales dans des vergers d'oliviers et sur des arbres isolés pour estimer les paramètres relatifs à la morphologie de l'arbre et à la production de fruits (chapitre 4 - article 2). J'ai également adapté le modèle Hi-sAFe aux arbres fruitiers et aux arbres à feuilles persistantes, calibré le modèle ainsi obtenu pour l'olivier et vérifié ses prédictions à l'aide de données existantes (chapitre 5 - article 3). Le modèle ainsi obtenu a été utilisé dans le reste du travail, et constitue également une approche de modélisation générique commune aux arbres fruitiers. Ce travail a permis d'aboutir à la version 4.2 du modèle (Figure 80). Cette nouvelle version, diffusée par différents canaux de communication (formations Hi-sAFe, posts LinkedIn, articles, conférences, etc.) depuis janvier 2023, intègre désormais la simulation de systèmes agroforestiers à base de fruitiers et/ou d'arbres à feuilles persistantes, qui intéresse d'ores et

déjà des collègues dans différents pays (simulations du chêne-liège en Espagne, du prunier en Angleterre et de l'olivier en Algérie, Tunisie et Italie).

Afin d'identifier les systèmes agroforestiers à base d'oliviers pertinents à évaluer avec le modèle (question n°2), j'ai eu recours à une approche participative que j'ai initiée avec un réseau d'acteurs (chapitre 3). Ce réseau d'acteurs de la filière oléicole a permis de co-concevoir trois systèmes agroforestiers selon deux problématiques préalablement identifiées par les acteurs : i) Les légumineuses peuvent-elles remplacer la fertilisation azotée des oliviers ? ii) Les systèmes agroforestiers permettent-ils d'augmenter la productivité du système ainsi que de réduire les impacts environnementaux ? (chapitre 6) (Figure 80)

Ces systèmes co-conçus ont ensuite été adaptés aux capacités de simulation du modèle. Deux systèmes ont été simulés : i) système olivier-pois d'hiver en inter-rang et ii) système olivier-salade (sur le rang)-rotation triennale (blé, orge et pois d'hiver en inter-rang). Les performances agronomiques et environnementales de ces systèmes ont ensuite été évaluées sous climat actuel. Les résultats des performances permettent de répondre à la question n°3 (chapitre 7). En dépit des limites des approches, les systèmes simulés permettent d'aborder par simulation certaines problématiques techniques évoquées par les acteurs, notamment en ce qui concerne l'espacement entre les rangées d'oliviers et la gestion des résidus de taille. Cependant, le modèle ne tient pas compte de ces contraintes techniques comme le manque d'équipements adaptés pour les oléiculteurs, d'où notre choix de mettre en œuvre une démarche de co-évaluation, permettant aux acteurs de discuter des sorties du modèle à la lumière de leur expertise. Lors des deux ateliers (co-conception de systèmes puis co-évaluation des sorties du modèle sur deux de ces systèmes), ces questions ont été abordées. Ceci a permis de cerner plusieurs points essentiels pour garantir la faisabilité de la mise en place de ces systèmes.

Dans le système olivier-pois d'hiver, les oliviers présentent une croissance plus lente que ceux des oliveraies traditionnelles (fertilisées), mais plus rapide que celle des oliviers non fertilisés. Les légumineuses augmentent les réserves d'azote disponibles, réduisant le stress azoté, mais ne permettent pas aux oliviers de croître autant que dans les oliveraies fertilisées. Ces résultats confortent des résultats expérimentaux montrant l'effet limité des légumineuses pour l'apport d'azote (Rodrigues et al., 2013, 2011). Le rendement des oliviers dans le système diversifié est similaire, voire légèrement inférieur, à celui des oliviers dans un système non fertilisé. Nos études montrent une légère augmentation de la croissance végétative des oliviers avec l'utilisation de légumineuses par rapport aux oliveraies non fertilisées. En revanche, les pois d'hiver absorbent plus d'eau qu'un enherbement permanent, ce qui crée une compétition directe avec les oliviers pendant leur phase de croissance en avril. Les pois d'hiver et les oliviers ne semblent être complémentaires ni en matière de compétition spatiale (systèmes racinaires) ni en matière de compétition temporelle. Dans ce système, l'évaporation de l'eau du sol est réduite en raison d'une meilleure couverture, ce qui améliore l'efficacité d'utilisation de l'eau. En revanche, une lixiviation de l'azote est observée en automne lors des pluies importantes (Figure 80). Dans le cas du système agroforestier olivier-légumineuse, plusieurs problématiques techniques sont abordées et accompagnées de solutions spécifiques par les acteurs :

- L'espacement entre les rangées d'oliviers doit permettre le passage des engins agricoles lors des étapes de semis, fauches et récoltes des légumineuses. Pour résoudre ce défi, deux options sont envisageables : i) adapter le machinisme à l'agroforesterie, ou ii) ajuster l'agroforesterie aux dimensions des machines agricoles existantes.
- Pendant les périodes de taille des oliviers et de semis des légumineuses, il n'est pas possible de broyer les résidus de taille. Une question se pose alors : que faire de ces résidus ? Une solution envisagée pourrait être de cultiver les légumineuses un rang sur deux, laissant l'autre rang libre pour le broyage des résidus.
- La pratique de l'agroforesterie exige des équipements agricoles additionnels, comme un semoir, qui ne sont actuellement pas disponibles pour la plupart des oléiculteurs. Des solutions de partage d'outils entre producteurs sont envisageables.

- Diverses approches pourraient contribuer à atténuer la compétition hydrique entre les légumineuses et les oliviers. Cette compétition peut potentiellement être minimisée en ajustant les dates de semis et de fauche des légumineuses. Toutefois, un juste milieu doit être trouvé, car pour avoir un apport d'azote suffisant, la légumineuse doit s'être développée suffisamment. Le modèle pourrait être utilisé afin d'optimiser ces dates de semis et de fauche.
- Pour faciliter le passage des outils et réduire la compétition lumineuse des oliviers sur les cultures annuelles intercalaires, des variétés d'oliviers à port plus compact, telles que Picholine et Aglandau, peuvent être privilégiées. La présence de laitues sous le couvert des oliviers peut être maintenue durant les 10 premières années du système, et ensuite remplacée par un enherbement spontané.
- En ce qui concerne l'irrigation du système, il est crucial de noter que l'utilisation de microaspersion pendulaire pourrait entraîner des taches sur les feuilles de laitue. Une alternative serait de recourir à un système d'irrigation au goutte-à-goutte.
- La taille des oliviers doit être réalisée précocement, avant le mois de mars, afin d'éviter d'endommager les jeunes plants de laitue qui seront plantés au printemps.

Dans le système olivier-laitue-rotation triennale (blé, orge, pois d'hiver sur l'inter-rang), le LER est proche de 2, démontrant donc une productivité globale supérieure du système agroforestier par rapport à la somme des cultures pures. Dans ce système, irrigué et fertilisé, la diversification des cultures est donc intéressante en matière de production. En comparaison avec des oliveraies traditionnelles, les oliviers en agroforesterie présentent un développement plus rapide, associé à une entrée en production plus précoce. Aucune différence significative n'est observée entre le rendement en olives des systèmes agroforestiers et d'une oliveraie traditionnelle. L'agroforesterie, dans un système irrigué et fertilisé, ne semble pas impacter le rendement des oliviers. Des études ont également démontré les performances agronomiques des systèmes agroforestiers à base d'oliviers, avec des LER supérieur à 1 (Amassaghrou et al., 2023; Panozzo et al., 2020; Temani et al., 2021, 2018). Cependant, en comparaison avec une oliveraie traditionnelle, les systèmes agroforestiers nécessitent des apports en eau et en azote plus importants, notamment pour la culture de la laitue. En matière de performances environnementales, les systèmes agroforestiers semblent réduire le ruissellement de l'eau et l'évaporation du sol. Cependant, en raison des apports complémentaires d'azote pour la culture de la laitue, on observe une augmentation de la lixiviation de l'azote sur les systèmes agroforestiers. Par rapport aux systèmes en culture triennale sans arbres, le stockage du carbone dans le sol est légèrement amélioré dans les systèmes agroforestiers (Figure 80). Dans le cas du système agroforestier olivier-laitue-rotation, de nouveaux points techniques sont à considérer :

- La diversification des cultures permet une valorisation diversifiée. Ainsi, ces récoltes constituent une source de revenus complémentaires pour les agriculteurs et génèrent des revenus avant l'entrée en production des oliviers (selon les variétés et les systèmes, l'entrée en production peut prendre jusqu'à sept ans).
- Ce système assure la préservation des sols et favorise la biodiversité.
- En contrepartie, ce système agroforestier dépend étroitement de l'irrigation et de la fertilisation. De plus, l'installation des systèmes d'irrigation requiert de la main-d'œuvre, une ressource de plus en plus rare à trouver.
- Sous la frondaison des oliviers, le calibre des laitues doit être suffisant pour permettre leur commercialisation.

Comme mentionné dans le rapport du GIEC, le changement climatique va impacter l'agriculture, y compris les oliveraies en région méditerranéenne. Afin de tester la réponse des systèmes oléicoles traditionnels et agroforestiers au changement climatique, une évaluation des performances est effectuée sous le climat futur, sous l'hypothèse du scénario RCP 4.5 (chapitre 8). Dans ce scénario, le rendement des oliviers semble être impacté positivement pour une parcelle avec un sol de type plaine (sol profond).

Cette augmentation de rendement peut s'expliquer, en partie, par une tendance à l'augmentation du rayonnement lumineux, une absence de stress hydrique important et une amélioration de l'efficacité de la photosynthèse, principalement en hiver et en automne. En revanche, le rendement des oliviers stagne, voir diminue en sol peu profond (parcelle de Costière). Sous climat futur (et actuel), le LER des systèmes agroforestiers est supérieur à 1, ce qui indique un gain global de productivité de ces systèmes par rapport à la somme des rendements des monocultures, ainsi qu'un gain de performances environnementales. Toutefois, ces résultats doivent être pondérés en raison des limites des modèles et ne sont qu'une hypothèse possible dans les contextes pédoclimatiques simulés. D'autres études devront confirmer, contester et/ou compléter ces résultats (Figure 80). Dans la littérature, des études prédisent que le rendement des oliveraies va diminuer sous climat futur (Bouregaa, 2019; Brillì et al., 2019; Fraga et al., 2020a, 2020b). Toutefois, dans de rares cas, le rendement peut augmenter si les conditions sont favorables (Orlandi et al., 2005; Ponti et al., 2014).

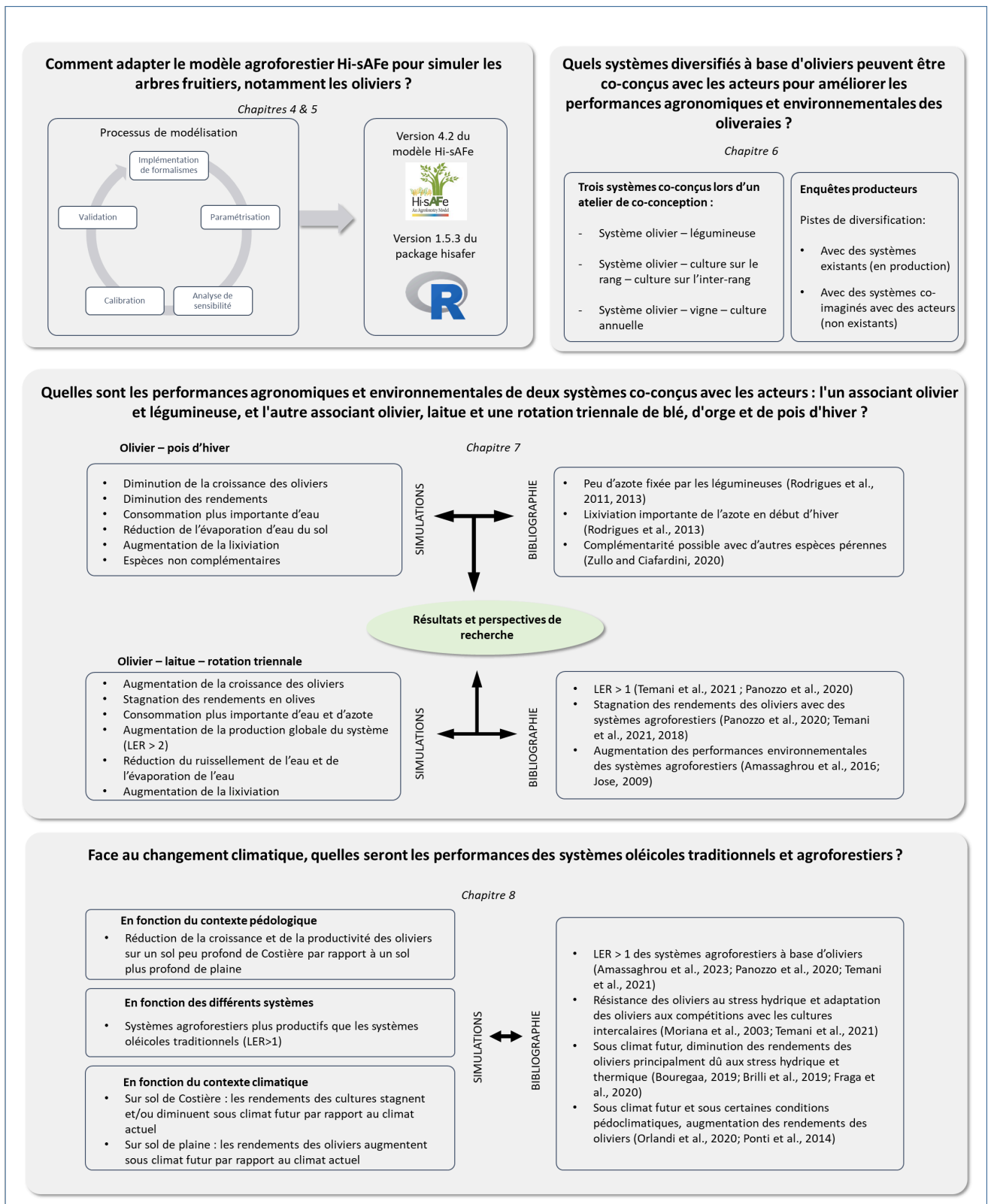


Figure 80 : Représentation schématique des principaux résultats obtenus dans le cadre de mon projet de recherche

2) Les limites du projet de recherche

Le projet de thèse présente des limites sur trois axes principaux (Tableau XII) : a) dans la démarche de modélisation, b) dans la démarche participative, et c) dans l'évaluation par modélisation de systèmes agroforestiers à base d'oliviers. Les limites sous-jacentes à ces axes sont détaillées ci-dessous par axe.

Tableau XII : Axes de limite en fonction des différents chapitres de Résultats

Axe de limite	Chapitre 4	Chapitre 5	Chapitre 6	Chapitre 7	Chapitre 8
Démarche de modélisation	X	X		X	X
Démarche participative			X	X	
Evaluation par modélisation des systèmes				X	X

A) Les limites liées à la démarche de modélisation

Dans l'adaptation du modèle Hi-sAFé à simuler les oliviers, certains choix ont été effectués dans le processus de modélisation et pourraient être améliorés sous certaines conditions (Figure 81).

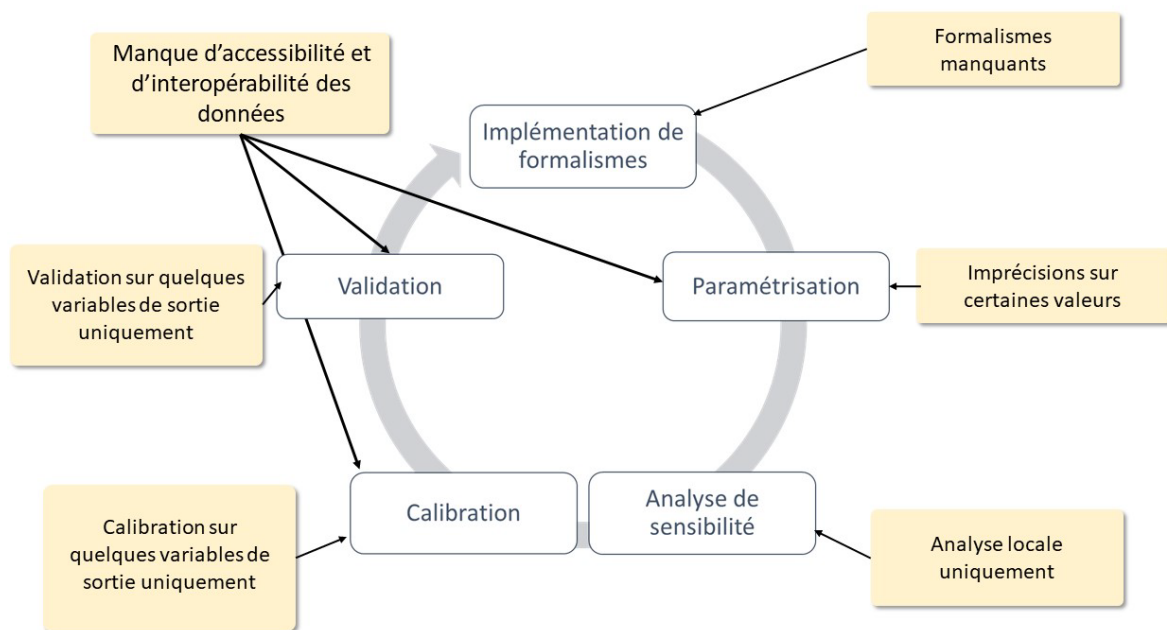


Figure 81: Représentation schématique des limites dans le processus d'adaptation du modèle Hi-sAFé à simuler des oliviers

En premier lieu, certains formalismes sont manquants dans le modèle et peuvent avoir un impact sur l'analyse des variables de sortie. Il s'agit notamment des effets de ravageurs des cultures, de l'effet du CO₂ ou de la géométrie des frondaisons d'arbres. Par exemple, dans les calculs de rendements, les ravageurs ne sont pas pris en compte. Sur l'olivier, des ravageurs tels que la mouche de l'olivier, la teigne de l'olivier et la cochenille noire de l'olivier peuvent avoir un impact sur la quantité et la qualité des rendements (Centre technique de l'olivier, 2015; Tzanakakis, 2003). De plus, les champignons phytopathogènes, tels que la maladie de l'œil de paon (Buonauro et al., 2023) et la verticilliose (López-Escudero and Blanco-López, 2005), qui limitent le développement de l'arbre et entraînent son

dépérissement, ne sont pas pris en compte. De même, l'impact des bactérioses (Quesada et al., 2007) sur le dépérissement des arbres n'est pas considéré. De plus, lors de l'évaluation du rendement, seule la quantité est prise en compte, alors que la qualité du rendement est tout aussi importante selon qu'on considère la production d'olives de table ou pour l'huile. Dans l'avenir, il sera essentiel de tenir compte de cet aspect et donc d'implémenter de nouveaux formalismes. Il peut également être envisagé de coupler le modèle Hi-sAFe avec un modèle « ravageurs ». Toutefois, il convient de noter que plus on augmente la complexité du modèle pour réduire l'erreur sur les formalismes, plus on risque de faire des erreurs sur les données d'entrée (Wenkel and Schultz, 1999). Pour réduire au strict minimum l'erreur totale du système, il existe un optimum entre l'erreur sur les formalismes et l'erreur sur les données d'entrée (Figure 82). L'ajout de nouveaux formalismes (et donc de nouveaux paramètres et/ou variables d'entrée) doit être effectué avec parcimonie, en tenant compte du degré de simplification globale du modèle (Palma et al., 2007; Wenkel and Schultz, 1999).

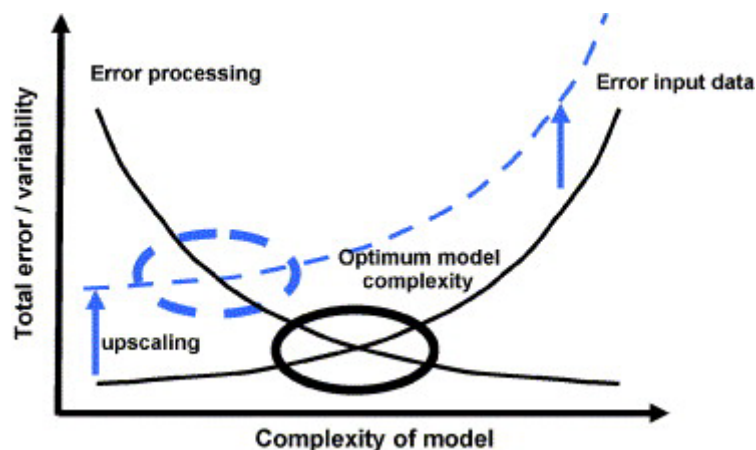


Figure 82 : Relation entre la complexité totale du modèle et l'erreur totale (Palma et al. 2007)

Lors de la paramétrisation, de nombreuses valeurs de paramètres ne sont pas directement identifiables dans la littérature scientifique et/ou technique. Afin de combler cette lacune, des expérimentations ont été réalisées sur quelques paramètres d'entrée. Cependant, tous les paramètres manquants dans la littérature n'ont pas pu être mesurés et ont fait l'objet d'une calibration globale, forcément moins précise du fait de possibles compensations entre paramètres. D'autres mesures expérimentales seraient donc souhaitables, telles que la mesure de la dynamique des systèmes racinaires des oliviers (impliquant de creuser une fosse et de déterrer partiellement ou complètement un olivier), la mesure de la phénologie des oliviers en France, etc. En raison de contraintes de temps, ces mesures n'ont pas pu être effectuées, mais pourraient être réalisées à l'avenir.

Une analyse de sensibilité locale a été effectuée sur le module fruits du modèle. Cependant, cette analyse est locale et ne met pas en évidence les paramètres d'entrée les plus influents à l'échelle globale du modèle. Des analyses de sensibilité globales pourraient être réalisées sur le modèle en utilisant des méthodes telles que Sobol ou Monte Carlo (Iooss and Lemaître, 2015). Cette mise en évidence des paramètres les plus influents à l'échelle globale du modèle permettrait de cibler les recherches futures sur les paramètres les plus importants, en particulier pour ajuster de manière très précise les valeurs de ces paramètres à l'aide d'expérimentations dédiées.

Lors de l'étape de calibration, il restait un certain nombre de paramètres non mesurés expérimentalement, qui ont donc fait l'objet d'une calibration globale (leur valeur a été fixée afin de minimiser l'erreur entre les prédictions du modèle et les observations concernant quelques variables présentes dans des bases de données existants). Outre le fait que cette méthode comporte des risques d'erreurs du fait de compensations entre paramètres (la surestimation d'un paramètre pouvant être compensée par la sous-estimation d'un autre paramètre), la qualité de ces résultats dépend bien sûr de la qualité des bases de

données auxquelles j'ai eu accès : mesures précises de plusieurs variables sur le plus grand nombre d'années (de préférence consécutives) possibles, accompagnées de toutes les variables descriptives des conditions pédoclimatiques et de pratiques culturales. Afin d'améliorer la fiabilité des simulations, une calibration pourrait être effectuée sur d'autres variables de sortie (stades phénologiques, teneur en huile, etc.), à condition d'avoir accès aux données mesurées. Or, très peu de bases de données sont directement ou indirectement accessibles et nous avons dû nous contenter d'un petit nombre de variables observées, sur des pas de temps relativement courts, bien que nous soyons parvenus à recueillir des données brutes auprès de plusieurs laboratoires partenaires. À l'échelle de la recherche nationale, il est essentiel de développer un protocole et des outils pour encourager les acteurs (chercheurs, producteurs, conseillers, etc.) à partager leurs données. Cette piste est actuellement travaillée dans le service DipSO de INRAE³. L'objectif est de récupérer et mettre en ligne des données, selon les principes FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable).

Lors de la vérification du modèle, le manque de données est également préjudiciable. En effet, des données complémentaires permettraient de vérifier le modèle dans des conditions pédoclimatiques différentes. De plus, la vérification pourrait également être effectuée sur davantage de variables de sortie, à condition d'avoir accès à des données.

De plus, le modèle n'est paramétré, calibré et vérifié qu'à l'échelle d'un olivier générique et ne tient pas compte de la variabilité intraspécifique liée à des différences variétales parfois importantes (calibre de fruit, surface foliaire, etc.).

B) Les limites liées à la démarche participative

La démarche participative dans ce projet de recherche a établi un lien essentiel entre le terrain (qualifié de concret) et la modélisation (qualifiée d'abstraite). Ce lien était crucial pour développer un modèle utile dans l'exploration des systèmes agroforestiers à base d'oliviers.

Afin d'ajuster au mieux les questions de recherche ainsi que les formalismes à implémenter dans le modèle, un réseau d'acteurs de la filière oléicole a été constitué. Mais cette démarche elle-même comporte des limites (Figure 83). Ce réseau, inexistant au début de mon projet de recherche, réunit des agriculteurs et conseillers actifs et très intéressés par l'étude de la diversification des oliveraies. Cependant, ce réseau est uniquement composé d'acteurs de la filière oléicole ce qui constitue une limite à sa constitution en tant que réseau de diversification, même si certains avaient également de la vigne. En effet, lors de l'atelier de co-conception et de co-évaluation, les oléiculteurs ont regretté l'absence d'acteurs d'autres filières (grandes cultures, maraîchage, PPAM, élevage), qui auraient pu apporter des informations pour des aspects pratiques, tels que les itinéraires techniques ou les distances de plantation.

De plus, le choix des outils utilisés pour la co-conception peut également constituer une limite. En effet, de nombreux outils peuvent être utilisés pour la co-conception (post-its, supports de conception 3D modulables, réalité augmentée, etc.), chacun présentant des avantages et des inconvénients (Von Korff et al., 2013). Les supports de conception 3D modulables utilisés lors de l'atelier offrent des avantages tels qu'une utilisation facile et une représentation rapide du système. Cependant, cet outil ne permet pas à l'utilisateur de se projeter dans l'évolution du système dans le temps ce qui est crucial dans un système à base de plantes pérennes. Pour surmonter cette difficulté, le développement de la réalité augmentée en tant qu'outil d'aide lors des ateliers de co-conception est en cours. Cet outil facilite la visualisation, par exemple, de l'encombrement spatial des végétaux (Lemière et al., 2022).

³ <https://www6.inrae.fr/dipso/La-science-ouverte-en-questions/Les-donnees-de-la-recherche/Partage-des-donnees>

Malgré ces limites, de très bons retours ont été obtenus à la suite des ateliers de co-conception et de co-évaluation des résultats. Les acteurs ont apprécié ce travail sur la diversification des oliveraies. Un lien entre la recherche et les acteurs professionnels a été tissé et aboutira même, pour au moins l'un des acteurs, à la complantation d'oliviers et de vignes sur une même parcelle. Par contre, la question de la pérennité du réseau se pose : le principe du financement de la recherche par appels à projets ne permet pas d'assurer un engagement des chercheurs sur le long terme, et rien n'assure que le réseau constitué pendant la thèse perdurera au-delà de cette thèse, malgré l'intérêt des acteurs.

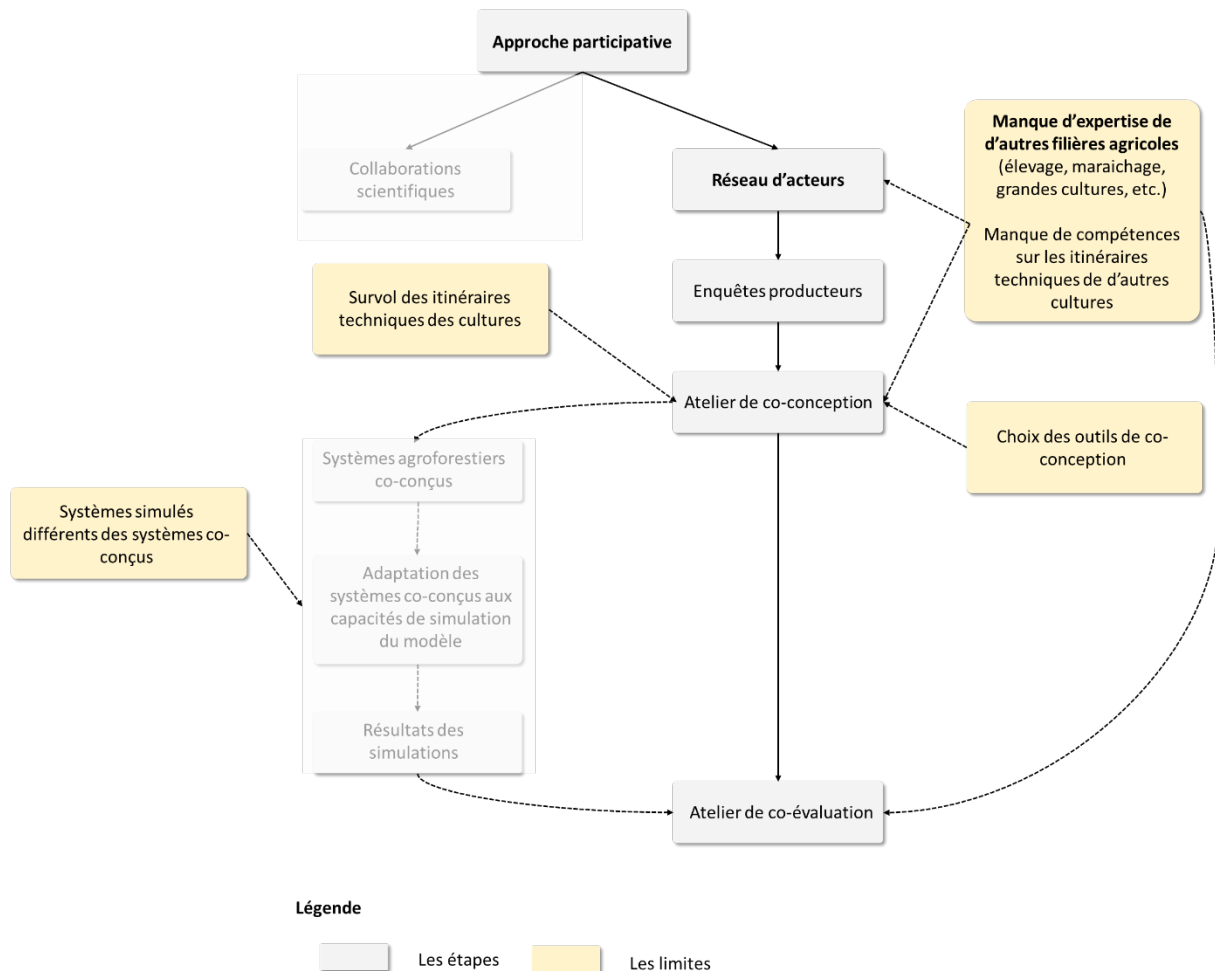


Figure 83 : Représentation schématique des différentes limites dans la démarche participative effectuée dans le cadre du projet de recherche

De plus, à la suite des ateliers de co-conception et de co-évaluation, les acteurs auraient pu utiliser les résultats obtenus pour co-construire de nouveaux systèmes agroforestiers à base d'oliviers dans un autre atelier. Ainsi, ce dernier aurait ainsi intégré les résultats des simulations, permettant une discussion plus approfondie sur les répartitions spatiales et les itinéraires techniques dans lesquels les opérations de taille des arbres sont cruciales. Malheureusement, en raison du manque de temps, cette étape n'a pas été réalisée, mais elle serait pertinente pour la suite de la démarche.

Afin de ne pas brider l'imagination des acteurs lors de l'atelier de co-conception, les acteurs n'ont pas été limités à la liste des cultures disponibles dans le modèle. Par conséquent, les systèmes co-conçus ne peuvent être entièrement simulés en raison de l'absence de certaines espèces paramétrées dans le modèle Hi-sAFé. Ainsi, les systèmes co-conçus ont été adaptés aux capacités de simulation du modèle, et diffèrent donc de façon plus ou moins importante des systèmes initialement co-conçus. Par conséquent, des substitutions ont été effectuées pour compenser l'absence de certaines espèces. Par exemple, dans le

système olivier-légumineuse, des légumineuses telles que la luzerne et le trèfle étaient envisagées, de même que des espèces comme le radis fourrager pour améliorer la porosité du sol. Cependant, en raison de l'absence de ces options dans le modèle, le pois d'hiver (la seule légumineuse paramétrée) a été choisi. Cette adaptation peut engendrer des divergences entre les systèmes co-conçus et les simulations effectuées par le modèle. Afin d'éviter ces problèmes d'adaptation, il aurait été pertinent, si le temps l'avait permis, d'organiser un deuxième atelier de co-conception, cette fois-ci en se limitant aux espèces présentes dans le modèle.

C) Les limites liées à l'évaluation par modélisation de systèmes agroforestiers à base d'oliviers

Dans le cas des deux études traitant des performances agronomiques et environnementales de systèmes agroforestiers à base d'oliviers, les résultats sont à pondérer en raison d'un certain nombre de limites. Certaines de ces limites sont communes aux deux études de modélisation, tandis que d'autres sont spécifiques à chaque étude (Tableau XIII).

Tableau XIII : Axes de limite en fonction des chapitres 7 et 8

Axe de limites	Chapitre 7	Chapitre 8
Démarche de modélisation	X	X
Choix du contexte pédoclimatique	X	X
Choix des itinéraires techniques	X	X
Formalismes implémentés ou manquants	X	X
Démarche participative	X	
Adaptation des systèmes co-conçus aux capacités de simulation du modèle	X	
Choix du scénario climatique		X
Données climatiques futures		X

Dans chaque étude de modélisation (chapitre 7 – article 4 et chapitre 8 – article 5), les résultats de simulations sur l'évaluation des performances de systèmes agroforestiers sont à pondérer par des limites communes : les limites sur le processus de modélisation (mentionnées dans la partie a de cette Discussion), les limites sur le choix du contexte pédoclimatique, les limites sur le choix des itinéraires techniques des arbres et des cultures intercalaires, et les limites sur les formalismes implémentés ou manquants dans le modèle Hi-sAFé (mentionnées dans la partie a).

Pour le choix du contexte pédoclimatique, de nombreux paramètres sont à renseigner par l'utilisateur. Ainsi, en fonction des choix effectués, les résultats des simulations peuvent varier. Il convient de rappeler que les résultats de simulation sont difficilement extrapolables dans d'autres contextes pédoclimatiques. Pour rappel, en fonction des expérimentations virtuelles, les simulations ont été effectuées soit sur des sols profonds ou peu profonds, et avec des données climatiques proches de Montpellier.

De même que pour le choix des itinéraires techniques des arbres et des cultures intercalaires, l'utilisateur peut ajuster ses itinéraires au mieux selon le contexte et les besoins de son exploitation. Certaines

opérations culturales dans les itinéraires techniques peuvent modifier le développement et la productivité des plantes. Ainsi, comme précédemment, les résultats des simulations sont difficilement extrapolables avec des choix différents sur les opérations culturales (telles que l'irrigation, la fertilisation, la date de récolte, etc.). De plus, le modèle permet de représenter certains formalismes, mais d'autres sont manquants (comme mentionné dans la partie a).

De plus, les performances de ces systèmes n'ont été étudiées que sur les aspects agronomiques et environnementaux. Aucune analyse n'a été effectuée sur les performances socioéconomiques de ces systèmes. Ces performances peuvent également différer en fonction du contexte agricole européen et mondial, ainsi que du contexte géopolitique sur la scène internationale. Comme démontré récemment lors de la crise du Covid-19 ou de la guerre en Ukraine, le contexte peut soudainement changer et modifier des variables dans le calcul des performances, rendant un système plus ou moins efficace économiquement.

Dans le cadre plus spécifique de l'étude portant sur les deux systèmes co-conçus (chapitre 7 - article 4), en plus des limites générales évoquées précédemment et des limites liées à l'approche participative détaillée en partie 9.2 B, la généricité du travail est limitée par les choix qui ont dû être faits pour passer du système très générique imaginé par les acteurs à un système spécifique paramétré dans le modèle. En particulier, il a fallu tenir compte des capacités de simulation de la version 4.2 du modèle Hi-sAFe qui n'est paramétré que pour certaines espèces de cultures intercalaires. De plus, le modèle ne tient compte que de deux zones de cultures possibles, à savoir sur le rang des arbres (ou linéaire sous-arboré) et sur l'inter-rang (ou l'allée cultivée), qui doivent partager le même calendrier de simulation (selon les unités de simulation de STICS). Ainsi, une seule culture de laitue par an a pu être simulée pour le système olivier-laitue-rotation, alors que les acteurs envisageaient deux cultures successives, entraînant une sous-estimation de la production de laitue. Il convient de noter que cette limite sera surmontée dans la prochaine version du modèle (version 4.3 du modèle Hi-sAFe en cours de développement), qui permettra la définition de plus de deux zones de cultures, chacune disposant de son propre calendrier de simulation. Cette mise à jour ouvrira la voie à la simulation de systèmes agroforestiers plus complexes, tels que les vergers-maraîchers. Il est à souligner que ce perfectionnement du modèle découle des discussions avec les acteurs.

Mon projet de recherche et le stage de fin d'études que j'ai supervisé (voir le rapport de stage de Nolwenn Poulailion en annexe II) ont impliqué l'évaluation de systèmes agroforestiers ainsi que d'oliveraies traditionnelles dans un contexte de climat futur. Les résultats de cette étude sont à pondérer par deux limites importantes.

La première limite identifiée concerne le choix du scénario climatique. Pour des raisons de temps, nous sommes limités à l'étude d'un scénario climatique et nous avons choisi le scénario intermédiaire, à savoir le RCP 4.5. Cependant, il est important de noter que les résultats des simulations ne peuvent pas être généralisés à d'autres scénarios climatiques tels que le scénario optimiste 2.6 ou le scénario pessimiste 8.5.

La deuxième limite identifiée porte sur l'imprécision des données climatiques issues des modèles climatiques mis à disposition dans l'outil Clipick® et à l'ajustement de la projection climatique. Les données météorologiques futures du RCP 4.5 ont été obtenues sur le site web de Clipick (Palma, 2017), pour une localisation géographique proche de Montpellier. Ce site regroupe des projections climatiques issues de modèles climatiques comme Regional Atmospheric Climate Model (RCMO), fournis par Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI) (Katragkou et al., 2015). Comme pour tous les modèles, des limites et des incertitudes sont présentes. Ainsi, avant même d'utiliser ces données climatiques, une incertitude subsiste et vient s'ajouter aux incertitudes liées aux différentes limites du modèle Hi-sAFe. Comme les données ne montraient pas de diminution des précipitations, nous avons

forcé cette réduction pour arriver progressivement à une pluviométrie annuelle correspondant à 70% de la pluviométrie prédite par le modèle climatique. Le choix de cette valeur n'est pas arbitraire, car il correspond à la réduction attendue par certains modèles (Reyes et al., 2021), mais il est bien sûr discutable, de même que l'application d'un coefficient progressif sur toutes les pluies plutôt que la modification de la répartition intra-annuelle des pluies.

De plus, dans le contexte du changement climatique, la pression exercée par certains ravageurs peut être amplifiée. En effet, des températures plus favorables peuvent contribuer à augmenter le nombre de générations par an, à étendre leur aire géographique, à accroître la survie hivernale et à désynchroniser le cycle de vie du ravageur et de celui de ses ennemis naturels (Skendžić et al., 2021). Ainsi, les dégâts causés par la mouche de l'olivier pourraient être amplifiés sous climat futur (Gutierrez et al., 2009). Cette amplification aurait un impact sur les rendements, tant en termes de quantité que de qualité. Cet aspect est également à prendre en compte dans l'interprétation des résultats.

3) Les perspectives de recherche et les nouveaux défis à relever

A) Les perspectives de recherche sur la démarche de modélisation

Afin d'ajouter des variables de sorties jugées pertinentes, l'implémentation de nouveaux formalismes semble nécessaire, sur plusieurs aspects : i) ajouts de différentes zones de culture (prochainement disponible dans la version 4.3), ii) polycyclisme des arbres (si les conditions sont favorables, plusieurs unités de croissance peuvent se développer une même année, prochainement disponible dans la version 4.3), iii) impact des ravageurs sur les cultures (arbres et cultures intercalaires), iv) représentation de différentes formes d'arbres (actuellement, uniquement une ellipse), v) calcul de l'érosion (aérienne et hydrique) des sols. Cette liste est non exhaustive et d'autres formalismes pourront être implémentés au besoin.

Pour le paramétrage, de nouveaux essais pourraient être mis en place sur le terrain pour mesurer des paramètres jugés « sensibles » par les analyses de sensibilité ou par l'expérience des utilisateurs. Ainsi, des paramètres liés aux systèmes racinaires des oliviers seraient intéressants à mesurer sur le terrain. De plus, il serait également important d'acquérir une base de données relative au stress hydrique et azoté des oliviers. Cette base permettrait d'optimiser d'autant plus la réponse des oliviers aux stress hydrique et azoté. De plus, il serait pertinent d'acquérir davantage de données pour mieux ajuster la relation allométrique Crown volume vs. leaf area. L'estimation des surfaces foliaires et du volume des arbres pourraient notamment être effectuées à l'aide de mesures Lidar (Miranda-Fuentes et al., 2015; Sanz-Cortiella et al., 2011). Au cours de ma thèse, quelques essais de Lidar ont été effectués sur des oliviers du Domaine INRAE de l'UE DIASCOPE de Melgueil. Le manque de temps n'a pas permis la poursuite de l'étude. De plus, actuellement, l'olivier dans le modèle est un olivier générique dont les valeurs proviennent de différentes variétés. Afin d'adapter le modèle à plusieurs variétés, il serait intéressant d'identifier des paramètres variétaux. Un premier travail est en cours avec l'Institut de l'Olivier de Sfax pour adapter le modèle à la variété Chemlali Sfax (variété tunisienne). De plus, les ateliers avec les acteurs ont mis en évidence le peu de cultures intercalaires disponibles dans le modèle. Afin d'augmenter les cultures intercalaires disponibles, il serait intéressant de paramétrer et calibrer d'autres espèces, comme la luzerne, le radis fourrager, l'asperge, la lavande par exemple.

Pour l'analyse de sensibilité, une analyse à l'échelle globale du modèle serait intéressante à réaliser. Cette étude permettrait d'identifier les paramètres les plus influents sur les principales variables de sorties (comme le rendement par exemple).

Pour la calibration, il serait intéressant d'identifier d'autres bases de données avec un contexte pédoclimatique différent. Avec cette nouvelle base, une nouvelle calibration pourrait être effectuée, en tenant compte de deux contextes différents. Actuellement, le modèle est calibré sur la base de quelques variables de sorties. Afin d'améliorer la fiabilité des simulations sur davantage de variables, d'autres bases de données, autres que le rendement et les dimensions des oliviers, pourraient être identifiées, comme la date des différents stades phénologiques, des données sur la croissance du système racinaire, etc. Actuellement, d'autres pistes sont étudiées pour récolter des bases de données.

Pour la validation du modèle, il serait intéressant de continuer la validation du modèle sur d'autres sites d'études. Un travail est en cours pour vérifier les capacités prédictives du modèle sur une base de données italienne.

Comme mentionné précédemment, les systèmes n'ont pas été analysés sur leurs performances socio-économiques. Il serait intéressant d'étudier le couplage du modèle Hi-sAFe avec un modèle économique. Le projet SAFE (à l'origine du modèle Hi-sAFe) avait initialement prévu de coupler les modèles Hi-sAFe et Farm-SAFE. Cependant, ce couplage n'a jamais été réalisé (Baron, 2018; Garcia de Jalon et al., 2016; Graves et al., 2011). Dans les années à venir, il serait intéressant de réexaminer cette possibilité afin d'évaluer les performances économiques des systèmes agroforestiers à base d'oliviers.

B) Les perspectives de recherche sur la démarche participative

Pour continuer ce projet de recherche, il serait intéressant d'organiser un deuxième atelier de co-conception, limité aux espèces disponibles dans le modèle. Des experts d'autres espèces pourraient être conviés à rejoindre le réseau d'acteurs et à participer au travail en cours sur la diversification des oliveraies. De plus, les prototypes d'outils avec la réalité augmentée permettent de projeter davantage les acteurs dans la parcelle (visualisation de l'emboîtement spatial des arbres, de l'ombrage, etc.). L'utilisation de tels outils peut contribuer à réduire les limites de cette approche et ouvre ainsi des perspectives. Par ailleurs, afin que les acteurs s'approprient plus facilement les résultats d'évaluations des performances agronomiques et environnementales des systèmes, l'utilisation d'autres outils pourraient être envisagés (vidéos, MOOC, etc.). Lors de l'atelier de co-évaluation, les résultats ont été présentés sous format d'exposé oral avec comme support un simple diaporama. Il m'est clairement apparu que davantage de temps d'échanges aurait été nécessaire et que notamment les graphes ne sont pas toujours le meilleur moyen de présenter des résultats si complexes. D'autres types de visualisation de résultats doivent être pensés (spiderchart par exemple).

C) Les perspectives de recherche sur la démarche d'évaluation par modélisation

Les perspectives de recherche suite aux deux études portant sur l'évaluation des systèmes agroforestiers

Dans le contexte de l'étude sur les systèmes co-conçus, une exploration de l'apport d'azote et des interactions hydriques entre les oliviers et d'autres espèces de légumineuses, telles que la luzerne ou des espèces pérennes, s'avèrerait utile. Cependant, cela requiert une paramétrisation et une calibration approfondie de ces nouvelles cultures intercalaires. Concernant le système olivier-laitue-rotation, une piste d'étude intéressante serait d'examiner la faisabilité de deux cycles annuels de culture de laitue, avec une interruption lorsque la frondaison des oliviers atteint un niveau significatif. Ces simulations ne seront possibles qu'avec l'arrivée de la version 4.3 du modèle. Dans le temps imparti pour la thèse, un système co-conçu par les acteurs n'a pas été adapté pour être intégré aux capacités de simulation du

modèle, ni même exposé à une simulation. Ce système, caractérisé par trois zones distinctes de culture (impliquant oliviers, vignes et cultures annuelles intercalaires), pourrait être évalué à l'aide de la version 4.3 du modèle (offrant la possibilité de gérer plusieurs zones de culture).

Dans le cadre de l'étude portant sur la résilience des systèmes oléicoles traditionnels et agroforestiers, il serait pertinent de ré-exécuter les simulations en utilisant les projections climatiques du scénario RCP 8.5. De plus, afin d'évaluer la réaction des systèmes co-conçus aux impacts du changement climatique, il serait judicieux d'analyser leurs performances sous des conditions climatiques futures (RCP 4.5 et 8.5).

Les perspectives de recherche nouvelles

Dans les années à venir, le secteur agricole va devoir relever un certain nombre de défis agronomiques et environnementaux. L'un de ces défis réside dans la raréfaction de la ressource hydrique dû en partie au changement climatique.

Aujourd'hui, la ressource en eau est considérée comme « l'or bleu ». Elle est de plus en plus convoitée, même en France, et la « guerre de l'eau » a commencé et continuera de s'intensifier en raison de sa raréfaction (« Main basse sur l'eau : la bataille de l'or bleu, » 2019). Dans ce contexte de changement climatique, nos systèmes de culture doivent évoluer pour devenir de plus en plus efficaces dans l'utilisation de cette ressource. De plus, le changement climatique va augmenter les besoins en irrigation dans les vergers de plus de 15% (Fraga et al., 2020b; Rodríguez Sousa et al., 2020). Il est donc urgent d'optimiser cette ressource précieuse dans les systèmes agroforestiers à base d'oliviers. Un article a déjà démontré qu'en réduisant l'irrigation, l'efficacité d'utilisation de l'eau s'améliore (Mairech et al., 2020).

Le modèle Hi-sAFé peut être un outil pertinent pour étudier les performances agronomiques et environnementales du système en réduisant les apports en eau et éventuellement en azote. Il serait intéressant d'identifier une solution optimale qui permette d'obtenir des performances agronomiques et environnementales intéressantes tout en minimisant l'utilisation d'eau et d'engrais azotés/phosphatés. Cette solution optimale pourrait être identifiée en effectuant un grand nombre de simulations et en analysant ces simulations à l'aide d'un algorithme d'optimisation multicritères (Figure 86) (Zelinka et al., 2012).

De plus, face au changement climatique, l'aire de répartition des oliviers change (Tanasijevic et al., 2014). En France, cette zone semble s'étendre. Des études ont même démontré que les zones le long de l'atlantique deviennent viables pour des oliviers (Sparks and Menzel, 2002). À ce jour, des projets de plantation d'oliviers sont envisagés dans des régions qui n'ont pas d'antécédents de culture oléicole. Dans le cadre du projet Oil'Ive Green⁴, une superficie de 60 000 hectares sera dédiée à la plantation d'oliviers pour revitaliser la production d'olives, englobant diverses régions allant de la Gironde à la région PACA. Un modèle mécaniste comme Hi-sAFé est particulièrement bien adapté pour simuler des systèmes dans des conditions pédoclimatiques pour lesquelles on ne dispose pas encore de données expérimentales. Il serait particulièrement instructif de simuler et d'analyser les performances des systèmes oléicoles traditionnels et agroforestiers dans le contexte pédoclimatique propre à la région de la Gironde, par exemple.

Conclusion

⁴ <https://www.ladepeche.fr/2023/06/04/oilive-green-lance-la-plantation-de-60-000-hectares-doliviers-11239793.php>

En conclusion, le modèle Hi-sAFe a été adapté avec succès à l'olivier et il ouvre des perspectives intéressantes sur d'autres arbres fruitiers, ou même d'arbres tropicaux (du fait de la possibilité d'avoir plusieurs cohortes de feuilles simultanément). Les étapes d'implémentation de formalismes, de paramétrage, d'analyse de sensibilité, de calibration et de vérification que j'ai effectuées ont conduit à la version 4.2 du modèle, qui intéresse d'ores et déjà plusieurs équipes internationales. Une approche participative a également été mise en place pour co-concevoir différents systèmes agroforestiers à base d'oliviers en collaboration avec divers acteurs, que ce soit par le biais de discussions individuelles ou d'ateliers de co-conception.

L'atelier de co-conception a abouti à l'identification de trois systèmes à base d'oliviers, parmi lesquels deux ont été soumis à une évaluation des performances agronomiques et environnementales par modélisation. L'évaluation du système olivier - pois d'hiver a révélé une compétition significative pour les ressources hydrique et azoté entre ces deux espèces, malgré la fixation d'azote par la légumineuse. En ce qui concerne le système olivier - laitue - rotation, l'évaluation a démontré une productivité globale plus élevée par rapport à une oliveraie traditionnelle, bien que cette expérimentation virtuelle soit sensiblement influencée par les apports en eau et en azote.

Dans le contexte du changement climatique, mon travail de thèse montre que les systèmes agroforestiers à base d'oliviers restent plus productifs que les monocultures oléicoles traditionnelles, tant sous les conditions climatiques actuelles que futures. Il montre également que si les sols profonds offrent des possibilités d'augmentation des rendements sous climat futur, les sols peu profonds peuvent quant à eux entraîner des diminutions de rendement.

Les perspectives de recherche et les possibilités de simulation sont prometteuses, et le modèle Hi-sAFe s'avère être un outil particulièrement adapté pour aborder les questions scientifiques liées aux performances des systèmes agroforestiers à base d'oliviers. L'exploration des performances agronomiques et environnementales de ces systèmes en est encore à ses débuts, et des travaux de recherche continueront à se développer dans les années à venir sur ce sujet.

Bibliographie du chapitre 9

Amassaghrou, A., Barkaoui, K., Bouaziz, A., Alaoui, S.B., Fatemi, Z.E.A., Daoui, K., 2023. Yield and related traits of three legume crops grown in olive-based agroforestry under an intense drought in the South Mediterranean. *Saudi J. Biol. Sci.* 30, 103597. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2023.103597>

Amassaghrou, A., Bouaziz, A., Karrou, M., Barkaoui, K., Razouk, R., Daoui, K., 2016. Agroforestry systems in Morocco, grain legumes and olive trees in Saïs region: Moulay Driss Zerhoun case. Presented at the Marrakech, International Conference on Pulses (ICP). Daoui K on Jul, p. 2016.

Baron, G., 2018. Comparison of the profitability of an arable rotation, a monoculture olive system and a silvoarable system in Greece using the Farm-SAFE model. Presented at the European Agroforestry Conference-Agroforestry as Sustainable Land Use, 4th, EURAF.

Bouregaa, T., 2019. Impact of climate change on yield and water requirement of rainfed crops in the Setif region. *Manag. Environ. Qual. Int. J.* 30, 851–863. <https://doi.org/10.1108/MEQ-06-2018-0110>

Brilli, L., Lugato, E., Moriondo, M., Gioli, B., Toscano, P., Zaldei, A., Leolini, L., Cantini, C., Caruso, G., Gucci, R., Merante, P., Dibari, C., Ferrise, R., Bindi, M., Costafreda-Aumedes, S., 2019. Carbon sequestration capacity and productivity responses of Mediterranean olive groves under future climates and management options. *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Change* 24, 467–491. <https://doi.org/10.1007/s11027-018-9824-x>

Buonaurio, R., Almadi, L., Famiani, F., Moretti, C., Agosteo, G.E., Schena, L., 2023. Olive leaf spot caused by *Venturia oleaginea*: An updated review. *Front. Plant Sci.* 13, 1061136. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1061136>

Centre technique de l'olivier, 2015. Protection raisonnée et biologique des oliviers.

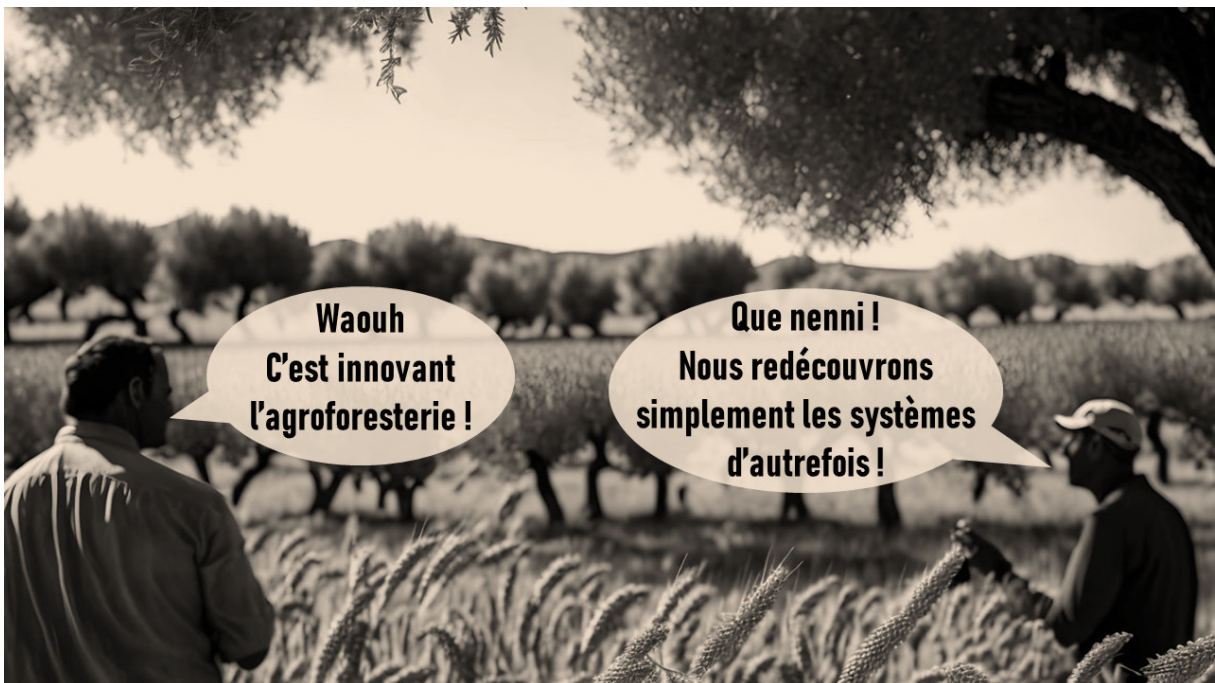
- Cooper, J., Lombardi, R., Boardman, D., Carliell-Marquet, C., 2011. The future distribution and production of global phosphate rock reserves. *Resour. Conserv. Recycl.* 57, 78–86. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.09.009>
- Fraga, H., Moriondo, M., Leolini, L., Santos, J.A., 2020a. Mediterranean olive orchards under climate change: A review of future impacts and adaptation strategies. *Agronomy* 11, 56. <https://doi.org/10.3390/agronomy11010056>
- Fraga, H., Pinto, J.G., Santos, J.A., 2020b. Olive tree irrigation as a climate change adaptation measure in Alentejo, Portugal. *Agric. Water Manag.* 237, 106193. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106193>
- García de Jalón, S., Graves, A., Kaske, K.J., Palma, J., Crous-Duran, J., Burgess, P.J., 2016. Assessing the environmental externalities of arable, forestry and silvoarable systems: new developments in farm-SAFE. Presented at the 3rd European Agroforestry Conference Montpellier, 23-25 May 2016, EURAF.
- Graves, A.R., Burgess, P.J., Liagre, F., Terreaux, J.-P., Borrel, T., Dupraz, C., Palma, J., Herzog, F., 2011. Farm-SAFE: the process of developing a plot-and farm-scale model of arable, forestry, and silvoarable economics. *Agrofor. Syst.* 81, 93–108. <https://doi.org/10.1007/s10457-010-9363-2>
- Gross, M., 2010. Fears over phosphorus supplies. *Curr. Biol.* 20, R386–R387. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2010.04.031>
- Gutierrez, A.P., Ponti, L., Cossu, Q.A., 2009. Effects of climate warming on Olive and olive fly (*Bactrocera oleae* (Gmelin)) in California and Italy. *Clim. Change* 95, 195–217. <https://doi.org/10.1007/s10584-008-9528-4>
- Iooss, B., Lemaître, P., 2015. A review on global sensitivity analysis methods. *Uncertain. Manag. Simul.-Optim. Complex Syst. Algorithms Appl.* 101–122. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-7547-8_5
- Jose, S., 2009. Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. *Agrofor. Syst.* 76, 1–10. <https://doi.org/10.1007/s10457-009-9229-7>
- Katragkou, E., García-Díez, M., Vautard, R., Sobolowski, S., Zanis, P., Alexandri, G., Cardoso, R.M., Colette, A., Fernandez, J., Gobiet, A., 2015. Regional climate hindcast simulations within EURO-CORDEX: evaluation of a WRF multi-physics ensemble. *Geosci. Model Dev.* 8, 603–618. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-603-2015>
- Lemière, L., Jaeger, M., Subsol, G., Gosme, M., 2022. Graphs theory applied to agroforestry system design. Poster H10. In : En transition vers un monde viable. Québec : Université de Laval-IUAF-ICRAF, Résumé, 1 p. Congrès mondial d'agroforesterie, Québec, Canada.
- López-Escudero, F., Blanco-López, M., 2005. Recovery of young olive trees from *Verticillium dahliae*. *Eur. J. Plant Pathol.* 113, 367–375. <https://doi.org/10.1007/s10658-005-3145-0>
- Main basse sur l'eau : la bataille de l'or bleu, 2019. ARTE.
- Mairech, H., López-Bernal, Á., Moriondo, M., Dibari, C., Regni, L., Proietti, P., Villalobos, F.J., Testi, L., 2020. Is new olive farming sustainable? A spatial comparison of productive and environmental performances between traditional and new olive orchards with the model OliveCan. *Agric. Syst.* 181, 102816. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102816>
- Menegat, S., Ledo, A., Tirado, R., 2022. Greenhouse gas emissions from global production and use of nitrogen synthetic fertilisers in agriculture. *Sci. Rep.* 12, 14490. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-18773-w>
- Mew, M., Steiner, G., Haneklaus, N., Geissler, B., 2023. Phosphate price peaks and negotiations—Part 2: The 2008 peak and implications for the future. *Resour. Policy* 83, 103588. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103588>
- Miranda-Fuentes, A., Llorens, J., Gamarra-Diezma, J.L., Gil-Ribes, J.A., Gil, E., 2015. Towards an optimized method of olive tree crown volume measurement. *Sensors* 15, 3671–3687. <https://doi.org/10.3390/s150203671>

- Moriana, A., Orgaz, F., Pastor, M., Fereres, E., 2003. Yield responses of a mature olive orchard to water deficits. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 128, 425–431. <https://doi.org/10.21273/JASHS.128.3.0425>
- Orlandi, F., Rojo, J., Picornell, A., Oteros, J., Pérez-Badia, R., Fornaciari, M., 2020. Impact of climate change on olive crop production in Italy. *Atmosphere* 11, 595. <https://doi.org/10.3390/atmos11060595>
- Orlandi, F., Ruga, L., Romano, B., Fornaciari, M., 2005. Olive flowering as an indicator of local climatic changes. *Theor. Appl. Climatol.* 81, 169–176. <https://doi.org/10.1007/s00704-004-0120-1>
- Palma, J.H.N., 2017. CliPick – Climate change web picker. A tool bridging daily climate needs in process based modelling in forestry and agriculture. *For. Syst.* 26, eRC01. <https://doi.org/10.5424/fs/2017261-10251>
- Palma, J.H.N., Graves, A.R., Burgess, P.J., Keesman, K.J., van Keulen, H., Mayus, M., Reisner, Y., Herzog, F., 2007. Methodological approach for the assessment of environmental effects of agroforestry at the landscape scale. *Ecol. Eng.* 29, 450–462. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.09.016>
- Panozzo, A., Bernazeau, B., Desclaux, D., 2020. Durum wheat in organic olive orchard: good deal for the farmers? *Agrofor. Syst.* 94, 707–717. <https://doi.org/10.1007/s10457-019-00441-0>
- Ponti, L., Gutierrez, A.P., Ruti, P.M., Dell’Aquila, A., 2014. Fine-scale ecological and economic assessment of climate change on olive in the Mediterranean Basin reveals winners and losers. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 111, 5598–5603. <https://doi.org/10.1073/pnas.1314437111>
- Quesada, J.M., Garcia, A., Bertolini, E., López, M.M., Penyalver, R., 2007. Recovery of *Pseudomonas savastanoi* pv. *savastanoi* from symptomless shoots of naturally infected olive trees. *Int. Microbiol.* 10, 77. <https://doi.org/10.2436/20.1501.01.11>
- Reyes, F., Gosme, M., Wolz, K.J., Lecomte, I., Dupraz, C., 2021. Alley Cropping Mitigates the Impacts of Climate Change on a Wheat Crop in a Mediterranean Environment: A Biophysical Model-Based Assessment. *Agriculture* 11, 356. <https://doi.org/10.3390/agriculture11040356>
- Rodrigues, M.Â., Correia, C.M., Claro, A.M., Ferreira, I.Q., Barbosa, J.C., Moutinho-Pereira, J.M., Bacelar, E.A., Fernandes-Silva, A.A., Arrobas, M., 2013. Soil nitrogen availability in olive orchards after mulching legume cover crop residues. *Sci. Hortic.* 158, 45–51. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.04.035>
- Rodrigues, M.Â., Pavão, F., Lopes, J.I., Gomes, V., Arrobas, M., Moutinho-Pereira, J., Ruivo, S., Cabanas, J.E., Correia, C.M., 2011. Olive yields and tree nutritional status during a four-year period without nitrogen and boron fertilization. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 42, 803–814. <https://doi.org/10.1080/00103624.2011.552656>
- Rodríguez Sousa, A.A., Barandica, J.M., Aguilera, P.A., Rescia, A.J., 2020. Examining potential environmental consequences of climate change and other driving forces on the sustainability of Spanish olive groves under a socio-ecological approach. *Agriculture* 10, 509. <https://doi.org/10.3390/agriculture10110509>
- Sanz-Cortiella, R., Llorens-Calveras, J., Escolà, A., Arnó-Satorra, J., Ribes-Dasi, M., Masip-Vilalta, J., Camp, F., Gràcia-Aguilá, F., Solanelles-Batlle, F., Planas-DeMartí, S., 2011. Innovative LIDAR 3D dynamic measurement system to estimate fruit-tree leaf area. *Sensors* 11, 5769–5791. <https://doi.org/10.3390/s110605769>
- Skendžić, S., Zovko, M., Živković, I.P., Lešić, V., Lemić, D., 2021. The impact of climate change on agricultural insect pests. *Insects* 12, 440. <https://doi.org/10.3390/insects12050440>
- Soil Association, 2010. A rock and a hard place: Peak phosphorus and the threat to our food security.
- Sparks, T.H., Menzel, A., 2002. Observed changes in seasons: an overview. *Int. J. Climatol. J. R. Meteorol. Soc.* 22, 1715–1725. <https://doi.org/10.1002/joc.821>
- Tanasijevic, L., Todorovic, M., Pereira, L.S., Pizzigalli, C., Lionello, P., 2014. Impacts of climate change on olive crop evapotranspiration and irrigation requirements in the Mediterranean region. *Agric. Water Manag.* 144, 54–68. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.05.019>

- Temani, F., Barkaoui, K., Bouaziz, A., Wery, J., 2018. Assessment of olive tree-barley interactions in Mediterranean agroforestry: barley grain and straw along a rainfall gradient in Morocco. PoS1-64. *Agroscope*.
- Temani, F., Bouaziz, A., Daoui, K., Wery, J., Barkaoui, K., 2021. Olive agroforestry can improve land productivity even under low water availability in the South Mediterranean. *Agric. Ecosyst. Environ.* 307, 107234. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107234>
- Therios, I.N., 2009. *Olives*. CABI.
- Tzanakakis, M., 2003. Seasonal development and dormancy of insects and mites feeding on olive: a review. *Neth. J. Zool.* 52, 87–224. <https://doi.org/10.1163/156854203764817670>
- Von Korff, Y., Dionnet, M., Imache, A., Geney, C., Rougier, J.-E., Leteurtre, E., Dolinska, O., 2013. *Manuel de facilitation*.
- Wenkel, K.-O., Schultz, A., 1999. Vom Punkt zur Fläche—das Skalierungs-bzw. Regionalisierungsproblem aus der Sicht der Landschaftsmodellierung. *Reg. Landschaftsökologie Forschung—Planung—Praxis* 19–42. https://doi.org/10.1007/978-3-322-90880-3_2
- Zelinka, I., Snasael, V., Abraham, A., 2012. *Handbook of optimization: from classical to modern approach*. Springer Science & Business Media.
- Zullo, B.A., Ciafardini, G., 2020. Potential of *Rhizobium sullae*–*Sulla coronaria* symbiotic biological nitrogen fixation to supplement synthetic mineral nitrogen in olive tree fertilization. *Agronomy* 10, 270. <https://doi.org/10.3390/agronomy10020270>

Les systèmes agroforestiers à base d'oliviers c'est

**...renouer avec nos racines agricoles :
la redécouverte des systèmes agricoles
de nos anciens**



Photographie issue d'un générateur IA d'image deepdreamgenerator (disponible sur : <https://deepdreamgenerator.com/>)

Annexes

Annexe I : Article de vulgarisation scientifique : « Complantations à base d'oliviers : un exemple de système agroforestier », par Hélène Lasserre et Nicolas Barbault (publié dans le *Nouvel olivier*, 2022)



Complantations

à base d'oliviers : un exemple de système agroforestier

par Hélène Lasserre, Directrice du pôle Conservation et Recherche à France Olive et Nicolas Barbault, Doctorant INRAE UMR ABSys (systèmes biodiversifiés).



Photo 1 : lavande entre oliviers. Projet oliveraies de miel, province de Madrid.

©Eva Miquel.



L'AGROFORESTERIE : SES AVANTAGES AGRONOMIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX

Comme définit par USDA (*Agroforestry Strategic Framework, 2011*), l'agroforesterie a pour principe d'associer à l'arbre, sur une même parcelle, et simultanément, une production agricole (végétale ou animale) qui interagissent entre eux.

Ce système de culture qu'est l'agroforesterie, peut être décliné en diverses sous-pratiques, comme le suggère un article de Dupraz et al. en 2018 :

- 1) les systèmes sylvopastoraux,
- 2) le pâturage forestier,
- 3) le pâturage boisé ou pâturage avec des vergers,
- 4) les systèmes sylvicoles,
- 5) la sylviculture,
- 6) les cultures en couloirs, taillis en couloirs ou cultures intercalaires de vergers,
- 7) l'agrosylvopastoral,
- 8) les mélanges séquentiels de systèmes sylvoarables et sylvopastoraux,
- 9) l'agroforesterie linéaire,
- 10) les bandes forestières,
- 11) les réseaux de brise-vent, haies boisées ou bandes d'arbres riverains.

L'AGROFORESTERIE : SES AVANTAGES AGRONOMIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX

Par des mécanismes de complémentarité et de facilitation, ces systèmes peuvent augmenter les fonctions biologiques et écologiques des parcelles et donc augmenter la production de certains services écosystémiques (des services rendus gratuitement par la Nature pour l'Homme). Le site de l'association française de l'Agroforesterie recense quelques fonctions biologiques et écologiques apportées par les arbres : améliorer et diversifier la production, restaurer la fertilité des sols, optimiser la consommation d'eau, augmenter la biodiversité, etc. Ces derniers sont en partie décrits et illustrés ci-dessous.

En termes de productivité, les travaux menés par les organismes de recherche ont montré que l'apport d'arbres en milieu agricole améliore la production des parcelles en optimisant les ressources du milieu. À titre d'exemple, un système de blé-noyer conduit au Domaine de Restinclières (Hérault) a montré qu'une parcelle de 100 Ha pouvait produire autant de biomasses (bois et produits agricoles) qu'une parcelle de 136 Ha, où arbres et cultures auraient été séparés, soit un gain de 36%. Cette intensification de la production résulte en partie d'un phénomène de complémentarité entre arbres et cultures : les plantes n'auront pas les mêmes besoins au même endroit et au même moment (étagement des cultures, systèmes racinaires de profondeurs variées, etc.). L'utilisation des ressources naturelles du milieu (lumière, eau et engrais) sera optimisée et les plantes prélèveront leurs ressources dans le milieu plus efficacement.

En terme environnemental, l'arbre joue un rôle prépondérant sur les différents processus écologiques. En remobilisant des minéraux des couches profondes du sol (inaccessibles par les plantes aux systèmes racinaires plus superficiels) et par la

décomposition de ses racines, l'arbre participe à augmenter la fertilité du sol : ainsi, 40 % de la biomasse d'un feuillu retourne au sol chaque année. De plus, les racines structurent le sol et permettent d'augmenter l'infiltration de l'eau.

Outre ces avantages, la création d'un microclimat par l'arbre sur la parcelle protège également les cultures et les animaux des stress thermiques et en partie des stress hydriques associés. L'arbre peut permettre d'amortir les accidents climatiques, en partie responsables de la stagnation des rendements des céréales en Europe.

Une étude menée par l'INRA, Agrofoot et l'Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse a même mis en évidence la capacité de dépollution des arbres. Véritables filtres, ils limitent une partie la lixiviation des nitrates, réduisant ainsi la pollution des nappes phréatiques. Cette fonction est particulièrement intéressante en zone vulnérable, telle que la gestion des zones de captage en eau potable. De plus, les systèmes racinaires des arbres augmentent la réserve utile en eau exploitable. Les arbres améliorent également l'infiltration du ruissellement, limitent l'évaporation du sol, etc.

L'introduction de culture avec des arbres augmente la diversité parcellaire et participe à la restauration des « continuités écologiques » à l'échelle du paysage.

Ces dernières années, l'arbre s'est retrouvé à l'épicentre de la lutte contre le changement climatique par son rôle déterminant dans le stockage du carbone puisque 99% de la matière solide de l'arbre provient du CO₂ atmosphérique. Les arbres sont donc d'excellents puits de carbone. Ainsi, une étude a démontrée qu'un frêne à maturité séquestre près de 3kg de CO₂ par an. Les arbres permettent non seulement d'atténuer les effets du changement climatique, mais aussi de s'adapter, puisqu'ils recapitalisent les sols en carbone, source de fertilité (www.agroforesterie.fr).



LA FRANCE CHAMPIONNE DE COMPLANTATION VIGNE-OLIVIER

[La complantation... du latin complantare, planter ensemble. Planter un terrain d'espèces différentes (par ex vigne et arbres fruitiers)]

Dans ce registre d'association, celle avec des arbres est une tradition de longue date ! Le mariage de la vigne notamment avec d'autres ligneux en témoigne puisque dès l'Antiquité, les branches des arbres servaient de support aux longs sarments de cette liane qu'est la *Vitis vinifera* en zone méditerranéenne.



Illustration 1 : Le *taquinum sanitatis* (XIII^{ème} siècle) dérivé d'un ouvrage arabe *Taqwim ab-suha*, composé au XI^{ème} siècle par un médecin de Bagdad, Ibn Botlân dit Albucasis.

Du Moyen-Âge (cf illustration n°1) au XIX^{ème} siècle, cette association est décrite dans plusieurs régions françaises (Provence, Aquitaine, Périgord, Garonne, Piémont pyrénéen, etc.) qui gardent encore quelques stigmates dans le paysage viticole (cf photos 2 et 3).

Si dans d'autres régions des espèces champêtres telles que les ormes, érables, frênes, peupliers et autres étaient associées à la vigne, dans le sud-est, c'était majoritairement des fruitiers dont l'olivier - aux côtés de l'amandier et du figuier également qui accompagnaient les ceps.

Ces systèmes étaient souvent complétés avec une strate herbacée entre les vignes, composée soit de céréales soit de légumes.

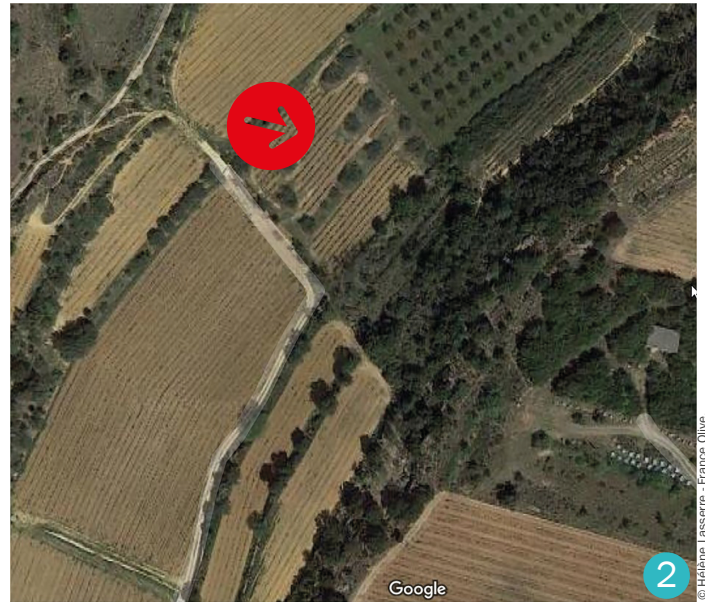


Photo 2 : zoom sur la commune de Saint-Jean-de-Fos.



Photo 3 : zoom sur la parcelle de la commune de Saint-Jean-de-Fos ci-dessus.

Que ce soit en oullière, hautain, joualle, tout un vocabulaire spécialisé décrivait des conduites (Cf. Tableau 1), très souvent en zone viticole, que Christian Dupraz et Fabien Lagre dans leur ouvrage « *Agroforesterie : des arbres et des cultures* » détaillent pour nous rappeler les anciennes pratiques.

Les oullières se caractérisaient par des intervalles cultivés en céréales et en plantes sarclées, entre des lignes de ceps complantés avec des arbres fruitiers, dont l'olivier.

L'illustration 2 présente une association à trois étages, avec des ceps plantés tous les 5 m de largeur.

Dans certains cas, les oliviers étaient simplement complantés avec la vigne (illustration 3).



Fig. 198. — Oulière avec vignes dominées par des oliviers.

FIGURE 1 : Une association à 3 étages : oliviers, vignes et céréales. Illustration du livre «Les primes d'honneur, les médailles de spécialités et les prix d'honneur des fermes-écoles décernés dans les Concours Régionaux en 1867». Paris. Imprimerie Impériale. (Source : Ministère de l'Agriculture et de la Pêche)

2 ©Dupraz

Illustration 2 : oulière avec vignes dominées par les oliviers.

Dans ces cultures en *ouillères*, les oliviers sont disposés en lignes régulières et plus ou moins espacées suivant les pays et les plantes qui occupent leurs intervalles. Généralement on laisse de huit à quinze mètres entre les lignes, et sur celles-ci les arbres sont espacés de sept mètres environ (fig. 34).



3 ©Aygalierse

Illustration 3 : extrait « l'olivier et l'huile d'olive » de P D'Aygalliers - 1900.

Encore aujourd'hui, ces schémas de plantation sont présents et peuvent être aperçus lorsque le regard se prend à observer le paysage (cf photos 4 et 5).



4 © Hélène Lasserre - France Olive

Photo 4 : oulière héraultaise (1 rangée d'olivier alternant avec 2 rangées de vignes).



5 © Hélène Lasserre - France Olive

Photo 5 : oulière nyonsaise.

Les hautains étaient utilisés dès l'Antiquité pour permettre à la vigne de se développer en hauteur dans les arbres, généralement dans un contexte où le paysan disposait de peu de terres cultivables, l'objectif étant d'optimiser l'espace. Par cette polyculture verticale, ses compléments de revenus étaient appréciés (notamment pour de simples métayers qui cherchaient à valoriser le peu de terre disponible).

Les joualles combinaient vigne et arbres fruitiers, régulièrement espacés. Système transitoire entre vigne et verger, cette complantation a explosé en France avec l'arrivée du phylloxera. Pour compenser la mortalité des ceps, les espaces vacants étaient replantés en arbre fruitier et en olivier dans le sud de la France.

Tableau 1 : les différents types et principales caractéristiques de complantations vigne-olivier

Type	Etagement de la vigne	Disposition spatiale de l'olivier
Ouillères	Horizontal	Rang
Hautains	Vertical	Rang
Joualles	Horizontal	En remplacement de ceps de vigne

Ces associations étaient mises en place également dans des contextes bien précis : dans des zones gélives pour la protection du vignoble, dans des zones humides contre les maladies du feuillage - mais souvent en raison de la sensibilité de l'olivier à ce même contexte, d'autres essences devaient être utilisées préférentiellement, ou dans des zones très sèches pour tempérer les chaleurs estivales et les insulations.

Véritable niche écologique, l'arbre introduit apporte également une diversité paysagère et offre une « mixité » d'habitats, de refuges, de ressources alimentaires, de zones de chasse, de reproduction et d'hivernage. L'arbre est vraiment un élément positif qui contribue en tout point à la biodiversité parcellaire et plus généralement à la biodiversité paysagère.

Encore aujourd'hui, les recherches se poursuivent pour quantifier l'effet bénéfique des arbres (notamment sur l'état sanitaire de la parcelle). Ces systèmes sont une solution parmi d'autres pour maintenir la préservation de la biodiversité en complémentarité des autres solutions apportées, et ce, dans une démarche agroécologie et de réduction des intrants phytosanitaires.

Le remembrement et la mécanisation ont entraîné en grande partie la disparition de ces formes complantées vigne - olivier. Pourtant, aujourd'hui force est de constater les bénéfices de l'arbre dans le microclimat de la vigne, la réintroduction des complantations vigne-olivier se posent.

Les observations réalisées à l'IFV (Institut Français de la Vigne et du Vin) de l'impact du changement climatique sur le vignoble, mettent en relief le rôle des arbres dans la modification des flux d'énergie et donc de leur influence sur le comportement de la vigne.

En effet, l'implantation de rangées d'arbres au milieu de la vigne modifie les flux d'énergie et par conséquent le bilan hydrique de la vigne, la durée d'humectation des feuilles et l'exposition des grappes.



De même, l'ombrage induite par les arbres atténue les effets délétères des pics de chaleur au nord des arbres et entretient le recyclage de l'humidité qui contrecarre l'assèchement de l'air. Ces effets favorisent un temps plus long d'ouvertures des stomates des feuilles de vigne favorisant ainsi la synthèse de carbone par la photosynthèse. Cette zone d'influence créée par les oliviers dépend étroitement de la hauteur, de la porosité et de la forme de leur canopée.

Des travaux récents ont permis de prouver que l'ombre s'applique sur une distance d'environ une à deux fois la hauteur de l'arbre (H) en fonction de l'heure du jour et de la période de l'année. De plus, en aval de haies denses, la vitesse du vent est réduite sur une distance de l'ordre de 4H.

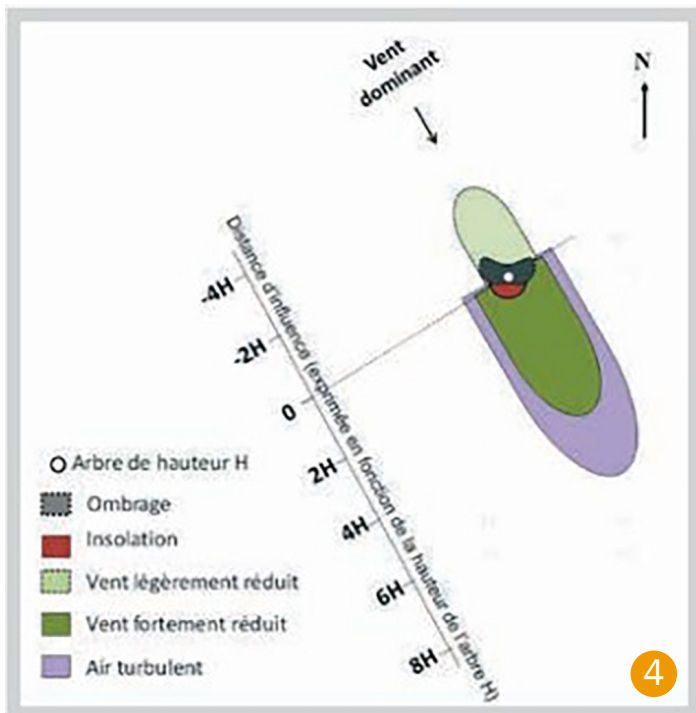


Illustration 4 : aire d'impact des arbres sur le microclimat en leur voisinage. Plusieurs micro-climats peuvent se combiner du fait de l'ombrage, de l'interception du vent par leur canopée et, dans le cas de feuillages très denses, d'une augmentation temporaire de la turbulence du flux d'air.

Certes, au fil des années, une concurrence progressive peut se mettre en place pour l'accès à la ressource en eau et la captation de la lumière. Mais la vigne dispose d'une plasticité phénotypique souterraine lui permettant de reconfigurer la localisation de ses prélèvements en eau, si bien que finalement, les compétitions peuvent être limitées.

La réussite de ce partenariat dépend bien sûr d'autres facteurs comme le choix du bon porte-greffe du cépage, judicieux pour s'adapter à cette configuration, une bonne connaissance du sol, et une gestion éclairée de la couverture du sol.

À ce jour, peu de systèmes agroforestiers sont installés en France, mais une réflexion sérieuse a permis l'implantation de quelques projets pionniers, notamment dans les zones viticoles du sud-ouest, écrasées par une monoculture exacerbée.

Au-delà du concept, l'entretien des deux cultures complantées exige une maîtrise des compétitions entre ces espèces. La gestion des arbres a une incidence sur la régulation de l'ombrage et de l'encombrement spatial. Sans penser

à la récolte s'il y a, d'importants élagages (tous les 10 ans) permettraient d'entretenir des formes moins encombrantes de type trogne. Les oliviers n'étaient également pas épargnés par ce type d'élagage, comme quelques vestiges perdus dans le piémont catalan nous le suggèrent. Ces étêtages, souvent sources de fourrage pour les troupeaux de moutons et de bois, permettaient entre autres de « rajeunir » les charpentières.

Ainsi, dans le sud de la France, l'olivier depuis des siècles a accompagné la vigne.

Dans ces zones traditionnelles, quelques témoignages émouvants se retrouvent sur cette cohabitation passée où chacun trouvait sa juste place. En atteste cette parcelle, cachée dans le massif des Maures, joyau d'un passé endormi : majestueux et trônant fièrement au milieu de vieilles vignes, des oliviers multiséculaires semblent protéger ces vieux ceps, du soleil ardent varois (cf photo 6).



Photo 6 : complantation vigne et olivier dans le Var.

Ce « bon » arbre qu'est l'olivier, est rustique et adapté au même terroir que la vigne. Ces systèmes complantés, présentent des travaux techniques complémentaires : ainsi, tailles respectives et récoltes pour l'huile se succèdent optimisant ainsi la pérennisation de la main d'œuvre sur la majorité de l'année.

Pourtant, dès le siècle dernier, ces systèmes ont été remis en cause et les cahiers des charges de la majorité des AOP oléicoles françaises proscrivent les cultures intercalaires pour des raisons sanitaires notamment.

Cette façon d'associer arbres et vignes est devenue désormais obsolète, en raison également de la main d'œuvre nécessaire. Souvent, le coût d'un tel système de culture moins bien mécanisable, n'est pas compensé par une augmentation du revenu.

En Espagne, les oliveraies extensives ont souvent accueilli des cultures intercalaires de céréales (blé, orge, avoine et triticale) et aujourd'hui encore des programmes de développement travaillent sur l'optimisation de la rentabilité d'agrosystèmes multispécifiques, optimisant des productions de qualité. C'est dans cette optique que depuis 2016, un partenariat entre l'institut de recherche andalou l'IFAPA et une célèbre marque de bière s'est mis en place sur l'aspect efficience de l'eau dans un système mixte olivier-orge.



Photo 7 : culture d'orge de brasserie en inter rang des oliviers en province de Jaen, en Andalousie.



Photo 8 : projet Olivier, focus sur des partenaires fiers d'une bière « plus verte ».

En Italie, dans un pays où plus de 100 000 ha sont dédiés à l'agroforesterie, l'olivier trouvait légitimement sa place dans des agrosystèmes situés dans des parcelles pentues, abruptes et peu fertiles où céréales, agrumes, vigne et oliviers cohabitaient.

Des oliviers centenaires et imposants qui, du haut de leur 30 mètres, ont dominé ou dominant encore les complantations. Cependant, les récentes réformes de la Politique Agricole

Commune ont encouragé l'intensification de l'oléiculture en permettant la mutation d'oliveraies traditionnelles extensives en oliveraies modernes, car plus intensives et dans des terres plus fertiles. Cette évolution a entraîné l'abandon de ces oliveraies traditionnelles multi-spécifiques en sous-estimant les conséquences de pertes constantes de biodiversité, de simplification de paysage et d'épuisement des ressources naturelles (Brunori et al, 2020).

FOCUS SUR LA RIVE SUD DE LA MÉDITERRANÉE

(Amassaghrou et al, 2021)

En Afrique du Nord, les systèmes agroforestiers à base d'oliviers sont très répandus et diversifiés. L'olivier est au cœur des systèmes de production des petits agriculteurs, souvent associé à d'autres espèces fruitières (amandier, caroubier, figuier, figuier de barbarie) et à des cultures intercalaires de type céréales, fabacées alimentaires (lentille, fève et pois chiches) ou cultures fourragères en conditions pluviales, cultures maraîchères en conditions irriguées. Ce type de culture fait toujours partie des paysages ruraux traditionnels, dominant dans les zones oasiennes, accidentées et arides où les agriculteurs cherchent à maximiser la rentabilité de la terre agricole et à augmenter l'efficacité d'utilisation des ressources. Ces associations agroforestières constituent une stratégie de production que les agriculteurs adoptent pour diversifier les productions et leurs sources de revenus tout au long de l'année et faire face aux aléas climatiques importants comme la sécheresse de la région. Si la productivité des céréales s'avère plus faible qu'en monoculture et déprécie celle de l'olivier, ce n'est pas le cas des fabacées qui sont moins compétitives vis-à-vis de l'olivier que les céréales car plus précoces. Cependant, quelle que soit l'espèce cultivée, associée, ces systèmes agroforestiers s'avèrent plus productifs et efficaces que les systèmes de culture pure.

L'intérêt de ces systèmes complantés est largement démontré et des recherches sont en cours. Peut-être que dans les prochaines années, ces systèmes complantés vigne-olivier auront le vent en poupe et seront autorisés dans le cahier des charges des principales AOP à condition que les verrous sanitaires soient débloqués.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les complantations d'olivier... Une sémantique désuète en voie de rétablissement ?

Longtemps pratiquée, l'association de l'olivier à d'autres cultures a disparu de nos paysages avec la mécanisation de l'agriculture du XX^e siècle et l'intensification de notre agriculture dite moderne. Pourtant aujourd'hui, les limites à ce mode de conduite apparaissent notamment dans des contextes de changement climatique où la raréfaction de l'eau, les phénomènes de canicules, l'essor du parasitisme, nous amènent à reconcevoir le verger autrement.

Dans cette optique agroécologique, l'agroforesterie à base d'oliviers, peut être une solution parmi d'autres pour maintenir des paysans et un paysage, dans une zone où l'olivier est considéré comme un moyen de production et un moyen d'occupation du territoire. Bien qu'il n'existe pas encore de références techniques et scientifiques en matière de vigne-olivier, cette ancienne nouvelle association pourrait permettre à ces deux espèces de cohabiter harmonieusement dans des contextes climatiques, économiques de plus en plus prégnants et dans le souci d'améliorer encore un peu plus les facteurs de production.



Largement répandue dans tout le bassin méditerranéen oléicole, cette agroforesterie oléicole s'exprime encore pleinement dans les régions sud italiennes où il n'est pas rare d'observer en Calabre ou en Sicile des oliveraies traditionnelles multifonctionnelles alliant agriculture, activités sylvopastoralisme et conservation de la biodiversité des habitats.

Les services écosystémiques sont reconnus :

- Maintien de la diversité biologique des habitats,
- Maintien de la productivité des sols et de leur utilisation durable,
- Amélioration du bilan et de la qualité de l'eau,
- Réduction des incendies,
- Préservation de l'agriculture traditionnelle, des paysages et des savoirs.

En Espagne, cette réflexion d'occupation des inter-rangs des oliveraies traditionnelles moins rentables, car extensives, est menée à travers divers programmes dont Diverfarming avec des exemples de diversification à base de plantes aromatiques comme le lavandin ou le safran.



Photo 9 : exemple de complantation vigne lavandin dans la province de Guadalajara, berceau ibérique de la lavande, permettant non seulement la production d'olives pour l'huile, de fleurs de lavande pour les huiles essentielles et la cosmétique, voire de fourrages avec des semis de mélange vesce-avoine dans les inter-rangs de lavandins, mais également limitant l'érosion des sols et restaurant progressivement leur fertilité.

Une reconceptualisation du verger peut s'avérer prometteuse dans certains territoires et contextes socio-économiques. En revanche, dans le contexte économique actuel (caractérisé notamment par une pénurie de main d'œuvre), cette reconceptualisation du verger de demain doit également être pensée avec un besoin de main d'œuvre limité et/ou nécessitant la mécanisation de certaines pratiques culturales.

Ainsi, concevoir l'agriculture de demain, c'est aussi reconcevoir et tester des agrosystèmes différents, composites : telle est la réflexion menée par Nicolas Barbault dans le cadre de ses travaux de thèse à l'INRAE à Montpellier (supervisé par Pierre-Éric Lauri, Marie Gosme et Christian Dupraz).

Tester et évaluer la durabilité agronomique et environnementale des systèmes diversifiés à base d'oliviers sont ses objectifs au

quotidien. Les systèmes diversifiés à base d'oliviers sont conçus avec un réseau d'acteurs oléicoles.

Ces systèmes, co-construits avec ce réseau, seront par la suite testés et évalués avec le modèle agroforestier Hi-SAFE. Cet outil informatique permet de représenter la dynamique de développement et de production de systèmes agroforestiers au cours du temps (de la plantation à la fin de vie de la parcelle).

En sortie du modèle, les systèmes seront évalués en fonction de leur durabilité agronomique (notamment le rendement) et de leur durabilité environnementale (cycles du carbone, de l'azote, de l'eau, augmentation de la fertilité du sol, etc.).

Au vu de l'impact du réchauffement climatique et de la demande croissante en aliment de qualité, modifier nos systèmes de culture et nos pratiques afin de produire autant, voire plus tout en protégeant l'environnement n'est plus une utopie, mais bien une route à suivre. Les associations de culture devraient aller de l'avant et continuer à se développer en France et plus largement dans le monde.

POUR APPROFONDIR LA RÉFLEXION

- Itinéraires N° 28 Agroforesterie et viticulture. IFV.
- Dupraz C., Liagre F., 2008. *Agroforesterie - des arbres et des cultures*. Editions France Agricole, 410.
- Amassaghrou A, Bouaziz A, Daoui K, Belhouchette H, Ezzahouani A, Barkaoui K. 2021. *Productivité et efficacité des systèmes agroforestiers à base d'oliviers au Maroc : cas de Moulay Driss Zerhoun*. Cah. Agric. 30: 2.
- Brunori, E., Maesano, M., Moresi, F. V., Matteucci, G., Biasi, R., & Scarascia Mugnozza, G. (2020). *The hidden land conservation benefits of olive-based (Olea europaea L.) landscapes : An agroforestry investigation in the southern Mediterranean (Calabria region, Italy)*. Land Degradation & Development, 31(7), 801-815.
- <https://www.agroforesterie.fr/>



Photo 10 : complantation vigne olivier sur les terrasses de la Cadière d'Azur (83).

Annexe II : Rapport de stage de Nolwenn Poulailhon « Evaluation par la modélisation des performances agronomiques et environnementales de systèmes agroforestiers à base d'oliviers en réponse au changement climatique »

L'Institut Agro Rennes-Angers

Site d'Angers Site de Rennes

Année universitaire : 2022 - 2023

Mention : Master Biologie, Agrosociences

Parcours : Amélioration Production et
Valorisation du Végétal (APVV)

Option : Fonctionnement et Gestion des
Agrosystèmes (FGA)

Mémoire de fin d'études

d'ingénieur de l'Institut Agro Rennes-Angers (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)

de master de l'Institut Agro Rennes-Angers (Institut national d'enseignement supérieur pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement)

de l'Institut Agro Montpellier (étudiant arrivé en M2)

d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)

Evaluation par la modélisation des performances agronomiques et environnementales de systèmes agroforestiers à base d'oliviers en réponse au changement climatique

Par : Nolwenn POULLAILLON



Soutenu à Rennes le 21/06/2023

Devant le jury composé de :

Président : Matthieu Carof

Maîtres de stage : Nicolas Barbault et Marie Gosme

Enseignant référent : Olivier Godinot

Rapporteur : Romane Mettauier

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle de l'Institut Agro Rennes-Angers et l'université de Rennes

Ce document est soumis aux conditions d'utilisation « Paternité-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de Modification 4.0 France » disponible en ligne <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr>



Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de mon stage et qui m'ont aidé lors de la rédaction de ce rapport. Tout d'abord, j'adresse mes remerciements à Nicolas Barbault pour son encadrement et son aide précieuse tout au long du stage. Merci de m'avoir fait découvrir le monde de la modélisation et la culture de l'olivier.

Je tiens à remercier Marie Gosme pour sa confiance et son expertise. Je souhaite aussi remercier Christian Dupraz pour ses conseils avisés. Un grand merci également à Isabelle Lecomte pour son soutien technique et son assistance concernant Hi-sAFé. J'adresse tous mes remerciements à toute l'équipe de l'UMR ABSys pour son accueil chaleureux.

Enfin, j'aimerais remercier mes colocataires et amies, Alice et Maëlle, qui ont rendus ces six derniers mois inoubliables.

Listes des abréviations

AF : Agroforesterie

AR : Assessment Report (Rapport d'évaluation)

C : Carbone

CC : Changement Climatique

CO₂ : Dioxyde de Carbone

CMIP : Coupled Model Intercomparison Project

FM : Fresh Matter (masse fraîche)

GES : Gaz à Effet de Serre

GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat aussi appelé IPCC

Ha : Hectare

Kg : Kilogramme

LER : Land Equivalent Ratio

LUE : Light Use Efficiency

mm : millimètre

N : Azote

PPAM : Plantes à Parfum Aromatique et Médicinale

RCP : Representative Concentration Pathways (profils représentatifs d'évolution de concentration de GES)

SAF : Système agroforestier

SSP : Shares Socio-economic Pathways

t : tonne

Glossaire

Calibration : ajustement des valeurs de paramètres d'un modèle d'après des données de référence de manière à obtenir la meilleure correspondance possible entre le comportement du modèle et celui de l'objet d'étude.

Formalisme : se réfère aux formes et aux modes d'expressions choisis pour représenter un modèle.

Houppier : partie supérieure de l'arbre qui est formée par l'ensemble des branches et du feuillage.

Modèle mécaniste : représentation mathématique détaillée qui décrit les éléments d'un système, leurs interactions mutuelles et leur relation avec l'environnement.

Paramétrage : attribution de valeurs spécifiques aux paramètres d'entrée du modèle afin de l'adapter à une situation ou à des données particulières.

Phénologie des arbres : étude de l'influence climatique sur les différentes étapes du développement saisonnier de l'arbre (floraison, feuillaison ou débourrement, coloration des feuilles, fructification). Sert également d'outil de suivi pour évaluer l'adaptation des arbres aux changements climatiques.

Liste des figures

Figure 1 : Représentation graphique des scénarios SSP (Shared Socio-economic Pathways)...	1
Figure 2 – a : Principaux processus simulés dans la boucle journalière Hi-sAFe dans le cadre des modèles sAFe-Tree et STICS et la communication entre les deux modèles	5
Figure 2 – b : Schéma simplifié du fonctionnement de Hi-sAFe	6
Figure 3 : Représentation de la scène dans le modèle Hi-sAFe	6
Figure 4 : : Représentation de la réduction du houppier de l'arbre dans l'espace (hauteur, largeur sur l'inter rang et la lignée de l'arbre)	8
Figure 5 : Représentation des scènes simulées avec Hi-sAFe pour l'ensemble des modalités...	8
Figure 6 : Frise chronologique représentant les périodes climatiques.....	9
Figure 7 : Figure représentant graphiquement des variables climatiques (Températures moyennes maximales et minimales, précipitations saisonnière, diminution moyennes des précipitations en fonction des périodes climatiques et rayonnement global saisonnier).....	9
Figure 8 : Formules utilisées pour le calcul de LER annuel.....	10
Figure 9 : Formules pour le calcul de LER en fonction des périodes climatiques actuelle et future.....	10
Figure 10 : Représentation graphique en boxplot des rendements en olives en masse fraîche (kg/ha) en fonction des périodes climatiques et des systèmes avec en A les résultats pour la phase juvénile de l'olivier et en B les rendements pour la phase mature des oliviers.....	11
Figure 11 : Représentation graphique en barplot du stress thermique saisonnier de l'arbre en fonction des systèmes et des périodes climatiques. Une valeur de 1 indique une absence de stress. Le stress thermique à la chaleur est induit lorsque la température dépasse 35°C, la photosynthèse est alors bloquée. Les barres d'erreurs représentent l'écart-type.....	11
Figure 12 : Représentation graphique en barplot du stress hydrique saisonnier de l'arbre en fonction des systèmes et des périodes climatiques. Une valeur de 1 indique une absence de stress. Les barres d'erreurs représentent l'écart-type.....	12
Figure 13 : Représentation graphique en boxplot des rendements des cultures de la rotation (en t/ha) en fonction des périodes climatiques et des systèmes avec en A les résultats pour la phase juvénile de l'olivier et en B les rendements pour la phase mature.....	12
Figure 14 : Représentation graphique en nuage de points des valeurs de LER en fonction du temps.....	12
Figure 15 : Représentation graphique en barplot du cumul sur 75 ans de lixiviation de l'azote (en kg N ha ⁻¹) en fonction des systèmes et de la période.....	13
Figure 16 : : Représentation graphique en colonnes des entrées et des sorties d'azote (en Kg N ha ⁻¹) en fonction des systèmes et des périodes climatiques pour chaque phase.....	13
Figure 17 : Représentation graphique du bilan hydrique (en mm/an) en fonction des systèmes pour chaque période climatiques et chaque phase.....	14

Liste des tableaux

Tableau I : Tableau synthétisant les caractéristiques de chaque modalité.....	8
Tableau II : Durée des phases de développement (en années) des systèmes pour les périodes climatiques actuelle et futur.....	9

Liste des annexes :

Annexe 1 : Les changements régionaux de température (à gauche) et de précipitations (à droite) sont proportionnels au niveau de réchauffement climatique, quel que soit le scénario qui permet d'atteindre ce niveau de réchauffement.

Annexe 2 : Tendances prévues de la température annuelle maximale et minimale au cours de la période simulée. Moyenne de la température relatives journalières minimales et maximales.

Annexe 3 : Tendances prévues de la température annuelle moyenne (en °C) et cumul pluviométrique annuelle (en mm/an) au cours de la période simulée.

Annexe 4 : Tableau regroupant les résultats des tests statistiques de l'étude du rendement des oliviers en fonction du système pour une périodes climatiques données.

Annexe 5 : Tableau regroupant les résultats des tests post-hoc effectués pour les résultats significatifs du tableau III. Comparaison deux à deux des systèmes à l'aide des tests de Tukey et de Dunn.

Annexe 6 : Tableau regroupant les résultats des tests statistiques de l'étude du rendement de chaque culture en fonction du système pour une périodes climatiques données.

Annexe 7 : Tableau regroupant les résultats des tests post-hoc (TukeyHSD) pour les modalités ayant des différences significatives pour l'analyse des variances du rendement des cultures en fonction des systèmes

Annexe 8 : Représentation graphique en barplot de la lixiviation moyenne annuelle de l'azote (en kg N ha⁻¹) en fonction des systèmes et de la période climatique.

Annexe 9 : Représentation graphique de la lixiviation de l'azote (en kg N ha⁻¹) au cours du temps pour chaque système avec en gris la période climatique actuelle et en orange la période climatique futur.

Annexe 10 : Dynamique d'évolution du cycle de l'azote pour le témoin verger (TV) densité de plantation 7x7m, A pour la période climatique actuelle (1951-2025) et B pour la période climatique future (2025-2100)

Annexe 11 : Dynamique d'évolution du cycle de l'azote pour le SAF forte densité de plantation 7x7m, en A pour la période climatique actuelle (1951-2025) et en B pour la période climatique future (2025-2100).

Annexe 12 : Dynamique d'évolution du cycle de l'azote pour le SAF faible densité de plantation 9x9m, en A pour la période climatique actuelle (1951-2025) et en B pour la période climatique future (2025-2100)

Annexe 13 : Représentation graphique de chaque variable du bilan hydrique (en mm) au cours du temps et en fonction des systèmes.

Sommaire

Listes des abréviations	I
Glossaire	II
Liste des figures	III
Liste des tableaux	IV
Liste des annexes :	IV
I - Introduction	1
1 – Changement climatique	1
a) <i>Scénario régional</i>	1
b) <i>L'agriculture face au changement climatique</i>	2
2 – Les systèmes agroforestiers	2
3 – L'olivier (<i>Olea europaea L.</i>)	3
4 - Problématique	4
a) <i>Problématique générale</i>	4
b) <i>Hypothèses de recherches</i>	4
c) <i>Objectifs de l'étude</i>	4
II - Matériels & Méthodes	5
1 - Contexte de l'étude	5
2 - Choix du logiciel et caractéristiques principales du modèle	5
3 - Données d'entrée (sol, climat et pratiques)	6
a) <i>Description sol</i>	6
b) <i>Données météorologiques</i>	6
c) <i>Pratiques culturales</i>	8
4 - Description du système modélisé	8
a) <i>Expérimentations virtuelles</i>	9
b) <i>Phase de développement</i>	9
c) <i>Changement climatique simulé (RCP 4.5, GIEC)</i>	9
5 – Analyses de données	9
a) <i>Land Equivalent Ratio</i>	9
b) <i>Tests statistiques</i>	10
III – Résultats	10
1 – Performances agronomiques	10
a) <i>Rendements des oliviers</i>	11
b) <i>Rendements cultures</i>	12
c) <i>Land Equivalent Ratio (LER)</i>	12
2 - Performances environnementales	13

a) <i>Lixiviation de l'azote</i>	13
b) <i>Cycle de l'azote</i>	13
c) <i>Bilan hydrique</i>	14
1 - Impact des SAF et du changement climatique sur l'olivier	14
a) <i>Effets du réchauffement climatique sur la production des oliviers</i>	14
b) <i>Etude du stress thermique et hydrique de l'olivier</i>	15
c) <i>Généralisation avec d'autres études</i>	17
2 – Impact du changement climatique sur les cultures	17
3 – Les performances environnementales des SAF face au changement climatique	18
4 – Limites de l'études et du modèle	20
5 – Perspectives	21
V – Conclusion	22
Bibliographie	23
Annexes :	i

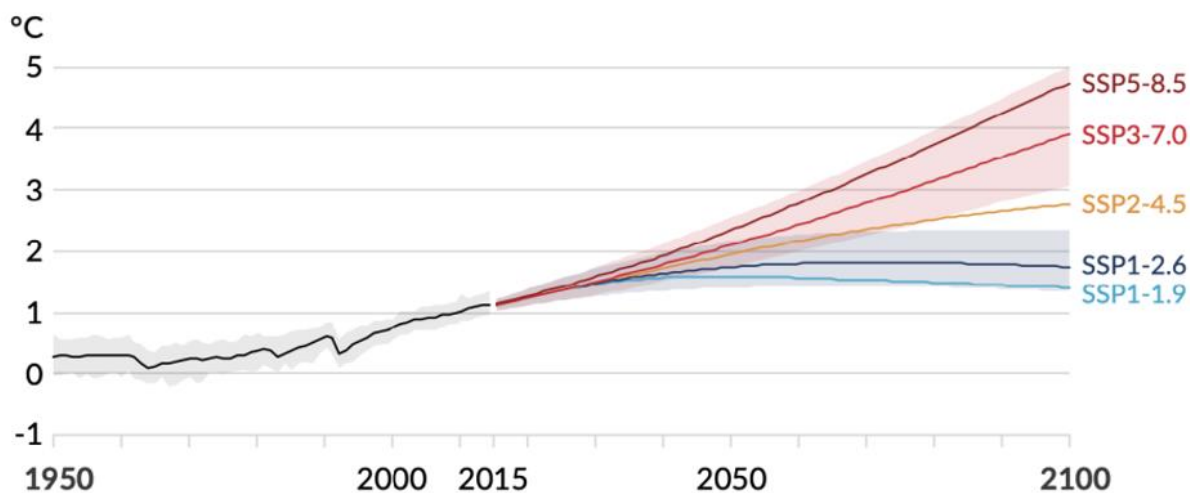


Figure 1 : Représentation graphique des scénarios SSP (Shared Socio-economic Pathways) sont des narratifs, traduits en ensembles d'hypothèses socio-économiques (Population, Éducation, Urbanisation, PIB). Ces narratifs décrivent des évolutions alternatives de la société future en l'absence de changement climatique ou de politique climatique. Cinq narratifs ont été construits par le GIEC (IPCC 2022) et sont représentés dans ce graphique (SSP5-8.5, SSP3-7.0, SSP2-4.5, SSP1-2.6, SSP1-1.9).

I - Introduction

1 – Changement climatique

Les effets du changement climatique (CC) se manifestent de manière visible dans toutes les régions du monde, et ont des conséquences sur de nombreux phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes. Il en résulte des effets négatifs généralisés sur la sécurité alimentaire et hydrique, la santé humaine, l'économie et la société, ainsi que des pertes et des dommages liés pour la nature et les populations. Le dernier rapport d'évaluation (AR6) du GIEC prévoit un franchissement du réchauffement climatique de 1,5 °C probablement entre 2030 et 2052 (IPCC, 2023). Le AR6 se base sur les cinq scénarios principaux connus sous le nom de voies de concentration représentatives (RCP, « *Representative Concentration Pathway* »). Les résultats de simulation du CMIP6 (*Coupled Model Intercomparison Project*) ont ensuite conduit à l'émergence de nouveaux scénarios appelés SSP (*Shared Socio-economic Pathways*), qui intègrent des dimensions socio-économiques telles que la population, l'éducation, l'urbanisation et le PIB (Produit Intérieur Brut), contrairement aux RCP. Les SSP comme les RCP sont étiquetés par le forçage radiatif approximatif atteint en 2100, passant de 2.6, 4.5, 7.0 à 8.5 W m⁻² (Figure 1) (AR6 IPCC, 2021).

Les scénarios climatiques permettent de probabiliser les risques physiques potentiels liés au CC. Ces risques physiques découlent des impacts causés par les phénomènes météorologiques et climatiques, dont la fréquence et l'intensité sont altérés par le CC. Ces phénomènes, dits aléas climatiques, peuvent être des événements extrêmes ou des évolutions progressives, et l'ampleur de leur évolution dépendra des émissions futures de gaz à effet de serre (GES) (Chapitre 4-AR6, 2021). Une projection climatique est une estimation de l'évolution future des conditions météorologiques moyennes ou extrêmes. Contrairement aux prévisions météorologiques, les projections climatiques n'ont pas pour objectif de prévoir les conditions météorologiques à une date donnée et pour un lieu donné, mais d'estimer les probabilités d'observer tel ou tel changement sur une période temporelle (généralement 20 ans), dans un scénario prospectif donné et pour une région donnée (Chapitre 4 AR6 GIEC, 2021).

a) Scénario régional

La région méditerranéenne se situe dans une zone de transition entre le climat aride de l'Afrique du Nord et le climat tempéré et pluvieux de l'Europe centrale. Elle est affectée par des interactions entre les latitudes moyennes et les processus tropicaux. En raison de ces caractéristiques, des modifications mêmes relativement mineures peuvent entraîner des changements substantiels dans le climat méditerranéen. Cela fait de la Méditerranée une région potentiellement vulnérable aux changements climatiques induits par l'augmentation des concentrations de GES dû aux activités humaines (Giorgi & Lionello, 2008).

Au XXI^{ème} siècle à mesure que la température mondiale moyenne augmentera dans la région méditerranéenne, les précipitations diminueront à un rythme d'environ -20 mm/°C ou -4%/°C et la température se réchauffera de 20% de plus que la moyenne mondiale. Le réchauffement sera particulièrement important en été (environ 50% supérieur au réchauffement climatique). La réduction des précipitations affectera toutes les saisons dans les régions du centre et du sud de la Méditerranée. Pour les zones situées le long de la frontière nord de la région méditerranéenne, la réduction sera la plus importante en été (-7 mm/°C ou -9%/°C pour l'ensemble de la région nord de la Méditerranée), alors qu'elles ne connaîtront pas de réduction significative des précipitations en hiver (Lionello & Scarascia, 2018). Des pénuries d'eau croissantes le long de la Méditerranée sont à prévoir. Les conséquences sur les écosystèmes

agricoles sont susceptibles de varier considérablement en fonction du système de culture et de la région. Dans le sud de l'Europe, les désavantages liés à l'augmentation de la pénurie d'eau et aux phénomènes météorologiques extrêmes (chaleur, sécheresse, tempêtes) domineront avec des rendements plus faibles et avec une plus grande variabilité. Parmi les options d'adaptation qui peuvent être explorées pour minimiser les impacts négatifs des CC et tirer parti des impacts positifs : les changements d'espèces cultivées, de cultivar, de date de semis, de fertilisation, d'irrigation, d'affectation des terres et le système d'exploitation semblent être les plus appropriés. Toutefois, en adoptant ces options, il est nécessaire de tenir compte du rôle multifonctionnel de l'agriculture et de trouver un équilibre entre les fonctions économiques et environnementales (Bindi & Olesen, 2011).

b) L'agriculture face au changement climatique

L'agriculture conventionnelle actuelle est considérée comme non durable et inadéquate pour relever les grands défis sociétaux tels que le réchauffement climatique, la pollution de l'environnement, la sécurité alimentaire, la dépendance aux énergies fossiles ainsi que le déclin des ressources naturelles et de la biodiversité. Ces problèmes sont largement attribuables à la spécialisation agricole et à la simplification conséquente de l'agroécosystème (Rosati et al., 2021).

La température de l'air est un des principaux facteurs influençant le rendement des cultures. Les températures quotidiennes minimales et maximales mondiales pendant les saisons de croissance ont augmenté en moyenne de 0,3 et 0,2 °C par décennie, respectivement, de 1980 à 2011. Les augmentations de température ont été liées aux pertes de rendement des cultures d'orge, de maïs, de blé, de sorgho, de soja et de riz, avec des projections suggérant des réductions de rendement allant jusqu'à 70% d'ici à la fin du siècle. L'augmentation de la température a également été suggérée comme étant la cause de la stagnation à long terme des rendements en Europe malgré les efforts continus pour améliorer les cultivars (Mistry et al., 2017; Reyes et al., 2021).

Aujourd'hui l'un des enjeux majeurs est de concevoir des systèmes agricoles diversifiés et adaptés au climat futur. Parmi les stratégies d'adaptation pour faire face aux impacts négatifs du CC, l'agroforesterie est évoquée par le GIEC comme une des options de réponse à l'adaptation et à l'atténuation du réchauffement climatique (IPCC, 2021). L'efficacité de l'adaptation pour réduire les risques climatiques est documentée pour des contextes, des secteurs et des régions spécifiques et diminuera avec l'augmentation du réchauffement. Par ailleurs, les mesures d'adaptation courantes dans le domaine de l'agriculture - adoption de cultivars et de pratiques agronomiques améliorées, modification des schémas et des systèmes de culture - perdront de leur efficacité si le réchauffement atteint 2°C ou plus. Tandis que, les options d'adaptation liées à l'agroforesterie et à la sylviculture présentent une forte baisse d'efficacité à partir de 3°C (IPCC, 2023).

2 – Les systèmes agroforestiers

Les systèmes agroforestiers (SAF) sont définis comme un ensemble de pratiques agricoles associant des arbres à des cultures et/ou du bétail. Ces systèmes peuvent maximiser la production par unité de surface, en augmentant le rendement total du système (arbres et produits végétaux) jusqu'à 30 % par rapport à la rotation des parcelles agricoles d'un côté et au reboisement d'une parcelle agricole de l'autre (Dupraz & Liagre, 2011; Sinclair, 1999). Dans ces systèmes, les arbres sont principalement d'origine forestière, comme les noyers et les peupliers. Les arbres fruitiers sont actuellement considérés comme une forte valeur ajoutée à

l'agroforesterie et dans ces systèmes, la culture principale est souvent l'arbre fruitier à la place des arbres forestiers. En effet, 11 % de la superficie totale de l'agroforesterie européenne est composée d'arbres fruitiers, en particulier d'oliviers et de pommiers (Lauri et al., 2019).

Dans l'ensemble, l'agroforesterie a un effet positif sur l'écosystème, comme l'augmentation de la fertilité et de la biodiversité des sols et la réduction de l'érosion des sols (Fagerholm et al., 2016). Les SAF stockent en moyenne plus de carbone (C) dans la biomasse aérienne, souterraine et dans le sol que les prairies ou les sols en culture (Drexler et al., 2021). Par ailleurs, les études scientifiques démontrent un gain de rendement sur une parcelle agroforestière (Sollen-Norrlin et al., 2020). L'étude menée par Temani et al. (2021) met en évidence que le Land Equivalent Ratio (LER) pour les SAF oliviers/blé dur reste constamment supérieur à 1, même si des variations interannuelles sont observées (Temani et al., 2021).

Dans ce contexte, la mise en place de SAF est un moyen efficace de sécuriser un rendement pour l'agriculteur tout en préservant la majeure partie de la superficie pour la production agricole et en assurant de nombreuses fonctions agroécologiques. Les SAF peuvent améliorer la productivité agronomique et fournir plusieurs autres services écosystémiques, la séquestration du C, la régulation du cycle des nutriments, la biodiversité des sols, la rétention d'eau, la pollinisation et le contrôle de l'érosion des sols (Fagerholm et al., 2016; Sollen-Norrlin et al., 2020). De plus, la culture en couloir est une forme d'agroforesterie qui représente une alternative prometteuse pour l'utilisation des terres dans les régions tempérées.

3 – L'olivier (*Olea europaea L.*)

L'olivier (*Olea europaea L.*), arbre à feuilles persistantes, est une culture emblématique du pourtour méditerranéen dont le climat est caractérisé par des hivers doux et humides et des étés chauds et secs. Depuis l'Antiquité, l'olivier est cultivé pour son huile et ses fruits. Les systèmes semi-intensif (jusqu'à 400 arbres ha⁻¹) et intensif (jusqu'à 2500 arbres ha⁻¹) entraînent des répercussions sur l'environnement, notamment l'érosion des sols et la perte de biodiversité (Loumou & Giourga, 2003; Solomou & Sfougaris, 2015; Vanwallegem et al., 2011). L'intensification des pratiques agricoles est à l'origine de la disparition progressive des cultures intercalaires depuis un siècle. Les systèmes diversifiés, tels que les SAF, peuvent constituer l'une des solutions à la dégradation de l'environnement et à la perte de diversité (IPCC, 2022). Différents SAF à base d'oliviers peuvent être observés, tels que la complantation avec des vignes, d'autres espèces fruitières, ainsi que la culture d'inter-rangs où des associations sont formées entre des cultures annuelles ou vivaces (par exemple, des oliviers avec des légumes maraîchers ou des plantes à parfum aromatiques et médicinales (PPAM)) dans les espaces entre les rangées d'oliviers (Delange, 2022). La pratique de culture en rang alterné avec du blé est l'un des SAF à base d'oliviers les plus couramment pratiqués et étudiés, et elle a démontré une amélioration du rendement des oliviers pour l'année suivante (Eichhorn et al., 2006). L'oliveraie crée un microclimat propice aux cultures intercalaires (Dupraz & Liagre, 2011).

Des systèmes associant des oliviers cultivés en rangs ou en arbres dispersés avec des céréales, des légumes et des cultures fourragères, ou des systèmes associant l'olivier avec la vigne sont par exemple toujours visible en Espagne (46 600 hectares (ha)), en Grèce (124 311 ha) (Eichhorn et al., 2006; Papanastasis et al., 2008) et en Italie (près de 100 000 ha) (Dupraz & Liagre, 2011; Lauri et al., 2019). En France, plus que quelques dizaines d'ha d'oliveraies en association avec des céréales étaient cultivées en 2011 (Dupraz & Liagre, 2011). En outre, les cultures intercalaires permettent au producteur de patienter avant l'entrée en production de l'oliveraie (3 à 7 ans) (Dupraz & Liagre, 2011). Les oliveraies atteignent un rendement optimal

entre 30 à 40 ans (Gratsea et al., 2022). Comme pour les autres arbres fruitiers, les oliviers sont soumis à des phénomènes d'irrégularité de production marqués, avec une alternance de rendements de 15 à 50 kg/arbre. Dans les oliveraies non irriguées, le rendement peut varier entre 7-8 t ha⁻¹ (Kour et al., 2018).

Les conditions climatiques optimales pour la culture de l'olivier sont des longs étés, chauds et secs et des hivers pluvieux. Mais les oliviers ne tolèrent pas la sécheresse excessive ni les excès d'eau qui peuvent entraîner des risques d'anoxie racinaire. La plante peut tolérer quelques gelées, mais des températures extrêmement basses et soutenues peuvent la détruire. L'Europe méridionale ayant été identifiée par le GIEC comme une zone sensible au CC, la production d'olives pourrait être soumise à des conditions climatiques défavorables et les agriculteurs seront contraints de s'adapter au réchauffement climatique. Les faibles précipitations attendues, associées à des températures plus élevées, devraient entraîner un mûrissement plus précoce des fruits et nuire à la qualité de l'huile d'olive (Gratsea et al., 2022). En effet, l'augmentation de la température de l'air associée au CC devrait affecter la fructification de l'olivier. Une augmentation de la température de 4°C au-dessus de la température ambiante réelle peut entraîner une avance de la date de floraison de l'olivier, une extension de la période de floraison, une augmentation de l'avortement du pistil, et une réduction de la nouaison, conditions qui peuvent réduire le rendement (Benlloch-González et al., 2018). La production oléicole pourrait être mise en péril dans la région alors que la demande est en pleine croissance.

4 - Problématique

a) Problématique générale

L'objectif du stage est d'identifier l'impact du CC sur les systèmes oléicoles traditionnels et les SAF à base d'oliviers. Ainsi, les performances agronomiques et environnementales des systèmes seront étudiées. La problématique est donc : « Les systèmes agroforestiers à base d'oliviers sont-ils performants d'un point de vue agronomique et environnemental en contexte de changement climatique ? »

Pour répondre à cette question, des simulations de SAF avec les projections climatiques du scénario RCP 4.5 ont été réalisées à l'aide du modèle agroforestier Hi-sAFe (Dupraz et al., 2019) pour une localisation proche de Montpellier.

b) Hypothèses de recherches

Les hypothèses émises sont que le CC a un effet sur les performances agronomiques (en imposant une baisse des rendements), et environnementales (diminution du ruissellement, diminution de la lixiviation de l'azote (N) et diminution de la température des cultures et de l'évaporation grâce à l'effet de l'ombrage des oliviers) des systèmes oléicoles. De plus, il est supposé que cet impact peut être atténué par la mise en place de SAF. Les études de modélisation menées par (Reyes et al., 2021), ont démontré une augmentation des rendements de blé dur dans des conditions climatiques futures, et l'agroforesterie, notamment le système associant le noyer hybride et le blé dur, pourrait contribuer à stabiliser ces rendements. Par conséquent, il serait logique d'observer des résultats allant dans la même direction.

c) Objectifs de l'étude

Deux contextes seront étudiés : un contexte de système en monoculture et un contexte en association culturale, SAF avec alignement d'arbres monospécifiques (oliviers). L'étude se déroule sur une période climatique de 150 ans qui s'étend de 1951 à 2100 et qui utilise les projections climatiques du scénario RCP 4.5 afin de pouvoir suivre la dynamique de production des systèmes en fonction du CC à l'échelle locale. Le RCP 4.5 est le scénario médian dont la

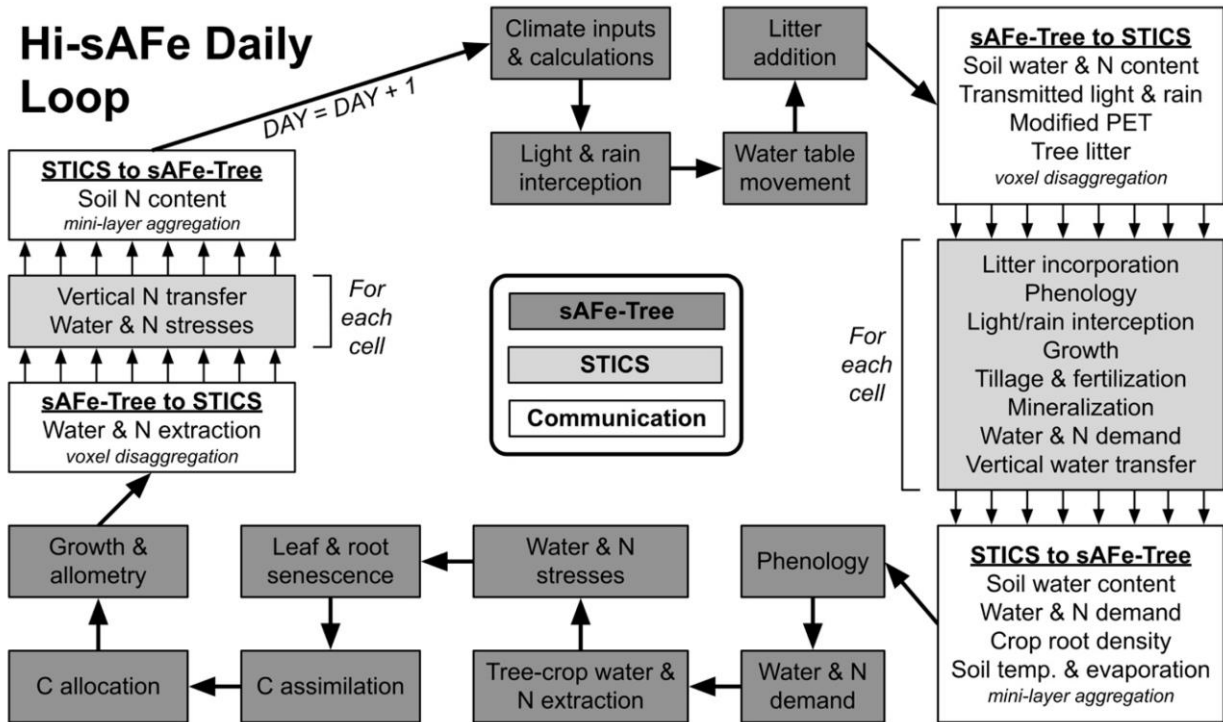


Figure 2 – a : Principaux processus simulés dans la boucle journalière Hi-sAFe dans le cadre des modèles sAFe-Tree et STICS et la communication entre les deux modèles. PET : évapotranspiration potentielle (Dupraz et al. 2019).

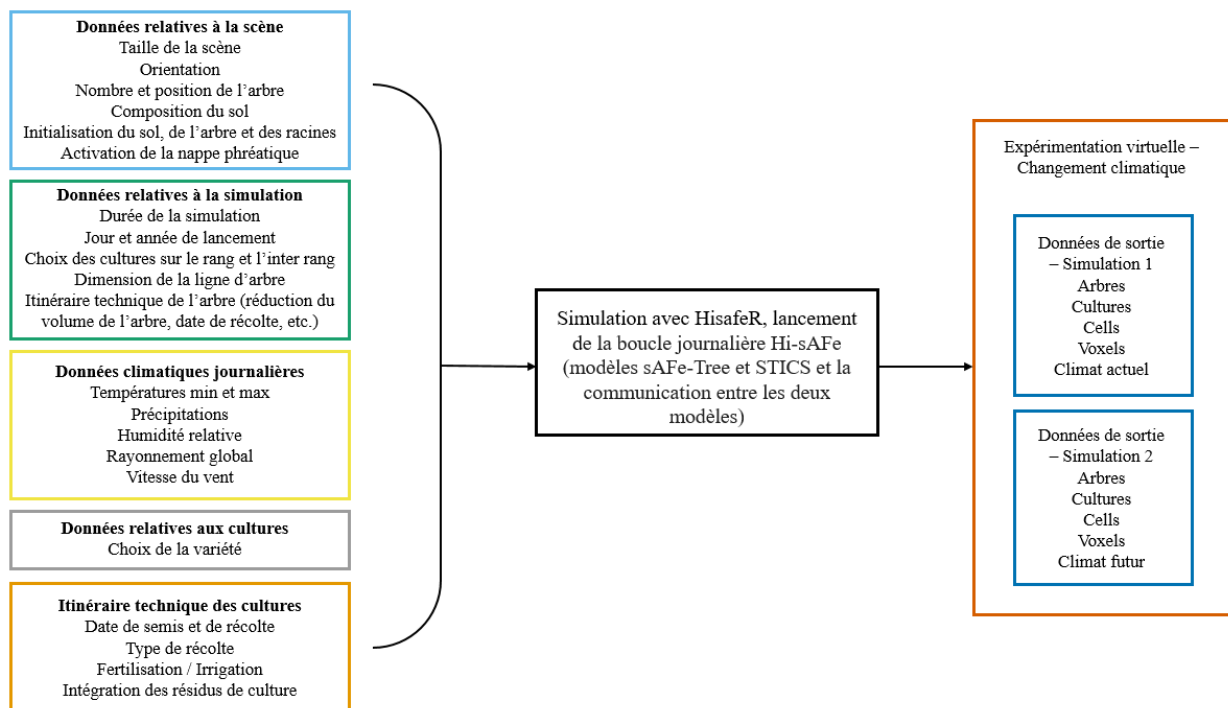


Figure 2 – b : Schéma simplifié du fonctionnement de Hi-sAFe, avec les données d'entrées nécessaires à renseigner pour lancer une simulation et les données de sorties compilées dans des fichiers ou dans un même dossier lors d'expérimentation virtuelle.

trajectoire d'émission induit un forçage radiatif de 4.5W/m^2 en 2100, soit un niveau de réchauffement d'environ $2,7^\circ\text{C}$ par rapport à la période préindustrielle. L'accent est mis sur les changements à venir (2025-2100) mais aussi sur le passé / période actuelle (1951-2025). La principale raison de cette approche réside dans le fait que les tendances antérieures fournissent une base raisonnable pour anticiper ce que l'on peut attendre au cours des prochaines décennies. Par exemple, les taux de réchauffement dans la plupart des modèles climatiques sont à peu près linéaires pour la période de 1980 à 2050, tant à l'échelle mondiale que régionale (Lobell & Gourdj, 2012).

Les résultats présentés dans ce rapport porteront sur l'évaluation des performances agronomiques (rendements des cultures et LER) ainsi que sur des indicateurs de performances environnementales tels que le cycle de l'N et sa lixiviation.

II - Matériels & Méthodes

1 - Contexte de l'étude

Le modèle Hi-sAFe (Dupraz et al., 2019) a été utilisé pour simuler l'effet de scénarios climatiques théoriques en adoptant, comme étude de cas, les projections climatiques du RCP 4.5 (IPCC, 2022). Le climat simulé est représenté par deux périodes climatiques, actuelle et future. Les données climatiques proviennent d'une parcelle située dans le sud de la France (Restinclières), où des parcelles agroforestières, forestières et agricoles ont été établies en 1995 et suivies depuis par l'INRAE (INRAE UMR SYSTEM 2015). Cette parcelle a déjà été utilisée pour des travaux de calibration du modèle et de modélisation de systèmes avec Hi-sAFe (Noyers-Blé dur) (Reyes et al., 2021). Les données de sol proviennent d'une parcelle se trouvant à 15 km du domaine de Restinclières. En effet, la profondeur de sol de cette parcelle est plus en accord avec la modélisation d'oliviers en condition de CC. Le sol de la parcelle est moins profond que celui de Restinclières, mais il est tout de même suffisamment profond pour permettre d'explorer la piste de diversification du système.

2 - Choix du logiciel et caractéristiques principales du modèle

Le modèle Hi-sAFe (version 4.2.1955) est un modèle biophysique mécaniste conçu pour explorer les interactions au sein des SAF associant des arbres avec des cultures. Il s'agit d'un outil d'exploration destiné à prédire les propriétés biophysiques des SAF dans les zones tempérées (Reyes et al., 2021). Cet outil permet de représenter le développement des arbres et des cultures en fonction des compétitions pour l'eau, l'N et la lumière. Les mécanismes pris en compte dans Hi-sAFe sont : la phénologie des arbres, l'interception de la lumière par l'arbre, la croissance aérienne et racinaire des arbres, la répartition de l'eau et de l'N entre les arbres et les cultures et les processus liés aux cultures et au sol en utilisant le modèle STICS (Simulateur mulTIdisciplinaire pour les Cultures Standard) (Figure 2 - a) (Brisson et al., 2009; Dupraz et al., 2019). Le modèle permet d'explorer le comportement des SAF dans diverses conditions de sol, de climat et de latitude, et d'explorer l'impact de différentes conceptions de systèmes (espèces d'arbres et de cultures, densité d'arbres, alignement cardinal des rangées d'arbres, espacement des arbres ou densité de plantation, etc.) et d'options de gestion (par exemple, élagage des arbres, élagage des racines des arbres, pratiques de gestion des cultures). La dynamique des interactions arbres-cultures est calculée à un pas de temps journalier, et éventuellement pour de longues durées (Figure 2 - b) (Reyes et al., 2021).

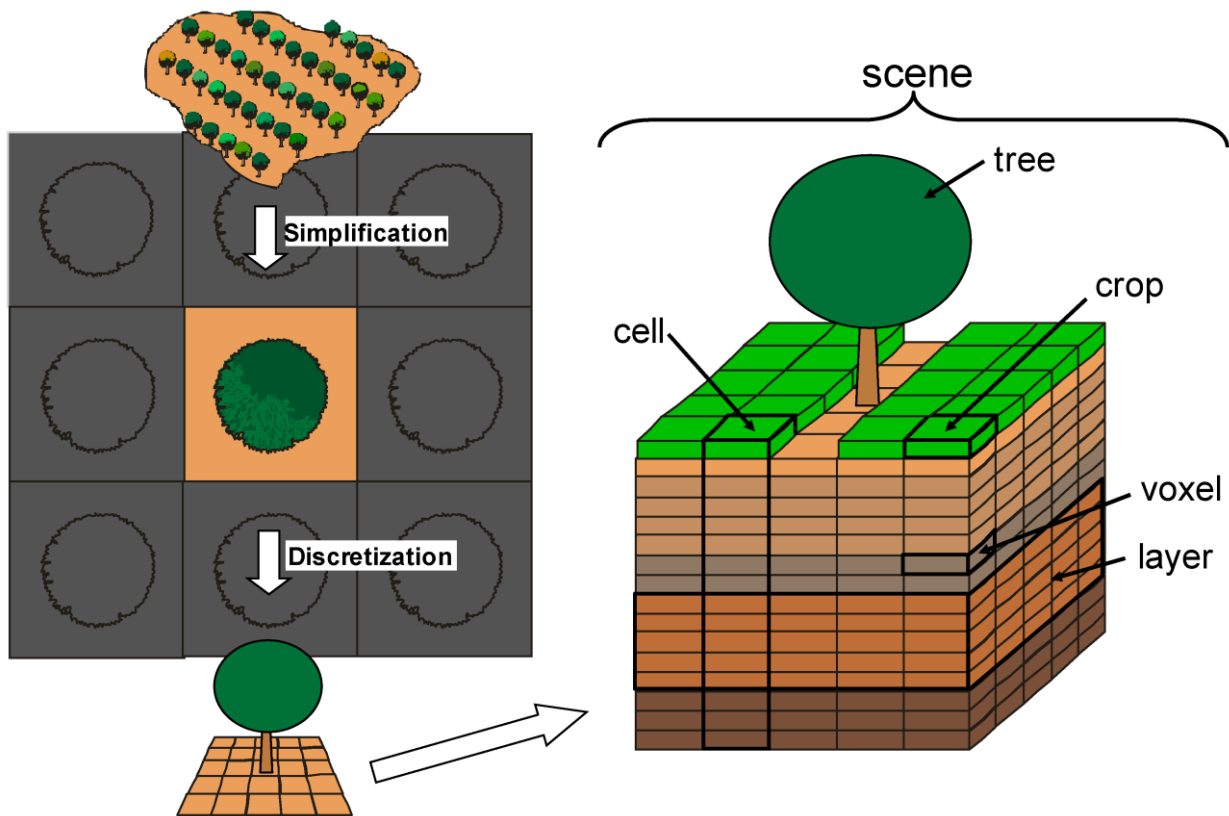


Figure 3 : Représentation de la scène dans le modèle Hi-sAFé. La scène simulée est une simplification d'un paysage en une unité répliquable simple et est discrétisée en une grille de voxels 3D, spatialement explicite. Les conditions aux limites périodiques (PBC) permettent de répéter la scène à l'infini dans toutes les directions (Dupraz et al. 2019).

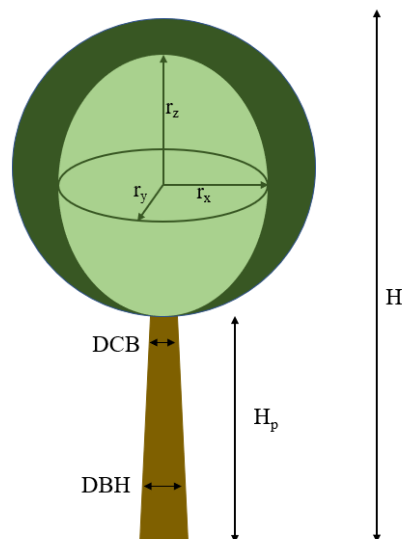


Figure 4 : Représentation de la réduction du houppier de l'arbre dans l'espace (hauteur, largeur sur l'inter rang et la lignée de l'arbre). Les interventions de réduction du houppier sont effectuées dans trois dimensions, en hauteur (diminution de r_z), en largeur l'inter-rang (diminution de r_x) et en largeur sur le rang de l'arbre (diminution de r_y).

Hi-sAFe permet de simuler des scènes rectangulaires qui sont répliquées dans toutes les directions via des PBC (Periodic Boundary Conditions – Conditions périodiques aux limites). Afin de ne pas générer des effets de bordures artificielles pour les peuplements hétérogènes, le modèle comprend des algorithmes de symétrie torique (la scène est entourée virtuellement par des scènes identiques). La scène est divisée en une grille de cellules carrées (Figure 3), chacune produisant une culture homogène. La position de l'arbre définit deux zones, la zone cultivée (généralement une « allée » si la scène est reproduite) et la zone non cultivée près des arbres (ligne des arbres), chacune des zones peuvent produire une ou plusieurs espèces végétales ou bien être un sol nu. Les voxels sont des cellules divisées verticalement et permettent de capturer la structure souterraine du sol avec des propriétés du sol (densité racinaire et teneur en eau et N) homogènes au sein du voxel. Jusqu'à 5 « couches » (layers) de propriétés physiques du sol peuvent être appliquées et chaque couche est homogène.

Le cycle de l'eau dans Hi-sAFe comprend des entrées dans la scène via la pluie, la neige, l'irrigation et une nappe phréatique dynamique. Dans notre étude, la nappe phréatique a été désactivée. Les exportations d'eau de la scène comprennent le ruissellement de la surface du sol, l'évaporation du sol, le drainage naturel et artificiel et la transpiration des cultures et des arbres. Le cycle de l'N comprend les apports à la scène via la fertilisation, l'irrigation, le dépôt, la fixation par les cultures et la nappe phréatique. Les exportations d'N de la scène comprennent les récoltes de cultures et d'arbres, le lessivage par drainage naturel et artificiel, la nitrification, la dénitrification et la volatilisation des engrais. La gestion de l'humus, des résidus de culture (minéralisation, humification, etc.) et le devenir des engrais azotés sont simulés par Hi-sAFe à travers les formalismes de STICS (Dupraz et al., 2019).

Le modèle est basé sur deux hypothèses qui sont : i) la dépendance de la productivité du système agroforestier dépend de l'acquisition de ressources hétérogènes par l'arbre et les cultures dans l'environnement, ii) l'interaction arbres/cultures est régie par la plasticité aérienne, souterraine et phénologique des plantes (Barbault et al., 2023).

3 - Données d'entrée (sol, climat et pratiques)

a) Description sol

Les propriétés du sol pour chaque couche comprennent le sable, le limon, l'argile, le calcaire, la matière organique et la teneur en pierre (Dupraz et al., 2019). Les paramètres d'entrée du sol sont initialisés sur des données provenant d'une analyse de sol du domaine de Mauguio. La parcelle est une parcelle expérimentale sur laquelle est installé un SAF à base d'oliviers avec du blé dur sur l'inter rang. La profondeur du sol est de 2,4 m, le type de sol est limon argilo-sableux et contient peu de cailloux. La teneur initiale en N organique du sol dans la couche de sol allant de la surface jusqu'à la zone d'humification du sol (profondeur du sol avec une activité biologique active) qui mesure 0,2 m de profondeur est de 0,08 proportion de sol fin. Quatre couches de propriétés physiques différentes ont été identifiées pour ce sol.

b) Données météorologiques

Les projections climatiques ont été obtenues à partir du site web de Clipick, une interface qui fournit des données climatiques quotidiennes à partir d'un emplacement défini. Les données météorologiques extraites contenaient des variables nécessaires pour exécuter des simulations avec le modèle Hi-sAFe : température minimale et maximale, précipitations, somme du rayonnement global, humidité relative minimale et maximale et vitesse moyenne du vent. La période climatique s'étend de 1951 à 2100, ce qui constitue une base pour utiliser les données pour des évaluations de l'impact des changements climatiques (Palma, 2017). Clipick regroupe

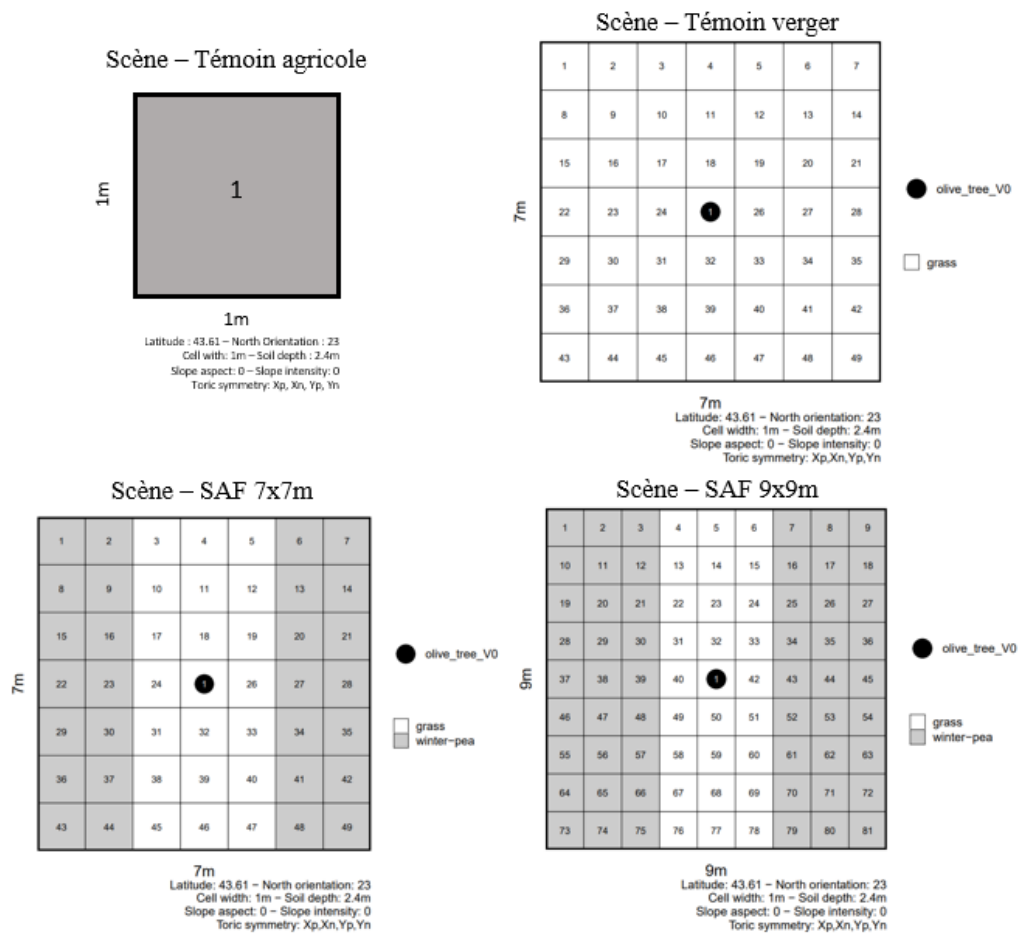


Figure 5 : Représentation des scènes simulées avec Hi-sAFe pour l'ensemble des modalités. Le point noir au centre représente la position de l'olivier sur la scène. La zone en gris représente la position des cultures de la rotation sur la scène et la zone blanche indique les cellules avec de l'herbe, les bandes blanches pour les SAF représentent donc la ligne d'arbre lorsque la scène est répliquée.

Tableau I : Caractéristiques de la scène pour modalité

Modalités	Taille de la scène (en m)	Présence d'un arbre	Culture(s) principale(s)	Culture sur la rangée d'arbre	Distance perpendiculaire à l'arbre (en m)
Témoin agricole (TA)	1x1	non	Pois d'hiver/ Blé dur/ Orge d'hiver (rotation triennale)	Herbe	0
Témoin verger (TV)	7x7	oui	Herbe	Herbe	0
Agroforesterie forte densité de plantation (AF)	7x7	oui	Pois d'hiver/ Blé dur/ Orge d'hiver (rotation triennale)	Herbe	1
Agroforesterie faible densité de plantation (af)	9x9	oui	Pois d'hiver/ Blé dur/ Orge d'hiver (rotation triennale)	Herbe	1

des projections climatiques produites par des modèles climatiques globaux proposés par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), et réduites par un modèle climatique régional (Reyes et al., 2021). Les données climatiques extraites pour l'étude proviennent de projection climatique basé sur le RCP 4.5 pour la localisation se trouvant au domaine de Restinclières proche de Montpellier (43,70412° N, 3,86152° E). Actuellement, seules les données provenant du AR5 sont accessibles sur le site Clipick, ce qui signifie que les scénarios SSP ne sont pas encore disponibles.

Les fichiers climatiques regroupent les variables d'entrées suivantes : température maximale et minimale, humidité relative maximale et minimale, rayonnement global, précipitations, vitesse du vent, la profondeur de nappe phréatique ainsi que la quantité de CO₂. L'ensemble des données sont des données au pas de temps journalier.

Le RCP 4.5 est un scénario de statu quo (avec des émissions de GES résultant de la croissance continue de la population, de la faible convergence entre les pays à revenu élevé et faible, des améliorations modestes de l'intensité énergétique et des technologies à faible émission de carbone) conduisant à un forçage radiatif de 4,5 W/m² d'ici à la fin du siècle (RCP 4.5, AR5). Afin de représenter le CC, les scénarios *Hist* et RCP 4.5 (années 2006-2100) sont utilisés. Pour maintenir la cohérence entre les données utilisées dans les scénarios et donc de leurs impacts sur les cultures, les données *Hist* (données évaluées par rapport à des données observées) ont été utilisées plutôt que des données empiriques pour couvrir la période jusqu'à 2005. Les deux séries de données obtenues ont été fusionnées puis divisées en périodes climatiques *Actuelle* (1951-2025) et *Future* (2025-2100).

Les données climatiques issues de Clipick ont été adaptées aux variables climatiques d'entrées du modèle Hi-sAFé. Ainsi, les humidités relatives maximales et minimales sont calculées à partir de l'humidité relative moyenne. A cela a été rajouté une correction des précipitations avec une diminution de 30% sur l'ensemble de la période climatique (150 ans). Le fichier climat est ensuite divisé en deux périodes de 75 ans chacune, le *climat actuel* (1951 – 2025) et le *climat futur* (2025-2100). La diminution des précipitations permet d'améliorer la justesse du climat simulé, car les précipitations devraient diminuer aux latitudes tropicales et tempérées. Les précipitations estivales et printanières devraient être réduites jusqu'à 30% d'ici à la fin du XXI^{ème} siècle dans les pays du sud de l'Europe et encore plus dans les pays d'Afrique du Nord, avec une augmentation significative simultanée de l'intensité des précipitations en automne et en hiver (Reyes et al., 2021; Vautard et al., 2014). Les données météorologiques brutes pour les précipitations ne montraient pas de différences significatives entre les deux périodes. Après modification, les précipitations pour le climat futur sont diminuées tout en conservant la variabilité saisonnière et interannuelle.

De plus, les données extraites de Clipick proviennent d'un nouvel ensemble de CC régional à haute résolution qui a été créé pour l'Europe (EURO-CORDEX). Pour les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 la résolution horizontale pour l'échelle régionale est de 12,5 km. Les tendances à grande échelle des changements des températures moyennes et des précipitations sont similaires dans les 3 scénarios, mais elles diffèrent dans les détails régionaux, ce qui peut être en partie lié à la résolution plus élevée (Jacob et al., 2014). A cette échelle, la différence entre les scénarios RCP 8.5 et RCP 4.5 repose principalement sur les indices basés sur la température qui va être plus élevée pour le RCP 8.5 que pour le RCP 4.5. En revanche, pour les indices basés sur les précipitations, les différences entre les deux scénarios sont moins prononcées (Jacob et al., 2014).

Les simulations effectuées à l'aide de modèles climatiques régionaux présentent des intensités de précipitation quotidiennes plus élevées, absentes dans les simulations des modèles

Tableau II : Durée des phases de développement (en années) des systèmes pour les périodes climatiques actuelle et futur.

	Périodes climatiques	Climat actuel (1951 – 2025)		Climat futur (2025- 2100)	
		juvénile	mature	juvénile	mature
Age du système en année	TA	23	52	23	52
	TV	18	57	19	56
	AF 7x7m	21	54	28	47
	af 9x9m	25	50	22	53

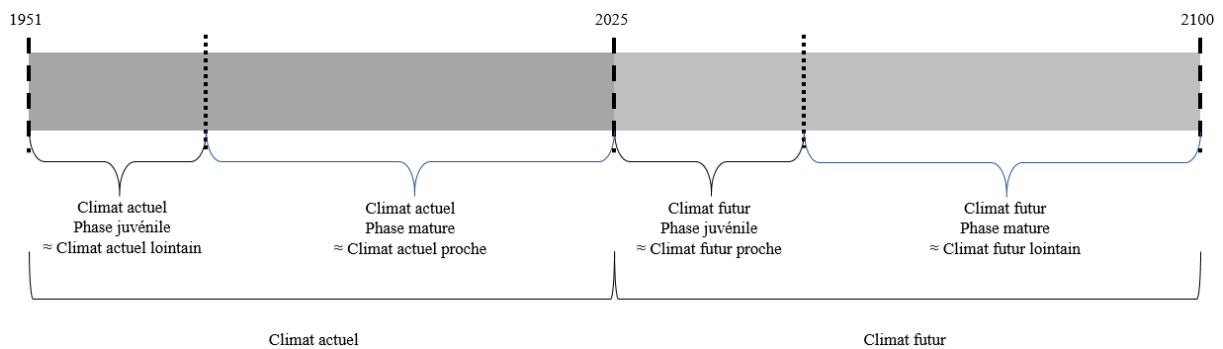


Figure 6 : Frise chronologique des périodes climatiques. Le scénario RCP 4.5 divisé en deux périodes climatiques : actuelle (1951-2025) et futur (2025-2100). Chaque période climatique est à nouveau divisé en deux par l'ajout de la variable phase de développement du système. Afin de distinguer les phases qui ne possèdent pas les mêmes données climatiques, elles ont donc été renommée en fonction de leur distance (proche ou lointaine) à l'année 2025.

climatiques mondiaux. De plus, ces simulations régionales montrent des CC significatifs dans les intensités de précipitations quotidiennes, ce qui se traduit par une transition plus fluide des intensités faibles aux intensités modérées et élevées. (Reyes et al., 2021).

c) Pratiques culturales

Les cultures sélectionnées pour l'étude sont des cultures d'hiver intégrées dans une rotation qui suit le schéma suivant : pois d'hiver, blé dur et orge d'hiver. Le pois d'hiver est semé tous les trois ans, le même jour de l'année (Day Of Year, DOY 344) et à la même densité (72 plants/m²), après la récolte du pois la plante entière est incorporée au sol lors du labour. Le blé dur est semé tous les trois ans, le même jour de l'année (DOY 297) et à la même densité (311 plants/m²) et l'orge d'hiver est semée tous les trois ans, le même jour de l'année (DOY 300) et à la même densité (268 plants/m²). Le sol est labouré à 22 cm de profondeur chaque année. Entre chaque culture est implanté un enherbement spontané qui est fauché puis restitué lors du labour précédent le semis de la culture suivante. Pour chaque culture, une récolte à lieu (DOY 200) en été. L'ensemble des systèmes n'est ni fertilisé (aucun apport de fertilisation autre que le pois d'hiver) ni irrigué. Sur la ligne des arbres et pour le témoin verger, un enherbement permanent (culture pérenne) est présent. L'enherbement ne résiste pas à la sécheresse et se dessèche dès le mois de juillet.

L'olivier est planté le jour du lancement de la simulation, l'arbre fait une hauteur de 30 cm et a 3 ans. Des interventions de réduction du houppier (en hauteur et en largeur sur le rang et l'inter rang) ont lieu au cours des simulations (Figure 4). La première intervention est programmée lors de la 10^{ème} année après le début de la simulation si l'arbre a atteint une valeur seuil qui déclenche l'intervention. Une fois effectué, cette intervention est répétée tous les ans, si le seuil est dépassé (DOY 15).

4 - Description du système modélisé

Afin d'évaluer les SAF à base d'oliviers, plusieurs modalités ont été testées et comparées entre elles. Notre étude regroupe 4 systèmes différents, dont deux témoins (Tableau I).

- Monoculture : rotation sur 3 ans (pois d'hiver, blé dur et orge d'hiver)
- Verger : Olivier et enherbement
- Agroforesterie : oliviers avec enherbement sur la ligne des arbres et rotation triennale sur l'inter rang.
 - Forte densité de plantation (même densité d'arbre que le témoin verger)
 - Faible densité de plantation

Le témoin agricole (TA) est représenté par une scène de 1x1m comportant la rotation triennale (pois d'hiver, blé dur et orge d'hiver). La modalité témoin verger (TV) est une culture pure d'olivier (oliveraie) avec un enherbement. Le TV est représenté dans Hi-sAFe par une scène de dimension de 7x7 m (204 arbres ha⁻¹) avec l'olivier au centre. Les modalités agroforesterie divergent par la densité de plantation des oliviers et donc la taille de la scène. Pour le SAF forte densité de plantation (AF), la scène mesure 7x7m (204 arbres ha⁻¹) avec une bande enherbée de 3 mètres de large sur la ligne des arbres et un inter rang de 4m de large pour la rotation. La scène pour le SAF faible densité de plantation (af) fait 9x9m (123 arbres ha⁻¹). La largeur de la ligne des arbres qui est enherbée reste identique, mais l'inter rang est plus grand (6 m de large) (Figure 5).

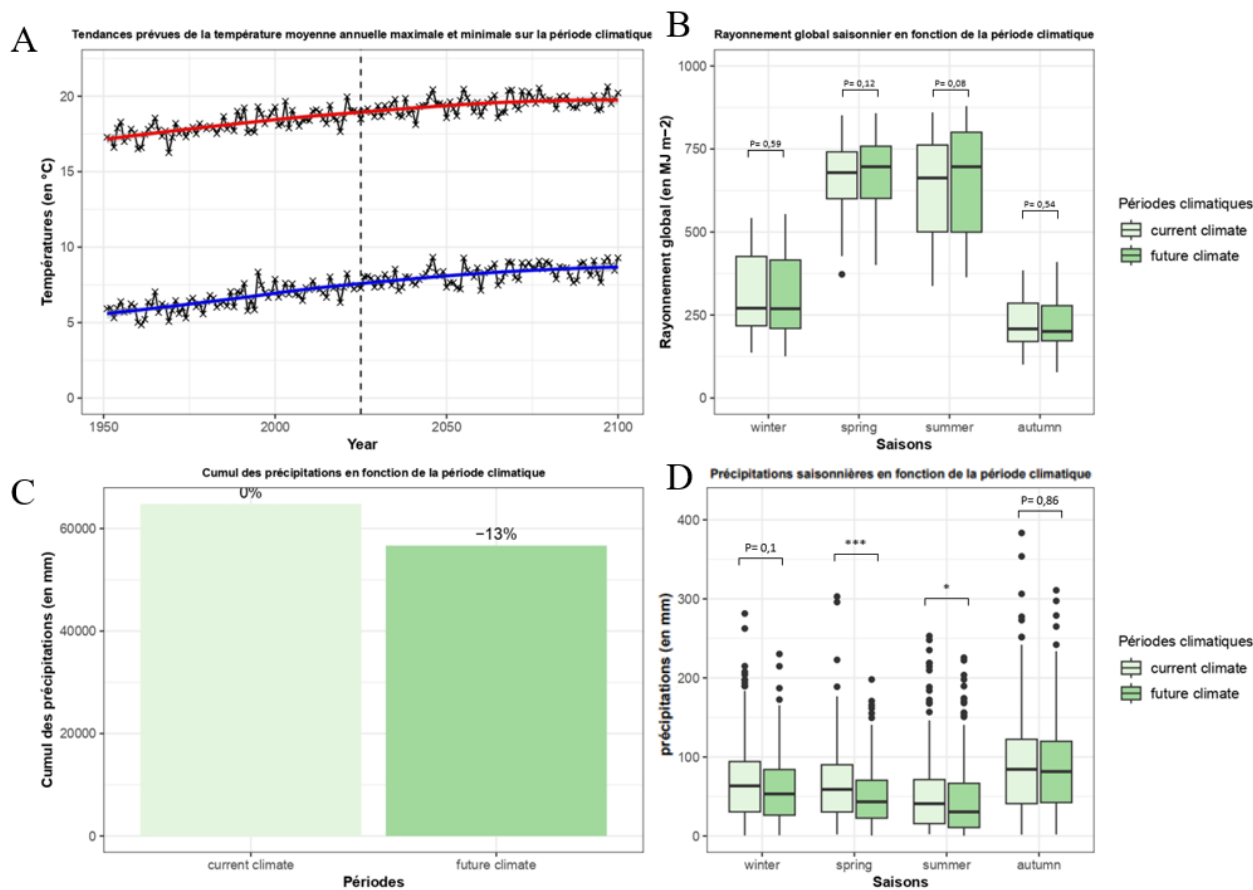


Figure 7 : Figure représentant graphiquement des variables climatiques.

A - Tendances prévues de la température annuelle, maximale et minimale au cours de la période simulée. Moyenne de la température relatives journalières minimales et maximales. La ligne en pointillée verticale sépare le temps en périodes correspondant aux périodes climatiques simulées. Les discontinuités entre les périodes sont dues au fait que les moyennes mobiles sont appliquées à des séries individuelles de 75 ans. Les lignes verticales de la régression linéaire représentent l'intervalle de confiance de 95 %.

B – Représentation graphique en boxplot du rayonnement global saisonnier (en MJ m⁻²) en fonction des périodes climatiques. Les saisons sont des regroupements de 3 mois, par exemple l'hiver est la compilation des mois de janvier, février et mars. Tests statistiques non paramétrique de Kruskal ne mettent en évidence aucune différences significative du rayonnement saisonnier en fonction de la période climatique (p-value > 0.05).

C – Représentation graphique en barplot du cumul des précipitations (en mm) en fonction de la période climatique.

D – Représentation graphique en boxplot des précipitations saisonnières (en mm) en fonction de la période climatique. Tests statistiques non paramétrique de Kruskal, le seuil de significativité est fixé à 0,05 soit * <0,05.

a) Expérimentations virtuelles

L'utilisation du package HisafeR (ver 1.5.3) permet de construire, faire tourner et analyser des simulations Hi-sAFe directement depuis R (ver 4.2.1). Lorsque plusieurs simulations sont lancées simultanément, le terme d'expérimentation virtuelle est utilisé. L'utilisation d'expérimentation virtuelle a permis de lancer des simulations possédant des données d'entrées identiques, mais avec des données climatiques distinctes (Figure 2 – b). L'initialisation des expérimentations virtuelles fait intervenir deux arguments, un pour sélectionner les deux fichiers climats et un autre pour lancer les simulations à des années différentes. L'expérimentation virtuelle est donc composée d'une simulation débutant en 1951 avec pour fichier climat la période climatique actuelle et une seconde simulation commençant en 2025 associée au fichier climat futur. Les deux simulations ont une durée respective de 75 ans. Ces deux simulations sont regroupées dans un même dossier et leur compilation permet de regrouper 150 ans de données journalières pour le système modélisé. Les expérimentations virtuelles ont été répétées pour chaque système. Les oliviers ont 75 ans à la fin des simulations, mais ne sont pas arrachés (un olivier continu à être productif même après 100 ans).

b) Phase de développement

Afin d'affiner les comparaisons entre les différentes modalités, la variable « phase » a été ajoutée. Elle permet de distinguer la phase juvénile de la phase mature de l'olivier. Le passage à la phase mature pour l'olivier est déterminé par la date de la première intervention de taille. Des rendements plus stables pour la phase mature devraient alors être observés. L'ensemble des périodes climatiques pour chaque système est divisé en deux à nouveau. Il y aura donc pour la période climatique actuelle : un climat actuel lointain pour la phase juvénile de l'arbre et un climat actuel proche pour la phase mature ; et pour la période climatique future : un climat futur proche pour la phase juvénile de l'arbre et climat futur lointain pour la phase mature (Figure 6). Les périodes climatiques actuelle et future ont une durée identique de 75 ans. Le passage à la phase mature dépendant de la première intervention de taille, les périodes climatiques intra-actuelle et future sont donc de durées différentes (Tableau II). Une phase juvénile et mature a été déterminée pour le témoin agricole afin de pouvoir comparer les systèmes entre eux uniquement. La phase juvénile de l'olivier a une durée moyenne de 21 ans pour la période climatique actuelle et une durée moyenne de 23 ans pour la période climatique future. La phase juvénile est plus longue pour les SAF par rapport au témoin verger avec jusqu'à 9 ans de différence pour période climatique future.

c) Changement climatique simulé (RCP 4.5, GIEC)

Les variables météorologiques quotidiennes qui sous-tendent le modèle sont synthétisées par la figure 7 ainsi que par les annexes 2 et 3. Le climat à Restinclières devrait se réchauffer et devenir plus sec. La figure 7 - A présente les tendances climatiques pour la température annuelle maximale et minimale, les températures augmenteront dans le futur d'environ 3°C en 2100 par rapport à 1951. Les précipitations annuelles totales devraient diminuer au cours du temps avec -13% de précipitations pour la période climatique future par rapport à la période actuelle (Figure 7 – C). Cependant, elles resteront très variables en fonction des années et le cumul pluviométrique diminuera significativement au printemps et en été pour la période climatique future par rapport à la période actuelle. Enfin, le rayonnement global saisonnier n'augmentera pas significativement en fonction des périodes climatiques (Figure 7 - B).

5 – Analyses de données

a) Land Equivalent Ratio

Le concept de Land Equivalent Ratio (LER) est défini comme la surface relative de terre requise pour les cultures et les arbres seuls afin d'obtenir le même rendement total que

$$\begin{aligned} \text{LER}_{\text{SAF}} &= \text{LER}_{\text{SAF-Olive}} + \text{LER}_{\text{SAF-Cultures}} \\ \text{LER}_{\text{SAF-Olive}} &= \frac{\text{rendements des oliviers SAF}}{\text{rendemnts des oliviers TV}} \\ \text{LER}_{\text{SAF-Cultures}} &= \frac{\text{rendement des cultures SAF}}{\text{rendement des cultures TA}} \end{aligned}$$

Figure 8 : Formules utilisées pour le calcul de LER annuel (Temani et al. 2021)

$$\begin{aligned} \text{LER}_{\text{SAF climat}} &= \text{LER}_{\text{SAF-Olive}} + \text{LER}_{\text{SAF-Cultures}} \\ \text{LER}_{\text{SAF-Olive}} &= \frac{\sum_{k=1951}^{2100} \text{rendements des oliviers SAF}}{\sum_{k=1951}^{2100} \text{rendements des oliviers TV}} \\ \text{LER}_{\text{SAF-Cultures}} &= \\ &\left(\frac{1}{3} \times \left(\frac{\sum_{k=1951}^{2100} \text{rendements pois d'hiver SAF}}{\sum_{k=1951}^{2100} \text{rendements pois d'hiver TA}} \right) \right) + \left(\frac{1}{3} \times \left(\frac{\sum_{k=1951}^{2100} \text{rendements blé dur SAF}}{\sum_{k=1951}^{2100} \text{rendements blé dur TA}} \right) \right) + \\ &\left(\frac{1}{3} \times \left(\frac{\sum_{k=1951}^{2100} \text{rendements orge d'hiver SAF}}{\sum_{k=1951}^{2100} \text{rendements orge d'hiver TA}} \right) \right) \end{aligned}$$

Figure 9 : Formules utilisées pour le calcul de LER en fonction des périodes climatiques actuelle et future

l'agroforesterie (Mead & Willey, 1980). Deux LER ont été obtenus, un LER annuel et un LER « global » pour chaque grande périodes climatiques (actuelle et future). Le LER prend en compte les rendements de trois des systèmes, le système SAF forte densité de plantation, le témoin agricole pour la culture seule et le témoin verger pour l'olivier seul. Les rendements en grains des cultures ont été ramenés à la surface de la scène (en t ha⁻¹) et les rendements en olives (en kg de masse fraîche par arbre).

Pour les LER effectués pour chaque année, les calculs de la figure 8 ont été réalisés (Temani et al., 2021). La formule utilisée pour le LER global diffère, car elle doit prendre en compte chaque culture de la rotation indépendamment (Figure 9). Le LER indique une productivité supérieure (ou inférieure) de l'agroforesterie par rapport au verger correspondant et aux cultures seules lorsque la valeur est supérieure (ou inférieure) à 1. La valeur est égale à 1 lorsque l'agroforesterie n'a pas d'incidence sur la productivité du système. Ainsi, si les rendements en olives ne diffèrent pas significativement entre les systèmes TV et SAF, le LER de l'olive est égal à 1 (Temani et al., 2021).

b) Tests statistiques

Les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel R (ver 4.2.1) et l'interface Rstudio (ver 2023.03.1 - 446). Dans un premier temps, des tests paramétriques ont été réalisés. Puis les conditions (normalités des résidus, homoscédasticité et indépendances des résidus) ont été testées afin de valider le modèle. La normalité des résidus a été vérifiée à l'aide d'un test de Shapiro Wilk ainsi que des représentations graphiques (qqnorm, qqline) et l'homoscédasticité des résidus a été testée à l'aide d'une représentation graphique (plot) et du test de Bartlett. Dans le cas où les conditions ne sont pas validées, les données ont été analysées avec un test non paramétrique. Des tests post-hoc sont effectués dans le cas où des différences significatives sont mises en évidence. Les différences ont été considérées comme significatives à un seuil de $p < 0,05$. Les tests paramétriques réalisés sont des tests de Student pour les modalités qualitatives à deux niveaux (ex : climat) et des analyses de la variance (anova) à 1 facteur pour les comparaisons multiples (modèle linéaire). La majorité des résidus ont montré une distribution qui ne suivait pas une loi normale et ont donc été analysés à l'aide d'un test de Kruskal-Wallis (non paramétrique). Les tests post-hoc utilisés suite à une anova sont des TukeyHSD et des tests de Dunn après un Kruskal-Wallis.

III – Résultats

Pour l'ensemble des simulations, des variables de sorties de Hi-sAFe ont été analysées afin d'évaluer les performances de ces systèmes. Le modèle Hi-sAFe regroupe plus de 500 variables de sortie, cette partie se concentrera sur des indicateurs tels que le rendement pour les performances agronomiques et la lixiviation de l'N/bilan hydrique pour l'évaluation des performances environnementales. Les données traitées compilent 600 ans de données journalières pour l'intégralité des variables de sorties des expérimentations virtuelles.

1 – Performances agronomiques

L'analyse des performances agronomiques passe par une étude de la dynamique de production de l'olivier et de chaque culture de la rotation. La diminution ou l'augmentation des rendements pour la période climatique future (2025-2100) par rapport à la période climatique actuelle (1951-2025) permet d'évaluer si le CC a une influence sur la productivité du système.

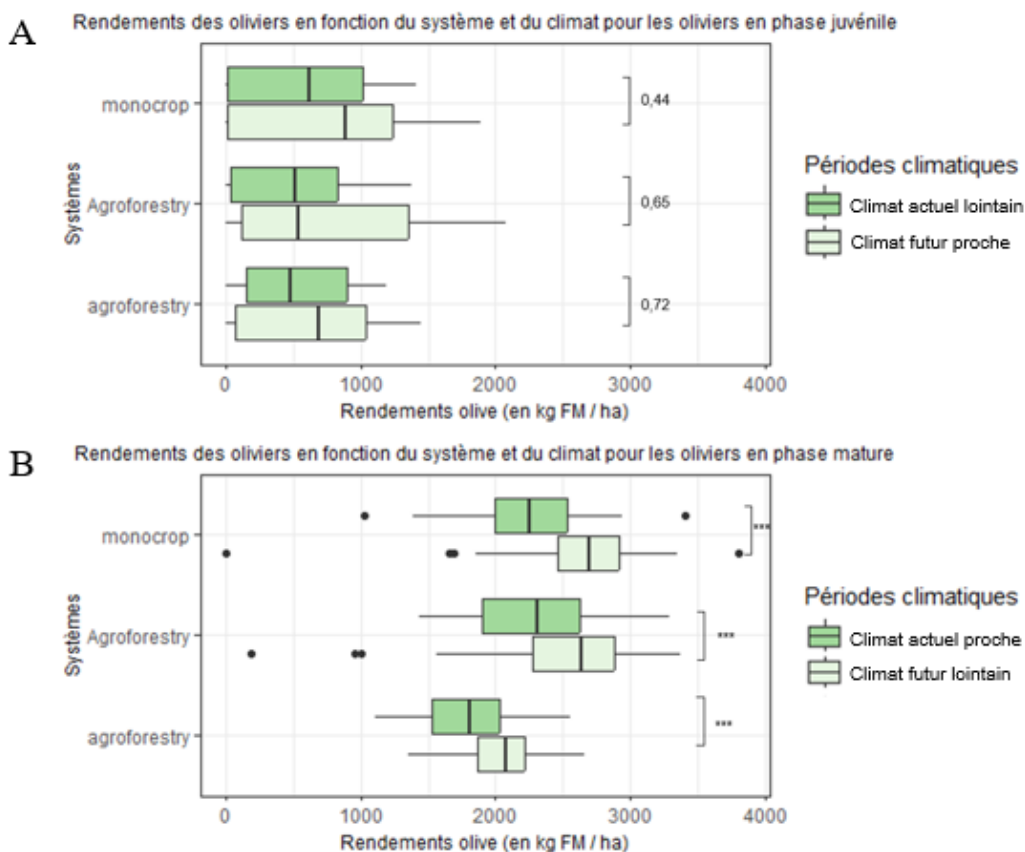


Figure 10 : Représentation graphique en boxplot des rendements en olives en masse fraîche (kg/ha) en fonction des périodes climatiques et des systèmes avec en A les résultats pour la phase juvénile de l'olivier et en B les rendements pour la phase mature des oliviers. Comparaison des rendements en fonction du climat pour un système et une phase de développement de l'olivier donné, test de Student et de Kruskal-Wallis avec un seuil de significativité 0,05. Densité de plantation : monocrop (204 arbres/ha), Agroforestry (204 arbres/ha) et agroforesterie (123 arbres/ha).

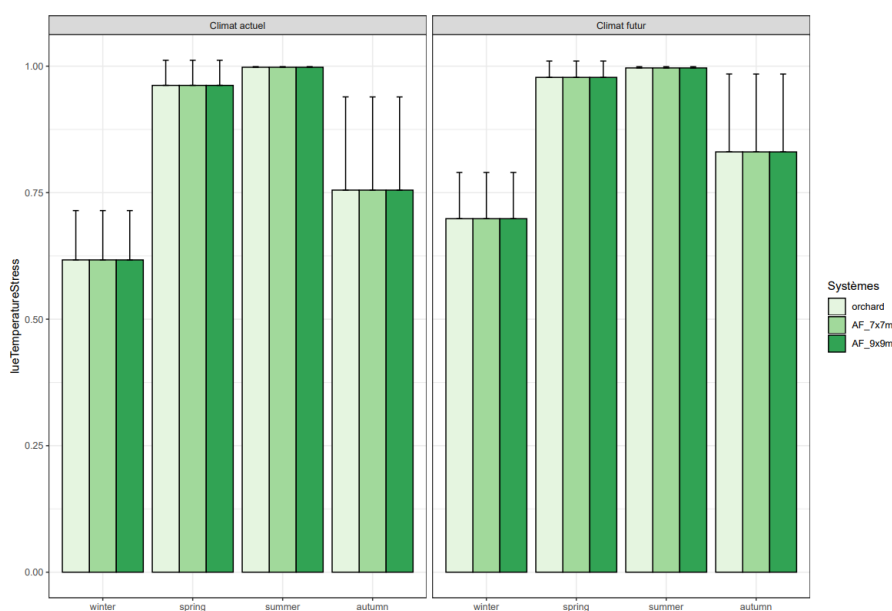


Figure 11 : Représentation graphique en barplot du stress thermique saisonnier de l'arbre en fonction des systèmes et des périodes climatiques. Une valeur de 1 indique une absence de stress. Le stress thermique à la chaleur est induit lorsque la température dépasse 35°C, la photosynthèse est alors bloquée. Les barres d'erreurs représentent l'écart-type.

a) Rendements des oliviers

Le modèle Hi-sAfe permet de simuler les dynamiques de rendement pour l'olivier et les cultures intercalaires. Pour l'olivier, le nombre de fruits et le poids moyen frais (Fresh Matter (FM)) d'une olive permettent d'obtenir le rendement en olives par arbre. La production des oliviers est ramenée à l'hectare, puis comparée entre chaque modalité.

Les rendements en olives varient de 0 à 3804,64 kg FM ha⁻¹ pour l'ensemble des systèmes. Ramené à l'arbre, ce cumul correspond en moyenne par an à 18,65 kg/arbre. Lors de la phase juvénile, les rendements sont compris entre 0 et 2080,69 kg FM ha⁻¹ et pour la phase mature de 0 à 3804,64 kg FM ha⁻¹. Les rendements de l'olivier en témoin verger varient de 0 à 3804,64 kg ha⁻¹. Tandis que les rendements SAF forte densité varient de 0 à 3375,14 kg ha⁻¹ et ceux en SAF faible densité varient de 0 à 2667,06 kg ha⁻¹.

La figure 10 permet de visualiser les rendements en olives en fonction des systèmes et de la période climatique pour chaque phase de développement de l'olivier (Figure 6). Les graphiques mettent en évidence des valeurs de rendements pour l'olivier plus importantes pour la phase mature. En effet, lors de la phase juvénile, l'arbre n'a pas encore atteint son potentiel maximal de production. Pour les rendements de la phase juvénile, les comparaisons faites en fonction du climat et du système indiquent qu'il n'y a pas de différences significatives. En phase juvénile, les rendements de l'olivier ne dépendent pas de la période climatique pour chaque systèmes donné (Figure 10) et ne dépendent pas du type de système pour chaque période climatique donnée (Annexe 4).

En phase mature, les rendements de l'olivier sont multipliés par 4 par rapport à la phase juvénile. Des différences de productivité entre les périodes climatiques et les systèmes sont observées pour cette phase de développement de l'olivier. Des comparaisons intra systèmes ont été réalisées et ont mis en évidence des différences significatives des rendements en fonction des périodes climatiques. Pendant la période climatique future lointaine, les rendements connaissent une augmentation significative par rapport à la période climatique future proche. Des comparaisons du rendement en fonction des systèmes pour une période climatique donnée ont mis en évidence des différences significatives des rendements. Des comparaisons deux à deux ont été effectuées, révélant des différences significatives entre les rendements du TV et du SAF faible densité de plantation, ainsi qu'entre les deux modalités de SAF, pour les deux périodes climatiques futures (Annexe 5).

i) Stress thermique de l'arbre

Le stress thermique de l'arbre est évalué dans le modèle avec l'indice de l'effet du stress thermique sur le Light Use Efficiency (LUE) allant de 0 à 1 et dont une valeur de 1 indique une absence de stress thermique. Le stress thermique à la chaleur est induit à partir de 35°C (température moyenne journalière). Sur les 150 ans de simulations, on recense 135 jours où la température est supérieure à 35°C. Soit 33 jours pour la période climatique actuelle (1951-2025) et 102 jours pour la période climatique future (2025-2100). Il est à noter que l'année cumulant le plus de jours avec une température supérieure ou égale à 35°C est l'année 1999 avec 8 jours au total. Les années comptant plus de 5 jours avec des températures maximales supérieures ou égales à 35°C sont toutes comprises dans la période climatique future. La figure 11 illustre les variations saisonnières de l'indice de stress thermique moyen de l'arbre en fonction des différents systèmes pour chaque période climatique. Cette représentation met en évidence des différences significatives de l'indice de stress thermique en fonction des saisons pour chaque période climatique étudiée. Après avoir effectué un test de comparaison deux à deux (Dunn test), il a été constaté, sous climat actuel et futur, une différence significative de l'indice de stress thermique entre l'hiver et les saisons printemps et été, ainsi qu'entre l'automne

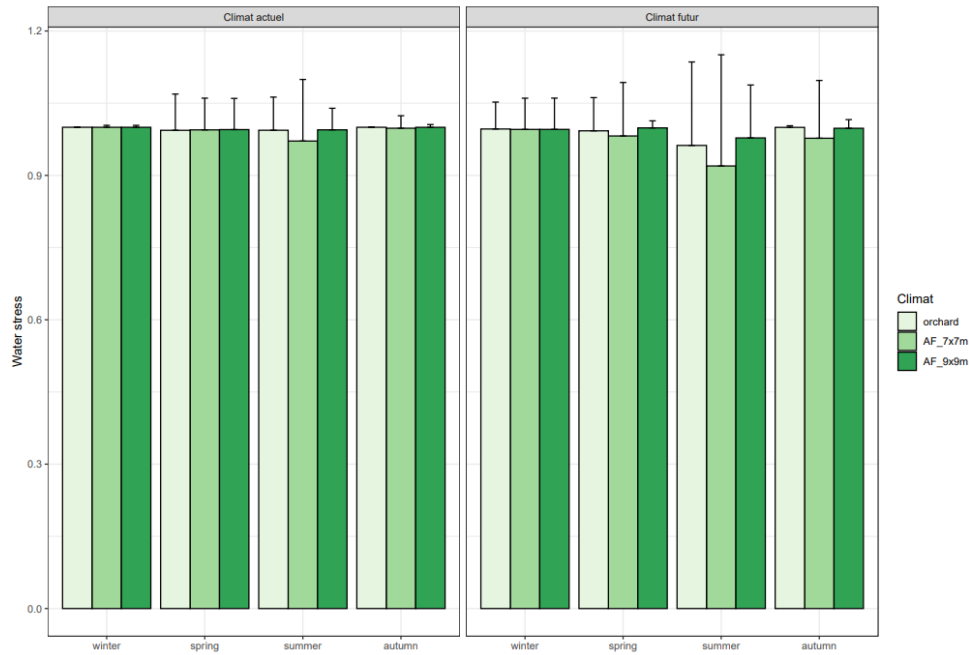


Figure 12 : Représentation graphique en barplot du stress hydrique saisonnier de l’arbre en fonction des systèmes et des périodes climatiques. Une valeur de 1 indique une absence de stress. Les barres d’erreurs représentent l’écart-type.

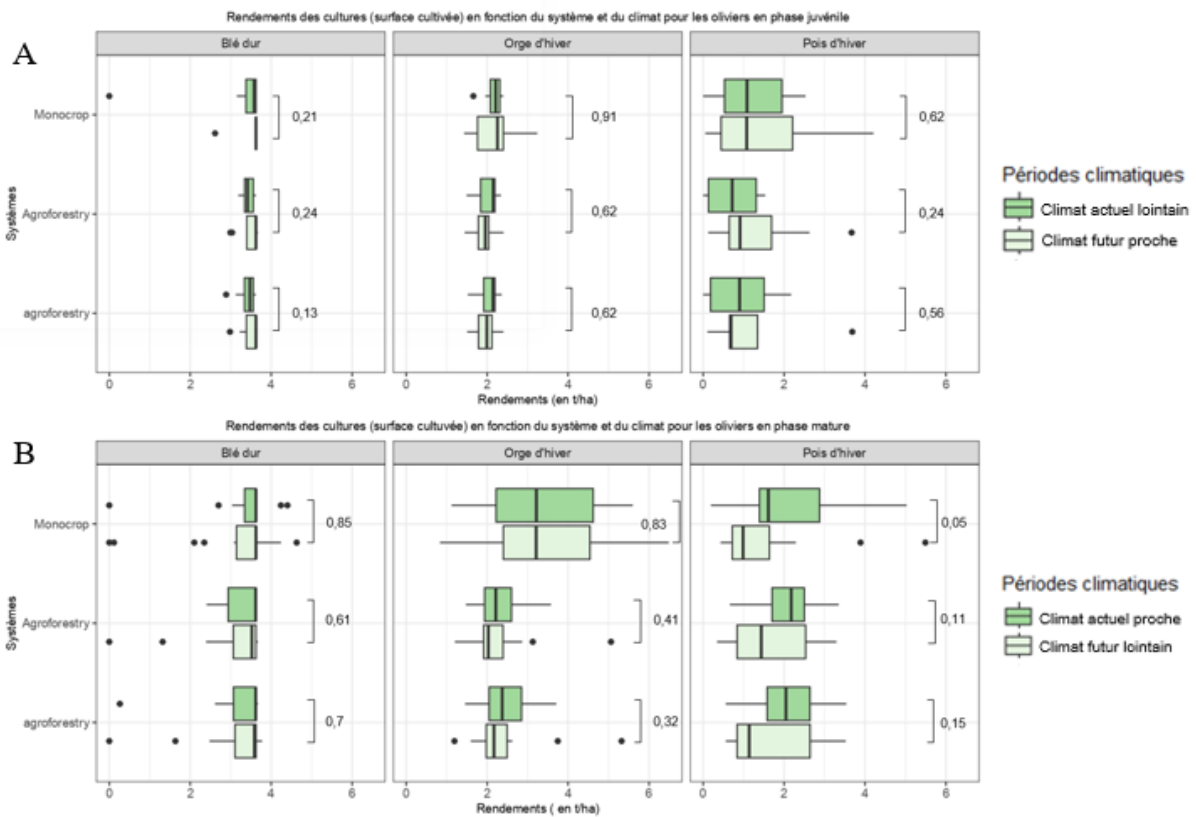


Figure 13 : Représentation graphique en boxplot des rendements des cultures de la rotation (en t/ha) en fonction des périodes climatiques et des systèmes avec en A les résultats pour la phase juvénile de l’olivier et en B les rendements pour la phase mature. Comparaison des rendements en fonction du climat pour un système et une phase de développement de l’olivier donné avec des tests de Student et de Kruskal- Wallis et dont le seuil de la p-value était fixé à 0,05. Densité de plantation : monocrop (204 arbres/ha), Agroforestry (204 arbres/ha) et agroforesterie (123 arbres/ha).

et l'été. En revanche, aucune influence du système n'a été observé sur la « résistance » au stress thermique, car l'indice de stress saisonnier est similaire entre les systèmes pour les deux périodes climatiques.

ii) *Stress hydrique de l'arbre*

Le stress hydrique de l'arbre est calculé dans le modèle Hi-sAFe comme le rapport de l'absorption d'eau sur la demande en eau de l'arbre (absorption/demande) et dont un indice de 1 signifie une absence de stress (indice variant de 0 à 1).

D'après la figure 12 représentant le stress hydrique moyen saisonnier de l'arbre en fonction des systèmes pour chaque période climatique, on observe qu'il n'y a pas de différence significative du stress hydrique entre les saisons pour chaque période et qu'ils ne diffèrent pas entre les systèmes. De plus, l'indice de stress est proche de 1 ce qui indique que le stress hydrique est très faible.

b) *Rendements cultures*

Les rendements du blé dur varient de 0 à 4,63 t ha⁻¹. Lors de la phase juvénile, les rendements sont compris entre 0 et 3,67 t ha⁻¹ et pour la phase mature de 0 à 4,63 t ha⁻¹. Les rendements de l'orge d'hiver varient de 0,83 à 6,49 t ha⁻¹. Lors de la phase juvénile, les rendements sont compris entre 1,43 et 3,24 t ha⁻¹ et pour la phase mature de 0,83 à 6,49 t ha⁻¹. Les rendements du pois d'hiver varient de 0 à 5,49 t ha⁻¹. Lors de la phase juvénile, les rendements sont compris entre 0 et 4,20 t ha⁻¹ et pour la phase mature de 0,19 à 5,49 t ha⁻¹.

La figure 13 permet de visualiser les rendements des cultures (blé dur, orge d'hiver et pois d'hiver) en fonction des systèmes (TA, SAF forte densité de plantation et SAF faible densité de plantation) et de la période climatique pour chaque phase de développement de l'olivier. Les rendements des cultures pour chaque système en phase juvénile ne diffèrent pas en fonction de la période climatique. Les analyses statistiques ont permis de vérifier si les rendements en phase juvénile pour une culture et un système donné dépendaient de la période climatique. Les résultats statistiques ont mis en évidence qu'il n'y avait pas de différences significatives.

Les rendements des cultures pour chaque système en phase mature ne diffèrent pas graphiquement en fonction de la période climatique, sauf pour le pois d'hiver où une plus grande variabilité est observée. Les analyses statistiques ont permis de vérifier si les rendements en phase mature pour une culture et un système donné variaient en fonction de la période climatique. Les analyses (Annexe 6) ont révélé qu'il n'y avait pas de différences significatives des rendements pour les trois cultures. Les rendements ne dépendent donc pas du climat, que ce soit en phase juvénile ou mature du système.

En revanche, après une analyse des rendements en fonction des systèmes pour chaque culture, des différences significatives pour l'orge d'hiver ont été mises en évidence. Après une analyse post-hoc (Annexe 7), les rendements pour l'ensemble des systèmes sont significativement différents pour la période climatique future proche et pour la période future lointaine. Des différences de rendement pour le TV et le SAF forte densité de plantation sont également démontrées.

c) *Land Equivalent Ratio (LER)*

Le LER a été calculé chaque année pour le SAF forte densité de plantation. La figure 14 regroupe l'ensemble des valeurs de LER pour les 150 ans de simulation du système. Des valeurs de LER inférieure à 1 sont observées à chaque début de simulation du fait des faibles rendements de l'olivier les premières années après son implantation. Globalement, l'ensemble des valeurs de LER sont supérieures à 1 et se situent autour de 1,5 (Figure 14). Des valeurs de

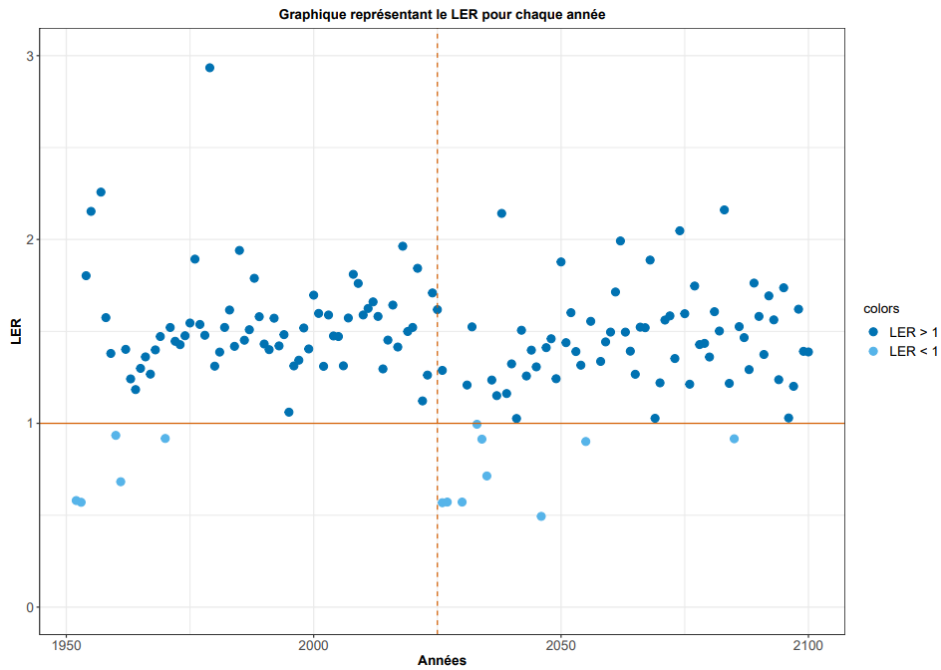


Figure 14 : Représentation graphique en nuage de points des valeurs de LER en fonction du temps. Un point représente une valeur de LER pour une année donnée (en bleu clair les LER dont la valeur est inférieure à 1 et en bleu plus foncé pour les valeurs de LER supérieure à 1). Présence d'un axe horizontal avec pour seuil 1 ainsi que d'un axe vertical pointillé en 2025 pour séparer la période climat actuel de la période climat futur.

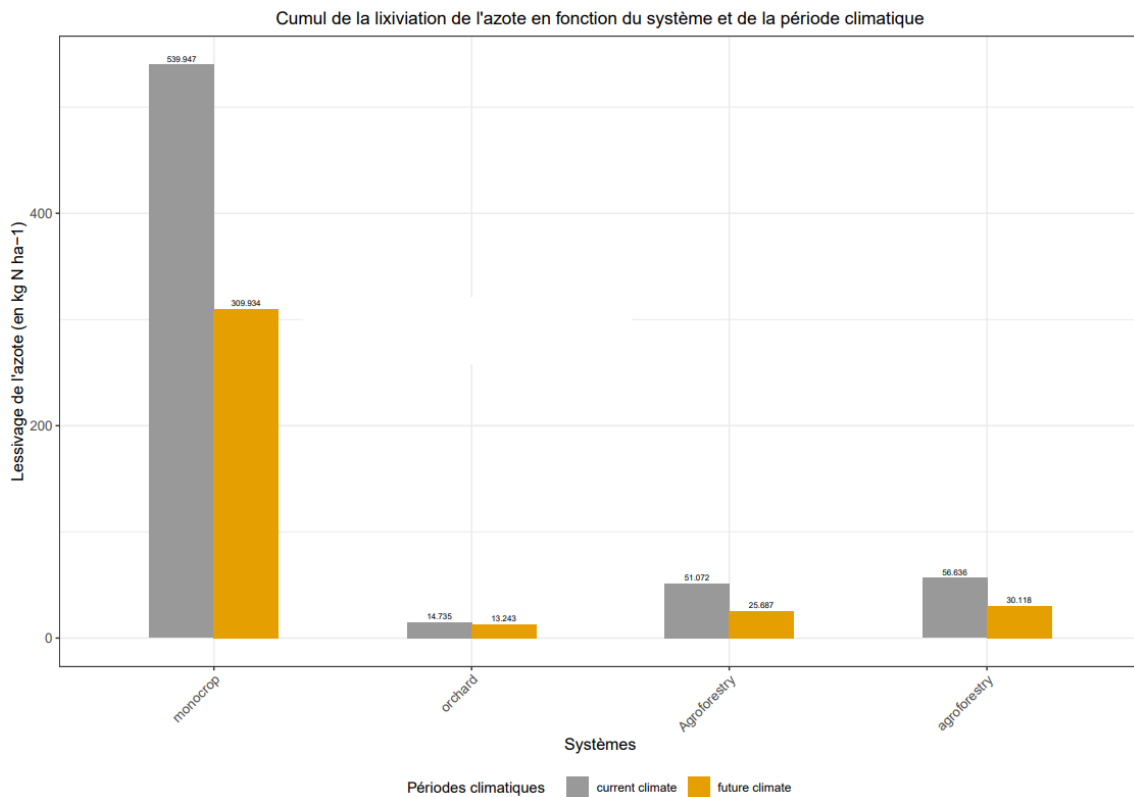


Figure 15 : Représentation graphique en barplot du cumul sur 75 ans de lixiviation de l'azote (en kg N ha⁻¹) en fonction des systèmes et de la période. Densité de plantation des oliviers : monocrop (204 arbres/ha), Agroforestry (204 arbres/ha) et agroforesterie (123 arbres/ha).

LER supérieures à 2 sont également observées. Les valeurs de LER supérieures à 2 reflètent un très faible rendement du système en monoculture.

$$\begin{aligned} \text{LER}_{\text{SAF-1979}} &= 0,96 + 1,97 = 2,93 \\ \text{LER}_{\text{SAF-Olive}} &= (9,43/9,77) = 0,96 \\ \text{LER}_{\text{SAF-Cultures}} &= (0,38 / 0,19) = 1,97 \end{aligned}$$

Dans le cas de l'année 1979, le LER vaut 2,93 et c'est la culture qui contribue le plus, avec un LER de 1,97. Un LER global a également été calculé pour la période climatique actuelle et future. Le LER pour la période climatique actuelle vaut 1,49 et celui pour la période climatique future 1,41. Dans les deux cas, le LER est supérieur à 1, indiquant une meilleure performance des SAF.

2 - Performances environnementales

Afin d'analyser les performances environnementales des différents systèmes, des variables environnementales sont analysées comme la lixiviation de l'N, le ruissellement de l'eau du sol, le cycle de l'N et le cycle de l'eau.

a) Lixiviation de l'azote

La lixiviation est le processus au cours duquel l'eau passe au travers des pores du sol en entraînant les éléments très solubles dans l'eau comme le nitrate, par percolation en profondeur. En toute rigueur, on utilise ici le terme de « lixiviation » pour le nitrate qui est en solution dans l'eau. Le terme de lessivage est en effet réservé aux éléments solides comme l'argile. La lixiviation dépend fortement des dynamiques de certains événements (précipitations, température, activité racinaire des plantes) et est un phénomène pris en compte (en tenant compte de plusieurs variables d'entrées) par le modèle Hi-sAFe.

Selon la figure 15, qui illustre la lixiviation cumulée de l'N pour chaque système et période climatique sur une période de 75 ans par modalité, on observe une diminution de la quantité de N lixiviée dans le climat futur par rapport au climat actuel. Cette tendance est valable pour tous les systèmes étudiés, et elle est statistiquement significative avec une valeur de $p < 0,05$ selon le test de Kruskal-Wallis. Il est mis en évidence que le système contenant la culture seule en rotation a des quantités d'N lixiviées les plus importantes (Annexe 8). Des tests statistiques (TukeyHSD) comparant les systèmes entre eux pour une période climatique donnée ont montré des différences significatives entre le système TA (cultures seules en rotation) et les modalités TV ainsi que les deux SAF.

Pour les SAF et le TV, la perte d'N par lixiviation a lieu au début de chaque simulation lorsque le sol est initialisé et contient une quantité importante d'N. Par la suite, les systèmes ne lixivient presque plus d'N contrairement au TA où la perte d'N a lieu tout le long de la période de simulation, avec des pics plus importants certaines années (Annexe 9).

b) Cycle de l'azote

La figure 16 représente une simplification des entrées et des sorties d'N pour les systèmes (Annexes 10 à 12). Les entrées d'N sont les apports d'N aérienne et racinaire par les résidus de cultures ainsi que la fixation symbiotique du pois d'hiver. Les sorties prennent en compte la lixiviation de l'N ainsi que l'absorption de l'N par l'arbre.

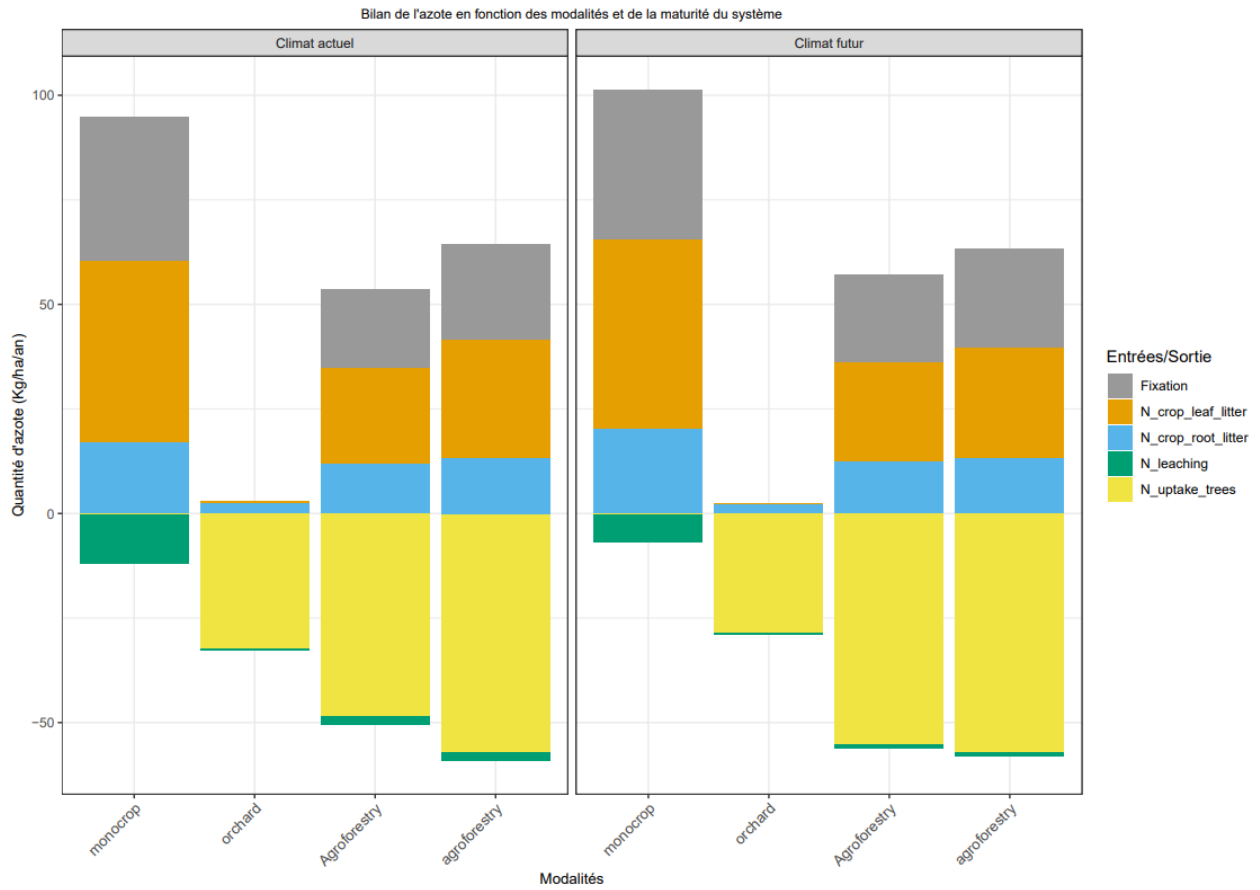


Figure 16 : Représentation graphique en colonnes des entrées et des sorties d'azote (en Kg N ha⁻¹) en fonction des systèmes et des périodes climatiques pour chaque phase. En négatif, les sorties d'azote (en Kg/ha/an) avec la lixiviation et l'absorption d'azote par l'arbre et en positif, les entrées d'azote (en kg/ha/an) avec la fixation et l'apport d'azote par les cultures (aérien et racinaire). Densité de plantation des oliviers : monocrop (204 arbres/ha), Agroforestry (204 arbres/ha) et agroforestry (123 arbres/ha).

L'apport principal d'N au système se fait par la fixation ainsi que par les résidus de culture. Il est relativement plus important pour le TA par rapport au SAF et au TV. Les cultures de la rotation (pois d'hiver, blé dur et orge d'hiver) apportent une quantité significativement plus importante d'N que l'enherbement du TV. Les oliviers des systèmes SAF absorbent plus d'N que les oliviers en TV. Les besoins en N des arbres ne sont pas limités pour les SAF, car les entrées sont équivalentes aux sorties. Comme vu précédemment, la lixiviation est plus importante pour le TA. Cela peut être expliqué par des entrées d'N nettement supérieure à celle des autres systèmes.

c) *Bilan hydrique*

Le bilan hydrique regroupe les entrées d'eau avec les précipitations et les sorties avec le drainage, le ruissellement, l'évaporation de l'eau du sol ainsi que l'absorption d'eau par les cultures et par l'olivier (Figure 17 et Annexe 13). Les précipitations pour le climat actuel sont d'environ 872 mm/an et pour le climat futur de 761 mm/an (Figure 17 - A). Il y a une diminution du bilan hydrique entre la période climatique future et la période actuelle. Plus précisément, le drainage diminue sous le climat futur. Après une analyse statistique, des différences significatives ont été observées entre les SAF à forte densité et le TV ($p < 0,05$, Test de Dunn), avec un drainage plus faible pour le SAF par rapport au TV. Sous climat futur, des différences significatives sont démontrées entre le SAF forte densité de plantation, le TA et le TV. De plus, des différences ont également été observées entre le SAF faible densité de plantation et le TV. Il convient de noter qu'une valeur minimale de drainage a été observée pour le SAF forte densité de plantation.

Le ruissellement peut être utilisé comme un proxy pour l'érosion des sols, mais le calcul du ruissellement par le modèle n'est pas optimal. Il est néanmoins mis en évidence que le ruissellement diffère significativement entre les systèmes pour la période climatique actuelle entre les deux SAF et le TA, le TV vs TA et le SAF faible densité et le TV ($p < 0,05$, test de Dunn après un Kruskal). Pour le climat futur, les mêmes différences significatives sont observées. Le ruissellement est plus important en témoin agricole et il dépend du système.

L'évaporation de l'eau du sol varie significativement en fonction des systèmes ($p < 0,05$, test de Kruskal-Wallis) et est le plus élevé pour le système TA. Les SAF diminuent l'évaporation de l'eau du sol. Les besoins en eau de l'arbre sont moins importants pour les SAF à faible densité de plantation et les besoins en eau des cultures sont plus faibles dans les SAF par rapport au TA. Les caractéristiques du sol ont un impact sur la disponibilité de l'eau dans le sol. Le sol du terrain d'étude est un sol profond à l'inverse d'un sol de costière, où l'on retrouve les oliveraies principalement, et a pour avantage de ne pas être limitant en eau pour les systèmes modélisés.

IV – Discussion

1 - Impact des SAF et du changement climatique sur l'olivier

a) Effets du réchauffement climatique sur la production des oliviers

Les oliviers présentent une augmentation des rendements en phase mature sous climat futur lointain par rapport à la période climatique actuelle proche. En phase juvénile, l'olivier ne présente pas de différence significative de rendement en fonction de la période climatique. Le climat futur ne semble pas impacter négativement le rendement de l'olivier en phase de

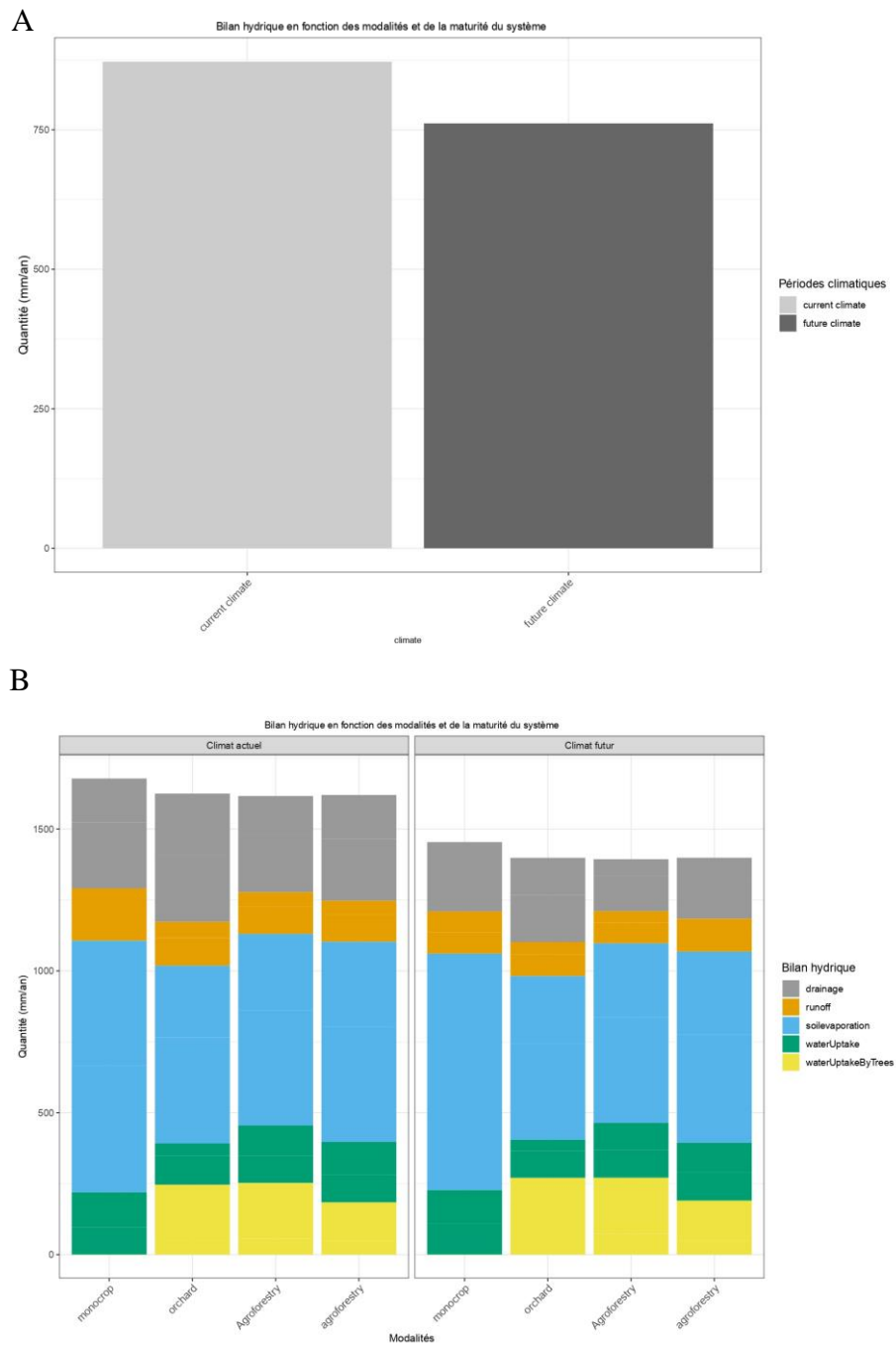


Figure 17 : Représentation graphique du bilan hydrique (en mm/an) en fonction des systèmes pour chaque période climatique et chaque phase.

A - Entrées d'eau avec les précipitations (en mm/an)

B - Sorties d'eau (en mm/an) regroupant le drainage (gris), le ruissellement (orange), l'évaporation de l'eau du sol (bleu), l'absorption d'eau par la culture (vert) et l'absorption d'eau par l'arbre (jaune).

Densité de plantation des oliviers : monocrop (204 arbres/ha), Agroforestry (204 arbres/ha) et agroforestry (123 arbres/ha).

développement (juvénile), d'après les données obtenues pour le contexte étudié. En revanche, en phase mature (c'est-à-dire pour les oliviers âgés d'environ 20 ans et plus), une augmentation des rendements en olive est observée.

Les variations de rendements régionales ne sont pas seulement influencées par les conditions pédoclimatiques locales, la densité de plantation et les pratiques agricoles clés. Les modèles agronomiques sur les cultures pérennes, et par conséquent les modèles d'oliviers, présentent diverses limitations qui restreignent leur précision et leur application (Fraga et al., 2021).

L'augmentation des rendements dans nos simulations peuvent-être soumis à deux hypothèses : i) l'augmentation du rayonnement global, et ii) l'augmentation de l'efficacité de la photosynthèse pour la période climatique futur. Pour la première hypothèse, la figure 7 – B met en évidence l'absence de différence significative du rayonnement global saisonnier en fonction des périodes climatiques, cette hypothèse est donc rejetée. Bien que non significatif, une légère augmentation du rayonnement global est observée, notamment en automne et en hiver.

b) Etude du stress thermique et hydrique de l'olivier

Afin de tester la deuxième hypothèse, l'efficacité de la photosynthèse peut être évaluée avec l'étude de l'indice de stress thermique sur le LUE (variable disponible dans le modèle Hi-sAFé). La figure 11 met en évidence des variations significatives de l'indice de stress thermique entre les saisons pour chaque période climatique. Les valeurs de l'indice de stress thermique sont plus faibles en hiver et en automne par rapport au printemps et à l'été. Par conséquent, on peut supposer que les oliviers sont davantage soumis à un stress thermique pour les températures froides que pour les fortes températures. Effectivement, les paramètres définissant les limites du stress thermique sur l'efficacité de la photosynthèse sont configurés avec un seuil minimal à 0°C et un seuil maximal à 35°C (température moyenne journalière), et avec une gamme optimale de photosynthèse entre 15°C et 25°C. En dessous de 0°C et au-dessus de 35°C, la photosynthèse de l'olivier est inhibée. Selon une analyse climatique approfondie du bassin méditerranéen, les zones de culture de l'olivier sont déterminées par des températures mensuelles moyennes optimales se situant autour de 7°C en janvier et de 25°C en juillet (Moriondo et al., 2013).

Dans les modèles deux stress thermique sont calculés : le stress thermique sur l'efficacité de la photosynthèse et le stress thermique sur les fleurs.

Les stress thermiques au moment de la floraison ont été explorés dans nos simulations. Dans le modèle Hi-sAFé, le stress à la chaleur sur les fleurs est déclenché si le seuil des 35°C de température moyenne est dépassée (ce qui induit une diminution du nombre de fleurs). Dans les simulations avec le modèle Hi-sAFé, très peu de stress thermique (forte chaleur) au moment de la floraison est induit. Ces rares stress au moment de la floraison peuvent en partie s'expliquer par une date de floraison plus précoce observée. La dynamique de floraison au cours du temps a montré un avancement de la date de floraison sous climat futur par rapport au climat actuel. Des observations sur le terrain ont révélé que les périodes de floraison des oliviers étaient devenues plus précoces au fil des années. Une avance d'environ quinze jours dans la floraison a été constatée au cours des dernières décennies, ce phénomène pouvant être attribué au réchauffement climatique. Au début des années 1970, la date moyenne du maximum des émissions polliniques était le 158^{ème} jour (début juin). En 2010, elle se situe au 143^{ème} jour (deuxième quinzaine de mai). Les modélisations générées à partir de ces mesures suggèrent une forte dépendance entre les dates de floraison et les températures de début d'année, les

besoins en chaleur expliquent près de 80 % de la variance des dates de pleine floraison (Breton & Bervillé, 2012). Le faible stress thermique observé au moment de la floraison peut aussi être dû aux limites de modélisation du modèle Hi-sAFe. En effet, les valeurs seuils de stress thermique sont fixées par des températures moyennes journalières. Or, il y a très peu de jours observés sur 150 ans avec une température moyenne supérieure à 35°C. Il pourrait être judicieux de revoir le paramétrage de cet indice de stress en fixant des températures moyennes seuils plus basses ou bien en utilisant des valeurs de températures maximales.

Les températures des premiers mois de l'année jouent un rôle crucial dans la floraison de l'olivier. Comme pour d'autres arbres, l'olivier, nécessite la satisfaction de besoins en froid (endodormance) et de besoins en chaleur (ecodormance) qui vont déterminer la date de débourrement des bourgeons ainsi que la date de floraison. Dans les simulations générées, seuls les besoins en chaleur ont été pris en compte. Une amélioration du modèle pourrait être obtenue en étudiant les besoins en froid. Il a été constaté que le stress thermique lié au froid se manifestait en dessous du seuil de 0°C. Si les floraisons surviennent plus tôt, cela pourrait entraîner un risque accru de stress thermique au froid par rapport à un stress thermique dû à de fortes chaleurs dans une période climatique future.

De plus, les simulations mettent en évidence une production variable d'une année à l'autre. Cette variation de la production en olives s'explique par les phénomènes d'irrégularité de production présents chez les espèces fruitières, dont l'olivier. Cette irrégularité de production se caractérise par une année « on » avec une forte charge en fruits et une croissance végétative réduite (compétitions de carbone importantes entre les différents puits). L'année suivante (année « off »), une faible charge en fruits s'explique par une faible croissance végétative de l'année précédente (Kour et al., 2018).

Enfin, l'absence de stress hydrique subit par l'arbre pourrait expliquer cette augmentation de rendement des oliviers. La figure 12 indique qu'il n'y a pas de différence significative de stress hydrique entre les périodes climatiques, et que l'indice est près de 1. Par conséquent, l'arbre ne subit pas de stress hydrique important, même dans la période future. Les précipitations doivent être supérieures à 500 mm pour environ 200 arbres ha⁻¹ en système pluvial (Masmoudi Charfi & Habaieb, 2017), dans le cas de notre étude les précipitations annuelles sont supérieures à 700mm/an (Figure 17 – A) . Les besoins en eau de l'olivier sont donc satisfaits dans notre système. De plus, le sol de la parcelle modélisée est suffisamment profond pour permettre à l'olivier de passer l'été sans stress hydrique.

La réduction des précipitations des données climatiques d'entrées couplée aux données pédologiques de la parcelle d'expérimentation n'induit pas une réduction forte des réserves en eau, les besoins en eau de l'arbre sont toujours satisfaits même sous climat futur. Le scénario RCP 4.5 dans notre cas d'étude ne contraint (hydriquement) pas l'olivier ce qui peut expliquer cette augmentation de rendement. Les résultats restent tout de même à modérer par rapport aux limites du modèle, associé à son incertitude.

Dans le cas de notre étude, il a été démontré que le type de système a un impact sur le rendement (Annexe 4) pour la phase mature de l'arbre. En effet, des différences significatives ont été mises en évidence entre le TV et le SAF forte densité de plantation par rapport au SAF faible densité de plantation (Annexe 5). Il y a donc une diminution des rendements pour le SAF faible densité de plantation par rapport au deux autres, en revanche les systèmes TV et SAF ne présente pas

de différence significative entre les rendements à l'hectare. La mise en place de SAF pour l'olivier n'a pas d'impact sur le rendement pour notre étude, cependant la densité de plantation va impacter le rendement total de la parcelle. Les réserves en eau de notre parcelle, permettent de ne pas limiter la croissance et la productivité des oliviers dans un système à plus forte densité.

c) Généralisation avec d'autres études

Une étude basée sur l'application de modèles de culture à évaluer la croissance des oliviers dans le sud de l'Europe en prenant en compte le rendement pour des conditions climatiques actuelles (1989-2005) et futures (2041-2070) (Fraga et al., 2020). Les résultats indiquent que le modèle de rendement prévoit des rendements plus faibles dans les conditions climatiques actuelles pour les régions oléicoles d'Europe occidentale, notamment dans la Péninsule Ibérique. Le sud de l'Espagne et du Portugal présente des températures saisonnières plus élevées et des précipitations plus faibles, ce qui contribue à un ETP (évapotranspiration potentielle) plus élevée, à un ETA (évapotranspiration actuelle) plus faible et, par conséquent, à une demande en eau plus forte. Cependant, des rendements plus élevés sont constatés dans les régions orientales, telles que l'Italie et la Grèce, en raison d'une demande en eau moins élevée par rapport aux oliveraies situées à l'intérieur de la Péninsule Ibérique. Les projections futures indiquent une augmentation générale de la durée de la saison oléicole ainsi qu'une augmentation de la température de la saison de croissance jusqu'à 3 °C. Les précipitations devraient diminuer en Europe de l'Ouest, entraînant une augmentation de la demande en eau et par conséquent une baisse du rendement (jusqu'à -45 %). Sur l'Europe de l'Est, les précipitations devraient augmenter légèrement, entraînant une baisse de la demande en eau et une légère augmentation des rendements (jusqu'à +15 %) (Fraga et al., 2020).

D'après nos simulations, dans le sud de la France, proche de Montpellier, les rendements en olives (pour une parcelle avec une réserve en eau non limitante) vont augmenter. Même si les précipitations diminuent légèrement dans le futur dans le sud de la France, la croissance et la productivité des oliveraies ne devrait pas être impactées sur des parcelles avec une réserve utile suffisante en eau. En revanche, ces propos sont à modérer par rapport aux limites de modélisation (formalismes du stress thermique à améliorer, non prise en compte des maladies, etc.). En revanche, sur une parcelle de type « Costière », caractérisée par une profondeur de sol très limité, la dynamique de croissance et de production des oliviers aurait très certainement été tout autre. Une étude a révélé que des précipitations faibles combinées à des températures élevées entraînent un mûrissement précoce des fruits et affectent la qualité de l'huile d'olive (Gratsea et al., 2022). Cependant, le modèle Hi-sAFe ne fournit aucune indication sur la qualité du rendement.

2 – Impact du changement climatique sur les cultures

L'impact de la période climatique futur sur les rendements des cultures de la rotation (pois d'hiver, blé dur et orge d'hiver) n'est pas significatif (Figure 13) dans nos simulations. Les résultats d'une étude par la modélisation de SAF à base de noyers hybrides et de blé dur sur l'inter-rang avec le modèle Hi-sAFe avaient mis en évidence une augmentation des rendements de la culture de blé dur seule. Le rendement en blé dur avait augmenté avec le CC au cours des 120 années de simulation avec l'utilisation du scénario RCP 8.5 comme données climatiques d'entrées. L'augmentation des rendements en blé dur s'expliquaient par une diminution des contraintes dû au gel en début de saison et des températures moins froides sous-optimales pour la photosynthèse. Ces conditions peuvent être particulièrement liées au site d'étude spécifique,

qui est situé dans une dépression topographique, où les températures hivernales sont plus basses que dans la plaine voisine (Reyes et al., 2021). Les données climatiques de notre étude provenant de la même localisation, ces conditions doivent être considérées. Mais les paramètres d'entrées n'étant pas identiques (sol moins profond, espèce d'arbre différent ainsi que l'itinéraire technique des cultures), il est difficile de comparer les rendements en blé dur obtenu (3- 4 t ha⁻¹) avec ceux de cette étude de 3–6 t ha⁻¹.

De plus, les résultats sont à modérer, car d'après la littérature, le CC affectera négativement la productivité des cultures. Les variétés d'hiver semblent sensibles au froid extrême après la plantation. Tous les rendements réagissent négativement à une augmentation des températures au printemps et en été et à la diminution des précipitations par rapport aux niveaux de précipitations historiques. Il est prévu que les rendements des cultures seront affectés négativement par le CC dans un large éventail de modèles climatiques et de scénarios d'émissions. Selon un modèle basé sur le scénario RCP 8.5, en maintenant les zones de cultures et la technologie constantes, une diminution de 21% du rendement en blé dur et une diminution de 17,3% du rendement de l'orge d'hiver sont prévues d'ici la fin du siècle. L'incertitude des projections climatiques domine l'incertitude du modèle statistique (modèle de rendement statistique flexible) (Gammans et al., 2017).

Pour les cultures de la rotation, il a été démontré qu'il n'y avait pas de différence significative des rendements en fonction des systèmes, sauf pour l'orge d'hiver en phase mature (Annexe 6). Les rendements des trois systèmes pour l'orge d'hiver diffèrent significativement entre eux pour la période climatique actuelle proche. En revanche, pour la période climatique future lointaine, seuls les systèmes TA et SAF à forte densité présentaient une différence significative (Annexe 7). Globalement, le rendement de l'orge d'hiver était plus important en TA qu'en SAF. Les SAF n'ont pas nécessairement eu un impact positif ou négatif sur le rendement des cultures, à l'exception de l'orge d'hiver.

Le LER permet d'évaluer les performances des SAF par rapport aux cultures seules. Les SAF sont avantagés lorsque le rapport est supérieur à 1. Dans ce cas, les valeurs obtenues autour de 1,5, que ce soit pour les LER annuels ou pour les différentes périodes climatiques (actuelle et future), démontrent une meilleure performance des SAF par rapport aux cultures pures. Des études antérieures ont également révélé des résultats similaires à ceux de nos simulations. Des agriculteurs de la région Occitanie, dans le sud de la France, ont collaboré avec des chercheurs pour étudier la possibilité d'introduire du blé dur et des légumineuses dans un verger d'oliviers. Les résultats de cette étude démontrent la faisabilité de cette pratique, qui permet également d'améliorer la rentabilité de la culture fruitière. Sur une période de 2014 à 2017, le LER a atteint 1,81, en combinant les surfaces relatives du blé dur (0,62) et de l'olivier (1,29). Les cultures intercalaires favorisant la production d'olives grâce à une intervention minimale sur le sol et à l'amélioration de sa fertilité par rapport à l'enherbement spontané. Bien que le rendement du blé dur soit réduit, il constitue une source de revenu supplémentaire (Panozzo et al., 2020).

3 – Les performances environnementales des SAF face au changement climatique

La culture intensive d'oliviers entraîne des dégradations des systèmes, notamment l'érosion du sol. Avec le modèle Hi-sAFe, il est possible d'estimer l'érosion hydrique du sol en utilisant le ruissellement de l'eau comme proxy (en revanche, la précision n'est que faible et le

formalisme doit évoluer). Les résultats ont mis en évidence une diminution du ruissellement pour les SAF par rapport au TA et entre le SAF faible densité et le TV.

Une étude menée a révélé que l'introduction de SAF permet de réduire l'érosion par rapport aux systèmes de cultures arables. Pour les sites présentant un niveau moyen d'érosion (0,5 à 3 tonnes ha⁻¹ an⁻¹), les SAF pourraient réduire de manière significative l'érosion jusqu'à 80% (passant de 1,6 à 0,3 tonne ha⁻¹ an⁻¹) (Palma, Graves, Bunce, et al., 2007).

Des résultats similaires ont été observés en ce qui concerne la lixiviation de l'N, où des valeurs élevées de lixiviation ont été observées dans les systèmes TA, tandis que la lixiviation était proche de zéro (kg N ha⁻¹) pour les SAF et le TV. En effet, une étude de modélisation a démontré que l'implantation de SAF pouvait entraîner une réduction de la lixiviation de l'N.

La lixiviation des nitrates vers les eaux souterraines est grandement influencée par le bilan hydrique du sol. Dans les régions connaissant des années de faible pluviométrie, il se peut que l'eau ne soit pas transportée en dessous de la zone racinaire en raison d'une évapotranspiration supérieure aux précipitations. De tels schémas de précipitations sont courants dans les régions méditerranéennes, comme l'ont observé des études menées en Espagne (Palma, Graves, Bunce, et al., 2007). Pour les cultures arables existantes dans ces régions, le lessivage de l'N reste minime, voire inexistant. Ces résultats concordent avec l'observation générale selon laquelle le lessivage des sols profonds est négligeable dans le contexte d'agriculture non irriguée sous les climats méditerranéens. Les résultats de l'étude ont aussi mis en évidence une réduction significative de la lixiviation de l'N, allant de 54% pour une densité d'arbre de 113 arbres ha⁻¹ (Palma, Graves, Bunce, et al., 2007). Cependant, lorsque les sites à forte lixiviation d'N (>100 kg ha⁻¹ an⁻¹) ont été analysés séparément, l'introduction de l'agroforesterie à 113 arbres ha⁻¹ sur 50 % des meilleures terres de l'exploitation a réduit la lixiviation d'N d'environ 30 %, passant de 134 à 97 kg N ha⁻¹ a⁻¹. Cependant, l'approche de modélisation (Yield-SAFE) utilisée ici ne tient pas compte du potentiel des racines des arbres à récupérer l'N sous la zone racinaire des cultures ni de la possibilité de réduire la fertilisation en raison de l'augmentation de la matière organique dans le sol à la suite de la chute des feuilles des arbres (Palma, Graves, Bunce, et al., 2007).

L'adoption de SAF offre un potentiel de réduction de l'érosion des sols et de la lixiviation de l'N, tout en favorisant la séquestration du C et la biodiversité du paysage. L'ampleur de ces modifications dépend des caractéristiques spécifiques des sites et de la gestion des SAF. Les avantages environnementaux attendus sont les plus importants lorsque les SAF sont mis en place sur des vastes surfaces, en particulier dans des zones où les pratiques agricoles sont les plus intensives et sont donc associées à des niveaux élevés d'érosion et de lixiviation de l'N (Palma, Graves, Burgess, et al., 2007).

Les SAF sont considérés comme plus efficaces dans le cycle des nutriments par rapport à de nombreux systèmes de monoculture. Cette efficacité s'explique par les avantages potentiels de la présence des arbres dans le système et leurs effets sur le sol. Les arbres, grâce à leurs systèmes racinaires supposément plus étendus et plus profonds que ceux des cultures, ont le potentiel de capturer et de recycler des quantités plus importantes d'éléments nutritifs provenant des profondeurs du sol par rapport aux racines des cultures (Nair et al., 2008). Néanmoins, le système racinaire de l'olivier est essentiellement peu profond et à développement latéral. Au-delà du premier mètre se trouve les racines permettant l'alimentation de l'arbre en cas de sécheresse (« L'olivier et l'eau », 2020).

Bien que cela n'ait pas été évalué, la présence des oliviers est susceptible de modifier le microclimat de la parcelle située sous le houppier. Cela pourrait entraîner une réduction de l'évapotranspiration des autres plantes présentes dans cette zone. Dans le cadre d'un essai de deux ans menés à l'INRAE dans le sud de la France, la dynamique des paramètres microclimatiques et l'environnement édaphique du blé dur ont été étudiés sous une coupe annuelle et une coupe non taillée des oliviers, en comparaison avec des témoins en plein soleil. Il a été enregistré une réduction du rayonnement actif photosynthétique (PAR) de 30 % et 51 % pour les deux systèmes agroforestiers respectivement, au cours du cycle du blé. Un effet tampon significatif a également été mis en évidence pour la température de l'air, en moyenne +1,7 °C la nuit et -3,2 °C pendant la journée sous l'ombrage modéré des SAF. L'effet positif des arbres sur la conservation de l'eau du sol a augmenté avec l'intensité de l'ombrage, en particulier pendant le stade critique du blé du remplissage des grains (Panozzo et al., 2022).

4 – Limites de l'études et du modèle

La compréhension des résultats peut être complexe et difficile, et la sensibilité des paramètres ainsi que la difficulté de communication des résultats sont souvent négligés (Dupraz et al., 2019). Au-delà de sa complexité générale, le modèle mécaniste Hi-sAFe présente des avantages, des inconvénients et des limites. Ces limites doivent être considérées et prises en compte dans l'interprétation des résultats.

Dans un premier temps, la teneur en CO₂ de l'atmosphère n'est pas prise en compte alors que le scénario RCP 4.5 inclue une augmentation du CO₂ atmosphérique. D'après une étude, l'exposition des oliviers à une concentration élevée de CO₂ peut avoir un effet positif sur la croissance et la physiologie des plantes (Fraga et al., 2021; Lobell et al., 2006). Dans notre contexte d'étude, la question se pose de savoir si les rendements des cultures, y compris ceux de l'olivier, augmenteront en réponse à l'augmentation du CO₂ causée par le CC, ou s'ils diminueront en raison d'autres facteurs tels que la sécheresse.

Le modèle Hi-sAFe ne prend pas en compte les pertes liées aux ravageurs. La mouche de l'olivier (*Bactrocera oleae*) est l'un des principaux bioagresseurs des oliviers, pouvant causer des dommages touchant jusqu'à 30% de la production mondiale et 100% pour certaines oliveraies. Leur attaque entraîne une altération et une diminution de la qualité des olives et de leur huile. La verticilliose (*Verticillium dahliae*) est une maladie largement répandue dans les vergers avec des jeunes arbres. Elle se manifeste principalement au printemps et se caractérise par le dessèchement soudain de rameaux entiers, pouvant parfois entraîner la mort de l'olivier (Breton & Bervillé, 2012). La prise en compte des maladies et des ravageurs de l'olivier par le modèle pourrait impacter les rendements que nous avons observés dans nos simulations.

En outre, le modèle pour l'olivier est basé à l'échelle de l'espèce d'arbre, ce qui signifie que la variété d'oliviers ne peut pas être sélectionnée individuellement et que la variabilité intra-espèce n'est pas prise en compte. L'arbre simulé est un « idéotype », or les rendements des oliviers varient beaucoup en fonction des variétés. Il est important de reconnaître que les différences de rendement ne dépendent pas seulement des conditions pédoclimatiques régionales, mais aussi des avancées technologiques, de la densité de plantation plus élevée et d'autres opérations agricoles clés. Néanmoins, des informations aussi détaillées ne sont pas actuellement disponibles pour l'étendue spatiale nécessaire à l'exécution des modèles. En effet, le bassin

méditerranéen comprend une large gamme de variétés d'oliviers, différents systèmes de culture et pratiques agronomiques (Moriondo et al., 2015, Ponti et al., 2014). Bien que ces facteurs limitent la prévision des rendements sur une zone aussi vaste, ils permettent une évaluation approfondie de l'impact du CC, car ils ne prennent en compte que le signal du CC (Fraga et al., 2021).

Le polycyclisme qui est la capacité des arbres à effectuer une deuxième expansion foliaire sur l'année si les conditions sont optimales, permet à l'olivier d'émettre une nouvelle expansion foliaire en septembre (Mezghani et al., 2007). Cependant, ce phénomène n'est pas pris en compte dans le modèle Hi-sAFe. De plus, dans Hi-sAFe, l'arbre est représenté sous forme ellipsoïdale, ce qui ne permet pas de représenter tous les aspects de l'arbre dans l'espace.

La version 4.2 de Hi-sAFe ne prend pas en charge les mélanges de cultures dans les inter-rangs d'une même parcelle (2 zones de cultures). Par conséquent, il n'est pas possible de créer un engrais vert en mélangeant des légumineuses et des semences fourragères. Cependant, dans la prochaine version (Hi-sAFe 4.3), il n'y aura plus de limitation quant au nombre de zones de cultures. Il convient également de noter que la sélection des cultures est limitée aux options disponibles sur STICS, et seules ces cultures peuvent être utilisées.

L'enherbement spontané sur la ligne des arbres et sur l'ensemble de la parcelle du TV n'est pas restitué au système malgré une fauche annuelle. Cela entraîne une perte d'informations sur les apports en N et induit un biais dans la comparaison des cycles de l'N entre les systèmes.

L'absence de fertilisation peut être une limitation du système. Le choix d'une fertilisation basée sur un engrais vert, tel que le pois d'hiver, dans nos systèmes peut limiter les rendements des cultures et des oliviers.

Enfin, Hi-sAFe est un modèle au pas de temps journalier, ce qui rend impossible la représentation des événements climatiques extrêmes qui se produisent à l'échelle de la journée, dont certains sont calculés à des pas de temps horaires (dont notamment l'impact de forte chaleur au moment de la floraison).

5 – Perspectives

Afin de compléter l'étude, il serait pertinent de relancer des simulations. Dans ces nouvelles simulations, il faudrait modifier le fichier pour l'herbe afin que la restitution de l'herbe au système soit prise en compte.

Il serait également intéressant de prendre d'autres sites pour les données climat avec le même type de sol afin d'avoir plus de répétition, car les résultats obtenus de nos simulations sont valables uniquement pour ce site d'étude.

Il faudrait comparer nos résultats avec des simulations utilisant le RCP 8.5 comme projections climatiques afin d'évaluer l'impact d'un scénario plus pessimiste sur les performances agronomiques et environnementales des SAF à base d'oliviers. Cela permettrait de déterminer si les SAF resteraient avantagés dans de telles conditions, marquées par des augmentations plus importantes des températures, une diminution des précipitations, etc. Il serait aussi nécessaire de pousser les analyses statistiques en réalisant des modèles linéaires mixtes (GLM) à la place des tests non paramétriques.

Il serait envisageable d'effectuer un changement de type de sol afin de tester l'impact du stress hydrique sur les oliviers. Par exemple, l'utilisation d'un sol de type « Costière » pourrait être considérée comme une donnée d'entrée pour le modèle en couplant avec les scénarios climatiques RCP 4.5 et 8.5. Cela permettrait d'évaluer les effets du stress hydrique sur les oliviers dans ces conditions spécifiques.

Enfin, il serait intéressant d'utiliser la nouvelle version de Hi-sAFe (4.3) dans le but de créer des systèmes plus diversifiés, et d'améliorer la rotation culturale.

V – Conclusion

Pour conclure, cette étude des simulations des SAF à base d'oliviers, réalisée en utilisant le modèle Hi-sAFe et le scénario RCP 4.5 en contexte de CC, ouvre des perspectives prometteuses. L'exploration de scénarios futurs pour les SAF apparaît particulièrement intéressante, étant donné leur fort potentiel en tant qu'outil d'atténuation des effets du CC. En effet, la modélisation offre l'avantage de s'affranchir des complexités inhérentes aux études de terrains sur les SAF. Les résultats obtenus soulignent l'importance de continuer à explorer les SAF pour faire face au réchauffement climatique.

Les SAF simulés ont mis en évidence une amélioration des performances agronomiques avec une augmentation des rendements lorsque la réserve utile en eau de la parcelle n'est pas limitée. Peu de phénomènes de stress thermique étaient observés. Les calculs de LER ont montré que les SAF étaient favorisés pour les deux périodes climatiques (actuelle et future) dans le contexte pédologique étudié. Les SAF ont également permis d'améliorer les performances environnementales en réduisant la lixiviation de l'N et le ruissellement de l'eau.

Bien qu'il soit assez difficile de tirer des conclusions définitives quant aux facteurs ayant le plus contribué à l'augmentation des rendements des oliviers, cette étude met en évidence que l'intégration de céréales et de légumineuses dans un SAF entre les rangées d'oliviers peut améliorer la rentabilité du système dans le contexte de CC. D'autres pistes de recherche restent à explorer afin de mieux comprendre l'atténuation des effets du CC sur les cultures par les SAF via la modulation du microclimat des cultures sous les oliviers et l'augmentation de la stabilité des rendements. Les rendements pour l'oliviers sous climat futur sont encourageant pour la filière, mais il faut rester prudent au vu des limites du modèle Hi-sAFe et de l'imprécision liée aux données d'entrée climatiques générées par le modèle.

Enfin, l'étude a permis d'apporter des données de modélisation sur les SAF à base d'oliviers pour la région méditerranéenne en France. Cette étude fait ressortir la nécessité de continuer les recherches sur différents scénarios climatiques, différents contextes pédoclimatiques et localisation régionale.

Bibliographie

- Barbault, N., Dupraz, C., Lauri, P. E., & Gosme, M. (2023). Parametrization of an agroforestry model : From forest trees to olive trees. *Acta Horticulturae*, 1366, 211-218. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2023.1366.24>
- Benlloch-González, M., Sánchez-Lucas, R., Benlloch, M., & Ricardo, F.-E. (2018). An approach to global warming effects on flowering and fruit set of olive trees growing under field conditions. *Scientia Horticulturae*, 240, 405-410. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.06.054>
- Bindi, M., & Olesen, J. E. (2011). The responses of agriculture in Europe to climate change. *Regional Environmental Change*, 11(1), 151-158. <https://doi.org/10.1007/s10113-010-0173-x>
- Breton, C., & Bervillé, A. (2012). *Histoire de l'olivier*. Editions Quae.
- Brisson, N., Launay, M., Mary, B., & Beaudoin, N. (2009). *Conceptual Basis, Formalisations and Parameterization of the Stics Crop Model*. Editions Quae.
- Delange, R. (2022). *Traque aux systèmes innovants à base d'oliviers dans le Sud de la France* (p. 87) [Other, INRAE Montpellier - UMR Innovation, 2 place Pierre Viala, 34000 Montpellier]. <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04049128>
- Drexler, S., Gensior, A., & Don, A. (2021). Carbon sequestration in hedgerow biomass and soil in the temperate climate zone. *Regional Environmental Change*, 21(3), 74. <https://doi.org/10.1007/s10113-021-01798-8>
- Dupraz, C., & Liagre, F. (2011). *Agroforesterie : Des arbres et des cultures Ed. 2*. Editions France Agricole.
- Dupraz, C., Wolz, K. J., Lecomte, I., Talbot, G., Vincent, G., Mulia, R., Bussière, F., Ozier-Lafontaine, H., Andrianarisoa, S., Jackson, N., Lawson, G., Dones, N., Sinoquet, H., Lusiana, B., Harja, D., Domenicano, S., Reyes, F., Gosme, M., & Van Noordwijk, M. (2019). Hi-sAFe : A 3D Agroforestry Model for Integrating Dynamic Tree–Crop Interactions. *Sustainability*, 11(8), Art. 8. <https://doi.org/10.3390/su11082293>
- Eichhorn, M. P., Paris, P., Herzog, F., Incoll, L. D., Liagre, F., Mantzanas, K., Mayus, M., Moreno, G., Papanastasis, V. P., Pilbeam, D. J., Pisanelli, A., & Dupraz, C. (2006). Silvoarable Systems in Europe – Past, Present and Future Prospects. *Agroforestry Systems*, 67(1), 29-50. <https://doi.org/10.1007/s10457-005-1111-7>
- Fagerholm, N., Torralba, M., Burgess, P. J., & Plieninger, T. (2016). A systematic map of ecosystem services assessments around European agroforestry. *Ecological Indicators*, 62, 47-65. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.11.016>
- Fraga, H., Moriondo, M., Leolini, L., & Santos, J. A. (2021). Mediterranean Olive Orchards under Climate Change : A Review of Future Impacts and Adaptation Strategies. *Agronomy*, 11(1), Art. 1. <https://doi.org/10.3390/agronomy11010056>
- Fraga, H., Pinto, J. G., Viola, F., & Santos, J. A. (2020). Climate change projections for olive yields in the Mediterranean Basin. *International Journal of Climatology*, 40(2), 769-781. <https://doi.org/10.1002/joc.6237>
- Gammans, M., M rel, P., & Ortiz-Bobea, A. (2017). Negative impacts of climate change on cereal yields : Statistical evidence from France. *Environmental Research Letters*, 12(5), 054007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa6b0c>
- Giorgi, F., & Lionello, P. (2008). Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and Planetary Change*, 63(2), 90-104. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.09.005>
- Gratsea, M., Varotsos, K. V., López-Nevado, J., López-Feria, S., & Giannakopoulos, C. (2022). Assessing the long-term impact of climate change on olive crops and olive fly in Andalusia, Spain, through climate indices and return period analysis. *Climate Services*, 28, 100325. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2022.100325>
- IPCC. (2022). *Rapport IPCC, Chapitre 7. IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf*. (s. d.). Consult  30 mai 2023,   l'adresse https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O. B., Bouwer, L. M., Braun, A., Colette, A., D qu , M., Georgievski, G., Georgopoulou, E., Gobiet, A., Menut, L., Nikulin, G., Haensler, A., Hempelmann, N., Jones, C., Keuler, K., Kovats, S., ... Yiou, P. (2014). EURO-CORDEX :

- New high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, 14(2), 563-578. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>
- Kour, D., Bakshi, P., Wali, V. K., Sharma, N., Sharma, A., & Iqbal, M. (2018). Alternate Bearing in Olive—A Review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 7(9), 2281-2297. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2018.709.283>
- Lauri, P.-E., Barkaoui, K., Ater, M., & Rosati, A. (2019). *Agroforestry for fruit trees in Europe and Mediterranean North Africa* (Europe) [Book_section]. Agroforestry for Sustainable Agriculture ; Burleigh Dodds Science Publishing. <https://doi.org/10.19103/AS.2018.0041.18>
- Lee, J.-Y., J.Marotzke, G. Bala, L. Cao, S. Corti, J.P. Dunne, F. Engelbrecht, E. Fischer, J.C. Fyfe, C. Jones, A. Maycock, J. Mutemi, O. Ndiaye, S. Panickal, and T. Zhou, 2021 : Future Global Climate : Scenario-Based Projections and Near-Term Information. In *Climate Change 2021 : The Physical Sciences Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péans, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 553-672, doi : 10.1017/9781009157896.006.
- Lionello, P., & Scarascia, L. (2018). The relation between climate change in the Mediterranean region and global warming. *Regional Environmental Change*, 18(5), 1481-1493. <https://doi.org/10.1007/s10113-018-1290-1>
- Lobell, D. B., Field, C. B., Cahill, K. N., & Bonfils, C. (2006). Impacts of future climate change on California perennial crop yields : Model projections with climate and crop uncertainties. *Agricultural and Forest Meteorology*, 141(2), 208-218. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.10.006>
- Lobell, D. B., & Gourdj, S. M. (2012). The Influence of Climate Change on Global Crop Productivity. *Plant Physiology*, 160(4), 1686-1697. <https://doi.org/10.1104/pp.112.208298>
- L'olivier et l'eau. (2020). *FRANCE OLIVE - AFIDOL*. <https://afidol.org/oleiculteur/lolivier-et-leau/>
- Loumou, A., & Giourga, C. (2003). Olive groves : ``The life and identity of the Mediterranean''. *Agriculture and Human Values*, 20(1), 87-95. <https://doi.org/10.1023/A:1022444005336>
- Luedeling, E., Smethurst, P. J., Baudron, F., Bayala, J., Huth, N. I., van Noordwijk, M., Ong, C. K., Mulia, R., Lusiana, B., Muthuri, C., & Sinclair, F. L. (2016). Field-scale modeling of tree–crop interactions : Challenges and development needs. *Agricultural Systems*, 142, 51-69. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2015.11.005>
- Masmoudi Charfi, C., & Habaieb, H. (2017). *Utilisation des fonctions de répartition de la pluie pour la détermination des besoins en eau d'irrigation de l'olivier (Olea europaea L.) Présentation des Fiches d'aide à la décision par région de culture de l'olivier*.
- Mead, R., & Willey, R. W. (1980). The Concept of a 'Land Equivalent Ratio' and Advantages in Yields from Intercropping. *Experimental Agriculture*, 16(3), 217-228. <https://doi.org/10.1017/S0014479700010978>
- Mezghani, M. A., Sahli, A., & Jebari, A. (2007). Analyse et modélisation de la croissance végétative chez l'olivier (*Olea europaea* L.) en conditions pluviales. *Fruits*, 62(1), 45-56. <https://doi.org/10.1051/fruits:2006048>
- Mistry, M. N., Wing, I. S., & Cian, E. D. (2017). Simulated vs. empirical weather responsiveness of crop yields : US evidence and implications for the agricultural impacts of climate change. *Environmental Research Letters*, 12(7), 075007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa788c>
- Moriondo, M., Trombi, G., Ferrise, R., Brandani, G., Dibari, C., Ammann, C., Mariotti Lippi, M., & Bindi, M. (2013). Olive trees as bio-indicators of climate evolution in the Mediterranean Basin. *Global Ecology and Biogeography*, 22. <https://doi.org/10.1111/geb.12061>
- Nair, P. K. R., Gordon, A. M., & Rosa Mosquera-Losada, M. (2008). Agroforestry. In S. E. Jørgensen & B. D. Fath (Éds.), *Encyclopedia of Ecology* (p. 101-110). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-008045405-4.00038-0>
- Palma, J.H.N. Clipick : Base de données du projet de données climatiques simulées paneuropéennes pour l'utilisation de modèles par défaut. 2015. Disponible en ligne : <http://home.isa.utl.pt/~joaopalma/projects/agforward/clipick/> (consulté le 2 février 2023)

- Palma, J. H. N. (2017). CliPick – Climate change web picker. A tool bridging daily climate needs in process based modelling in forestry and agriculture. *Forest Systems*, 26(1), Art. 1. <https://doi.org/10.5424/fs/2017261-10251>
- Palma, J. H. N., Graves, A. R., Bunce, R. G. H., Burgess, P. J., de Filippi, R., Keesman, K. J., van Keulen, H., Liagre, F., Mayus, M., Moreno, G., Reisner, Y., & Herzog, F. (2007). Modeling environmental benefits of silvoarable agroforestry in Europe. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 119(3), 320-334. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.07.021>
- Palma, J. H. N., Graves, A. R., Burgess, P. J., Keesman, K. J., van Keulen, H., Mayus, M., Reisner, Y., & Herzog, F. (2007). Methodological approach for the assessment of environmental effects of agroforestry at the landscape scale. *Ecological Engineering*, 29(4), 450-462. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.09.016>
- Panozzo, A., Bernazeau, B., & Desclaux, D. (2020). Durum wheat in organic olive orchard : Good deal for the farmers? *Agroforestry Systems*, 94(3), 707-717. <https://doi.org/10.1007/s10457-019-00441-0>
- Panozzo, A., Huang, H.-Y., Bernazeau, B., Meunier, F., Turc, O., Duponnois, R., Prin, Y., Vamerali, T., & Desclaux, D. (2022). Impact of Olive Trees on the Microclimatic and Edaphic Environment of the Understorey Durum Wheat in an Alley Orchard of the Mediterranean Area. *Agronomy*, 12(2), Art. 2. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020527>
- Papanastasis, V., Mantzanas, K., Dini-Papanastasi, O., & Ispikoudis, I. (2008). Traditional Agroforestry Systems and Their Evolution in Greece. In *Advances in Agroforestry* (Vol. 6, p. 89-109). https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8272-6_5
- Reyes, F., Gosme, M., Wolz, K. J., Lecomte, I., & Dupraz, C. (2021). Alley Cropping Mitigates the Impacts of Climate Change on a Wheat Crop in a Mediterranean Environment : A Biophysical Model-Based Assessment. *Agriculture*, 11(4), Art. 4. <https://doi.org/10.3390/agriculture11040356>
- Rosati, A., Borek, R., & Canali, S. (2021). Agroforestry and organic agriculture. *Agroforestry Systems*, 95(5), 805-821. <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00559-6>
- Sinclair, F. L. (1999). A general classification of agroforestry practice. *Agroforestry Systems*, 46(2), 161-180. <https://doi.org/10.1023/A:1006278928088>
- Sollen-Norrlin, M., Ghaley, B. B., & Rintoul, N. L. J. (2020). Agroforestry Benefits and Challenges for Adoption in Europe and Beyond. *Sustainability*, 12(17), Art. 17. <https://doi.org/10.3390/su12177001>
- Solomou, A. D., & Sfougaris, A. I. (2015). Bird community characteristics as indicators of sustainable management in olive grove ecosystems of Central Greece. *Journal of Natural History*, 49(5-8), 301-325. <https://doi.org/10.1080/00222933.2014.987839>
- Temani, F., Bouaziz, A., Daoui, K., Wery, J., & Barkaoui, K. (2021). Olive agroforestry can improve land productivity even under low water availability in the South Mediterranean. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 307, 107234. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107234>
- Vanwallegem, T., Infante-Amate, J., Molina, M., Soto Fernández, D., & Gómez, J. (2011). Quantifying the effect of historical soil management on soil erosion rates in Mediterranean olive orchards. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 142, 341-351. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.06.003>
- Vautard, R., Gobiet, A., Sobolowski, S., Kjellström, E., Stegehuis, A., Watkiss, P., Mendlik, T., Landgren, O., Nikulin, G., Teichmann, C., & Jacob, D. (2014). The European climate under a 2 °C global warming. *Environmental Research Letters*, 9(3), 034006. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/3/034006>

Annexes :

La modélisation de systèmes agroforestiers

Les modèles agronomiques sont souvent utilisés pour soutenir des décisions concernant la gestion des systèmes de production alimentaire. Ils servent à un large éventail d'objectifs, y compris la planification de la gestion quotidienne des activités agricoles et la projection des impacts du CC sur la sécurité alimentaire. Les principaux objectifs de ces modèles sont de synthétiser l'information expérimentale et conceptuelle sur la façon dont les composants du système interagissent dans les systèmes agricoles; d'identifier et hiérarchiser les lacunes dans les connaissances et tester, par des « expérimentations virtuelles », l'effet d'un grand nombre de facteurs en interaction tels que le sol, le climat, les espèces et la gestion, qui sont trop nombreux pour être étudiés empiriquement (Luedeling et al., 2016).

Les modèles numériques sont avantageux pour des travaux de recherches sur des pas de temps long, comme dans le cas d'études du CC. Ils deviennent des outils essentiels pour effectuer des expériences *in silico*, y compris éventuellement une certaine randomisation dans les entrées pour obtenir des résultats de simulation répliqués et analyser les effets possibles de CC sur les systèmes. Les modèles basés sur ces processus peuvent également permettre d'évaluer les relations de facilitation et de complémentarité entre les plantes en intégrant les interactions des plantes aux conditions microclimatiques et à la disponibilité des ressources. Plusieurs modèles et familles de modèles agroforestiers ont été développés (SCUAF, HyPAR, Hi-SAFE/Yield-SAFE et WaNuLCAS) (Luedeling et al., 2016) et variés par leur portée et leur complexité (Reyes et al., 2021). Cependant, les interactions entre les arbres et les cultures sont rarement incluses dans les efforts de modélisation évaluant l'impact du CC. La complexité des interactions dans les SAF dans l'espace et dans le temps rend difficile le développement de modèles. Les modèles SAF doivent pouvoir simuler : les systèmes à travers les environnements pédoclimatiques et les régimes de gestion ; les interactions aériennes et souterraines pour la lumière, l'eau et les nutriments ; les multiples rendements possibles ; et les services écosystémiques tels que la capture des nutriments en excès, l'érosion des sols et la séquestration du carbone (Dupraz et al., 2019). Le modèle Hi-sAFe a été spécifiquement conçu pour représenter des parcelles AF, en tenant compte simultanément de l'utilisation des ressources (lumière, eau et N) par les arbres et les cultures et des effets microclimatiques hétérogènes des arbres sur les cultures (Reyes et al., 2021).

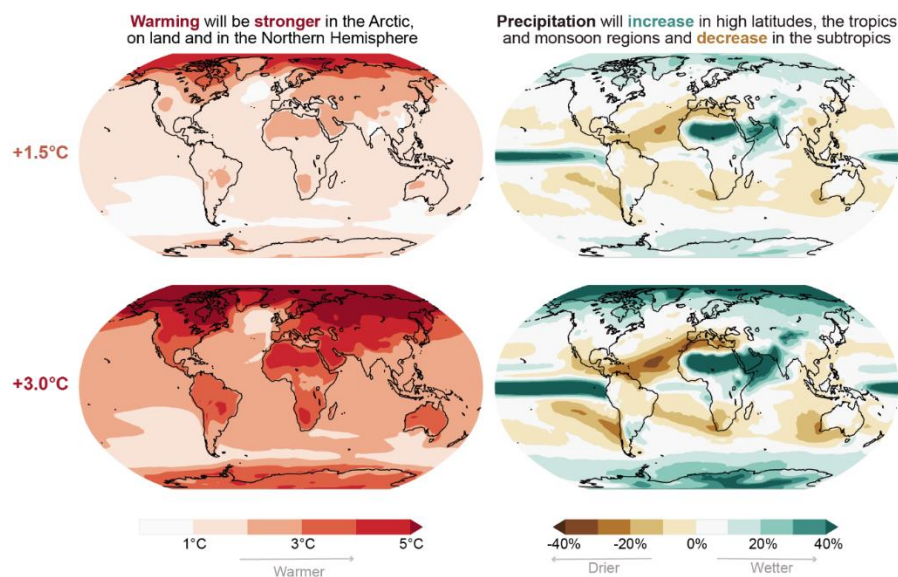
Des travaux de modélisation avec le modèle Hi-sAFe dans la même région ont été réalisés en 2021. Cette étude avait pour but d'évaluer l'influence d'un système de culture en allée en termes de conditions de croissance des cultures, par rapport au CC en milieu méditerranéen. Le système était composé de noyers en combinaison avec une culture de blé dur qui est un mélange potentiellement adapté, compte tenu de la complémentarité en phénologie et de l'utilisation de la lumière des deux espèces. Les simulations ont montré que la complémentarité pour la lumière était élevée entre les noyers hybrides et le blé d'hiver cultivé dans le sud de la France, et avait entraîné une réduction limitée du rendement en blé jusqu'à ce que les arbres atteignent une certaine taille. Le CC avait augmenté le rendement en blé en monoculture pour le site d'étude, en raison d'un gel plus faible ou de températures de l'air sous-optimales moins froides en hiver et au début du printemps. Pour les SAF, les noyers ont atténué de nombreux stress biophysiques importants pour les cultures, ce qui a entraîné un rendement en blé plus stable que pour le blé en monoculture (Reyes et al., 2021).

Aucun modèle n'a été trouvé dans la littérature pour simuler des SAF incluant des arbres fruitiers. Le modèle Hi-sAFe n'était pas adapté, car paramétré que pour trois espèces d'arbres forestiers (les peupliers, les noyers hybrides et les cerisiers sauvages) et non pour les arbres fruitiers comme l'olivier, dont l'équilibre entre les organes végétatifs et les organes fructifères est crucial. L'ajout des arbres fruitiers au modèle est récent (calibré et vérifié en début d'année 2023) et deux adaptations principales ont été apportées au modèle pour simuler les systèmes agroforestiers à base d'olivier : l'ajout d'un module « fruits » (allocation de carbone, stress, etc.) et l'adaptation de la phénologie aux arbres à feuilles persistants (Barbault et al., 2023).

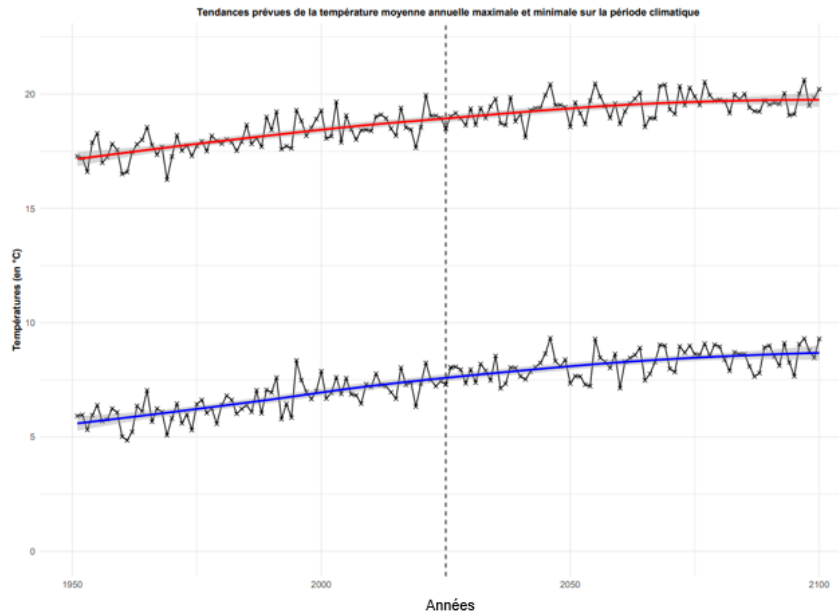
Une calibration et des vérifications du modèle ont été effectuée pour l'olivier. Dès lors vérifier, le modèle adapté aux oliviers peut être utilisé pour tester et évaluer différents systèmes agroforestiers à base d'oliviers. Certains systèmes ont été co-construits lors d'un atelier de co-conception qui a réuni différents acteurs de la filière (oléiculteurs, conseillers agricoles, chercheurs). L'objectif est d'évaluer la durabilité d'un système agroforestier à base d'oliviers à l'aide des projections climatiques du GIEC (Barbault et al., 2023).

FAQ 4.3: Climate change and regional patterns

Climate change is not uniform and proportional to the level of global warming.

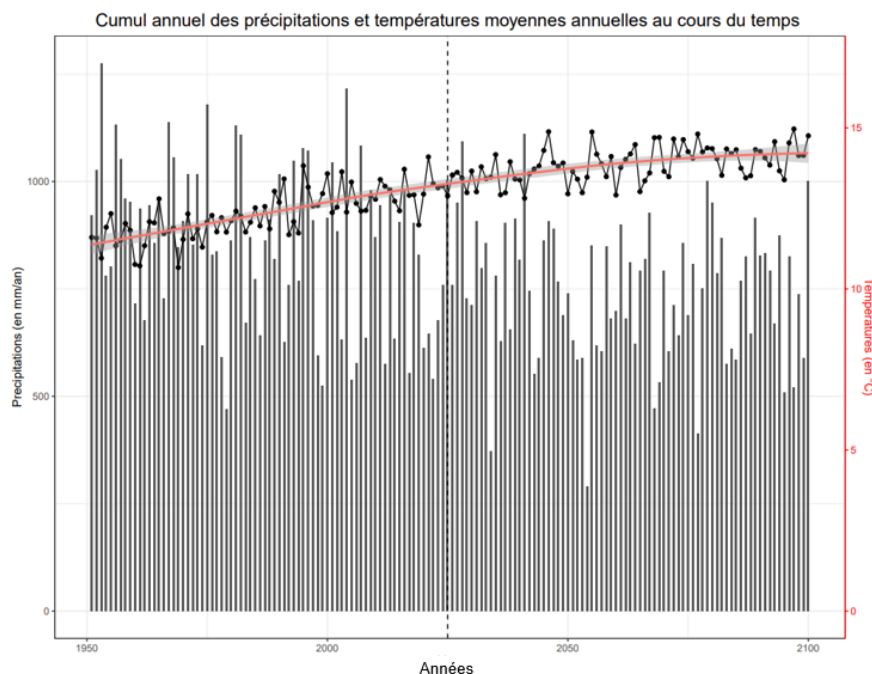


Annexe 1 : Les changements régionaux de température (à gauche) et de précipitations (à droite) sont proportionnels au niveau de réchauffement climatique, quel que soit le scénario qui permet d'atteindre ce niveau de réchauffement. Le réchauffement de la surface et le changement des précipitations sont indiqués par rapport au climat de 1850-1900, et pour des périodes au cours desquelles le réchauffement de la surface en moyenne mondiale est de 1,5°C (en haut) et de 3°C (en bas), respectivement. Les changements présentés ici sont basés sur 31 modèles CMIP6 utilisant le scénario à fortes émissions SSP3-7.0 (Lee et al., 2021)



Annexe 2 : Tendances prévues de la température annuelle, maximale et minimale au cours de la période simulée. Moyenne de la température relatives journalières minimales et maximales. La ligne en pointillée verticale sépare le temps en périodes correspondant aux périodes climatiques simulées. Les discontinuités entre les périodes sont dues au fait que les moyennes mobiles sont appliquées à des séries individuelles de 75 ans. Les lignes verticales de la régression linéaire représentent l'intervalle de confiance de 95 %.

Augmentation globale de $2,69^{\circ}\text{C}$ (pente = $0,0181$) pour les températures moyennes maximales et pour les températures moyennes minimales : $+3,27^{\circ}\text{C}$ (pente = $0,0219$).



Annexe 3 : Tendances prévues de la température annuelle moyenne (en $^{\circ}\text{C}$) et cumul pluviométrique annuel (en mm/an) au cours de la période simulée. La ligne en pointillée verticale sépare le temps en périodes correspondant aux périodes climatiques simulées. L'axe noir pour les valeurs des précipitations et l'axe en rouge pour les valeurs des températures.

Phases	Périodes	Cultures	P-value	Influence du système	Test
Juvénile	Climat actuel lointain	Olives	0,99	Non	Kruskal
Juvénile	Climat futur proche	Olives	0,93	Non	Kruskal
Mature	Climat actuel proche	Olives	$4,9 \cdot 10^{-8}$ ***	Oui	Anova
Mature	Climat futur lointain	Olives	$2,53 \cdot 10^{-12}$ ***	Oui	Kruskal

Annexe 4 : Tableau regroupant les résultats des tests statistiques de l'étude du rendement des oliviers en fonction du système pour une période climatique donnée. Le seuil de significativité est de 0,05.

Phases	Périodes	Cultures	Comparaison systèmes	P-value	Test
Mature	Climat actuel proche	Olives	Témoin verger – AF forte densité	0,91	TukeyHSD
Mature	Climat actuel proche	Olives	Témoin verger – AF faible densité	$2,1 \cdot 10^{-5}$ ***	TukeyHSD
Mature	Climat actuel proche	Olives	AF forte densité – AF faible densité	$4 \cdot 10^{-6}$ ***	TukeyHSD
Mature	Climat futur lointain	Olives	Témoin verger – AF forte densité	0,84	Dunn
Mature	Climat futur lointain	Olives	Témoin verger – AF faible densité	$2,17 \cdot 10^{-11}$ ***	Dunn
Mature	Climat futur lointain	Olives	AF forte densité – AF faible densité	$5,25 \cdot 10^{-8}$ ***	Dunn

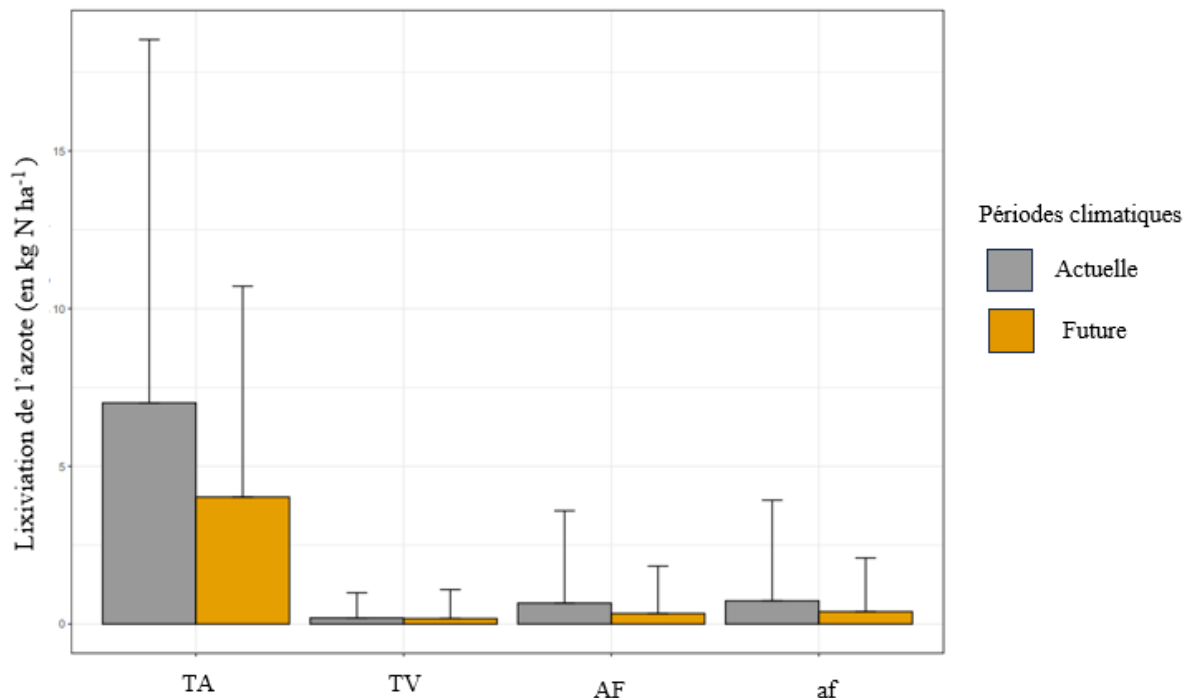
Annexe 5 : Tableau regroupant les résultats des tests post-hoc effectués pour les résultats significatifs de l'annexe 4. Comparaison deux à deux des systèmes à l'aide des tests de Tukey et de Dunn, seuil de significativité à 0,05.

Phases	Périodes	Cultures	P-value	Influence du système	Test
Juvénile	Climat actuel lointain	Pois d'hiver	0,53	Non	Anova
Juvénile	Climat futur proche	Pois d'hiver	0,94	Non	Anova
Mature	Climat actuel proche	Pois d'hiver	0,85	Non	Kruskall
Mature	Climat futur lointain	Pois d'hiver	0,52	Non	Kruskall
Juvénile	Climat actuel lointain	Blé dur	0,50	Non	Kruskall
Juvénile	Climat futur proche	Blé dur	0,53	Non	Kruskall
Mature	Climat actuel proche	Blé dur	0,47	Non	Kruskall
Mature	Climat futur lointain	Blé dur	0,57	Non	Kruskall
Juvénile	Climat actuel lointain	Orge d'hiver	0,36	Non	Anova
Juvénile	Climat futur proche	Orge d'hiver	0,49	Non	Kruskall
Mature	Climat actuel proche	Orge d'hiver	0,007 **	Oui	Anova
Mature	Climat futur lointain	Orge d'hiver	0,02 *	Oui	Anova

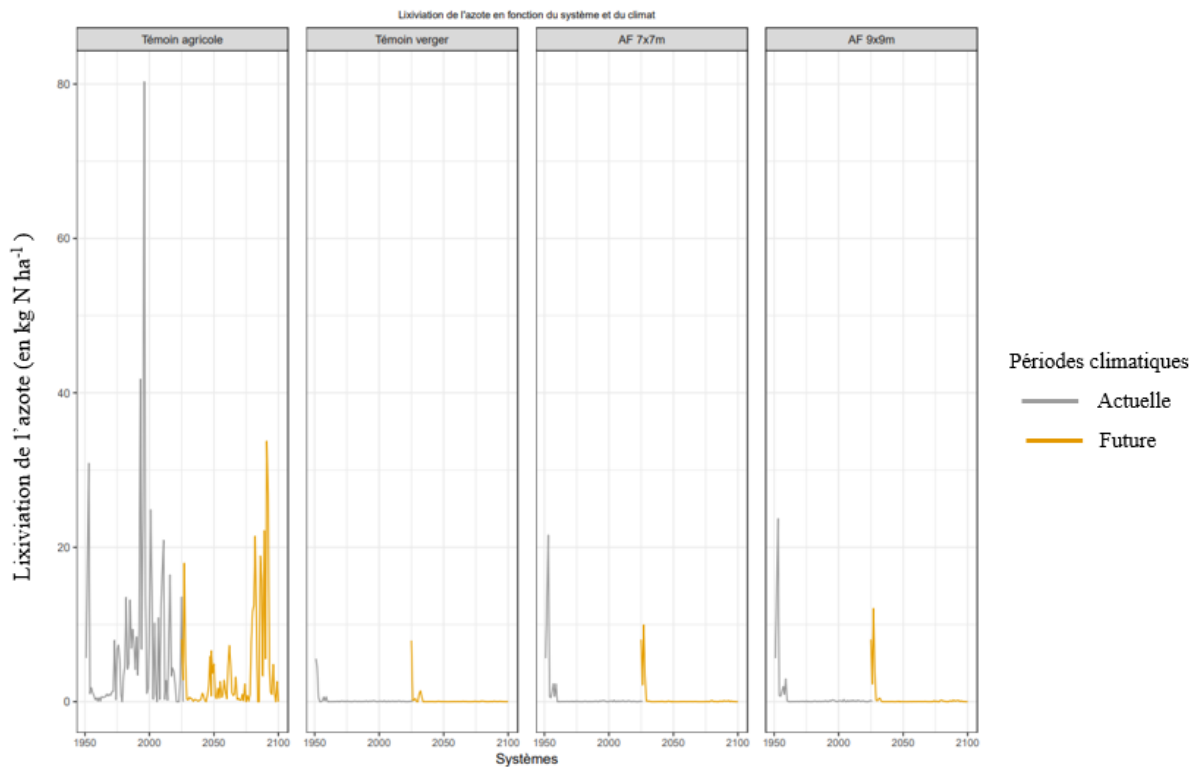
Annexe 6 : Tableau regroupant les résultats des tests statistiques de l'étude du rendement de chaque culture en fonction du système pour une période climatique donnée. Le seuil de significativité est de 0,05.

Phases	Périodes	Cultures	Comparaison systèmes	P-value	Test
Mature	Climat actuel proche	Orge d'hiver	TV – AF	0,007 **	TukeyHSD
Mature	Climat actuel proche	Orge d'hiver	TV – af	0,04 *	TukeyHSD
Mature	Climat actuel proche	Orge d'hiver	AF – af	0,007 **	TukeyHSD
Mature	Climat futur lointain	Orge d'hiver	TV – AF	0,03 *	TukeyHSD
Mature	Climat futur lointain	Orge d'hiver	TV – af	0,06	TukeyHSD
Mature	Climat futur lointain	Orge d'hiver	AF – af	0,93	TukeyHSD

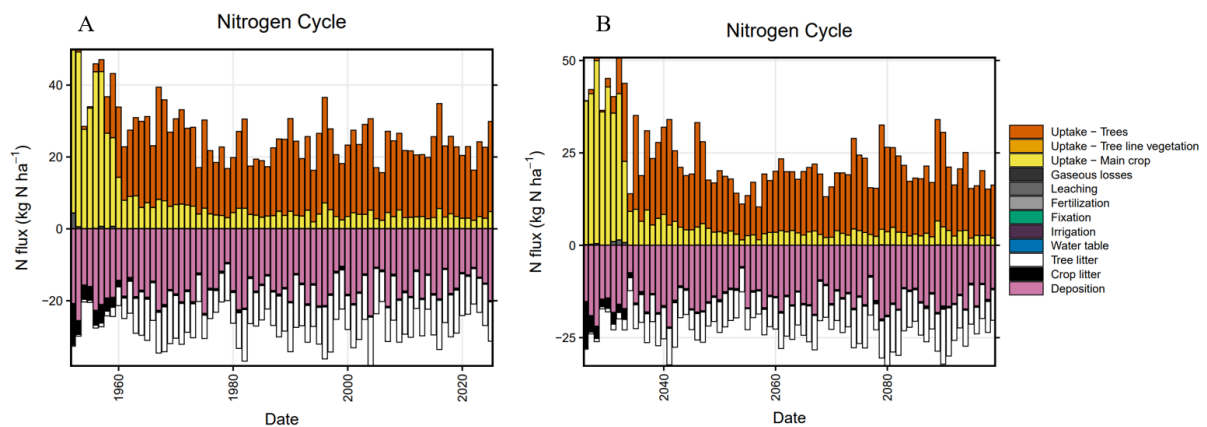
Annexe 7 : Tableau regroupant les résultats des tests post-hoc (TukeyHSD) pour les modalités ayant des différences significatives pour l'analyse des variances du rendement des cultures en fonction des systèmes.



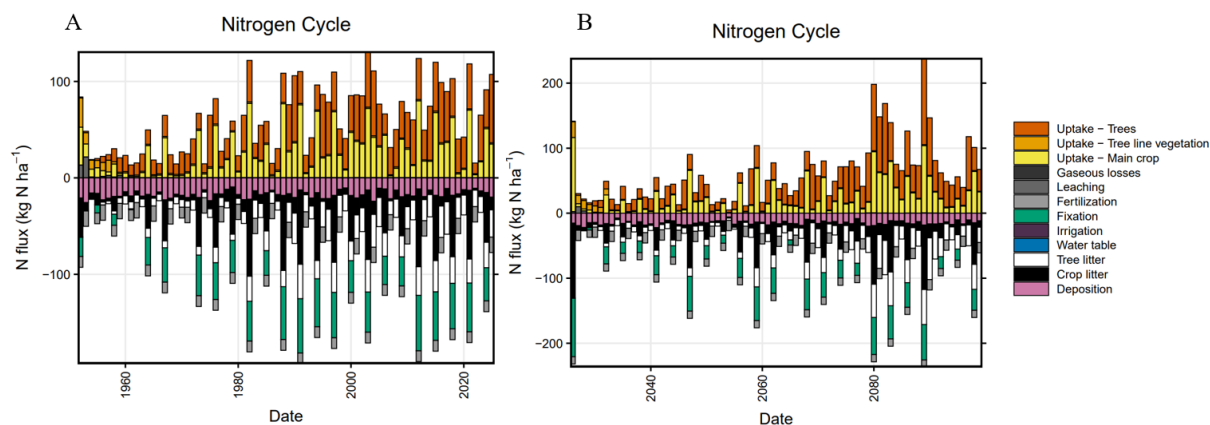
Annexe 8 : Représentation graphique en barplot de la lixiviation moyenne annuelle de l'azote (en kg N ha⁻¹) en fonction des systèmes et de la période climatique. Les barres d'erreurs représentent l'écart-type. Densité de plantation des oliviers : monocrop (204 arbres ha⁻¹), Agroforestry (204 arbres ha⁻¹) et agroforesterie (123 arbres ha⁻¹).



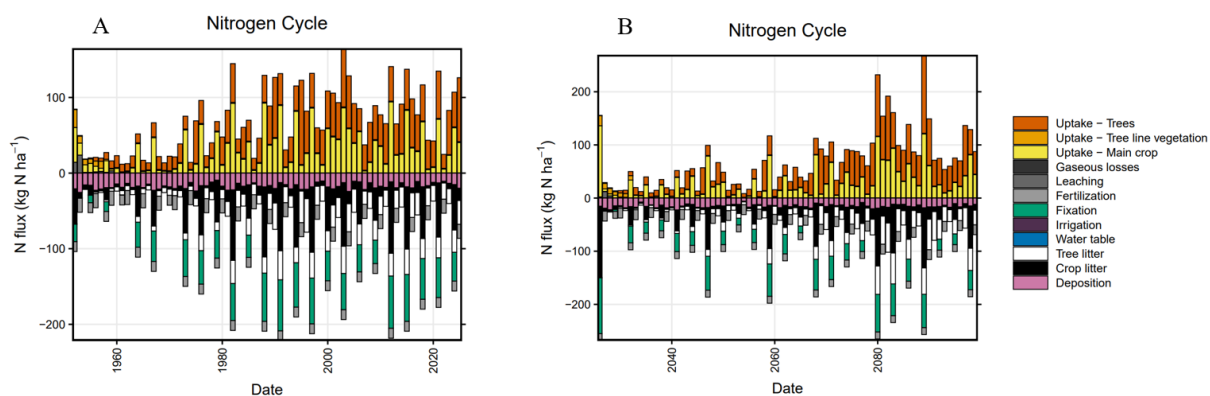
Annexes 9 : Représentation graphique de la lixiviation de l'azote (en kg N ha^{-1}) au cours du temps pour chaque système avec en gris la période climatique actuelle et en orange la période climatique futur. Densité de plantation des oliviers : monocrop ($204 \text{ arbres ha}^{-1}$), Agroforestry ($204 \text{ arbres ha}^{-1}$) et agroforestry ($123 \text{ arbres ha}^{-1}$).



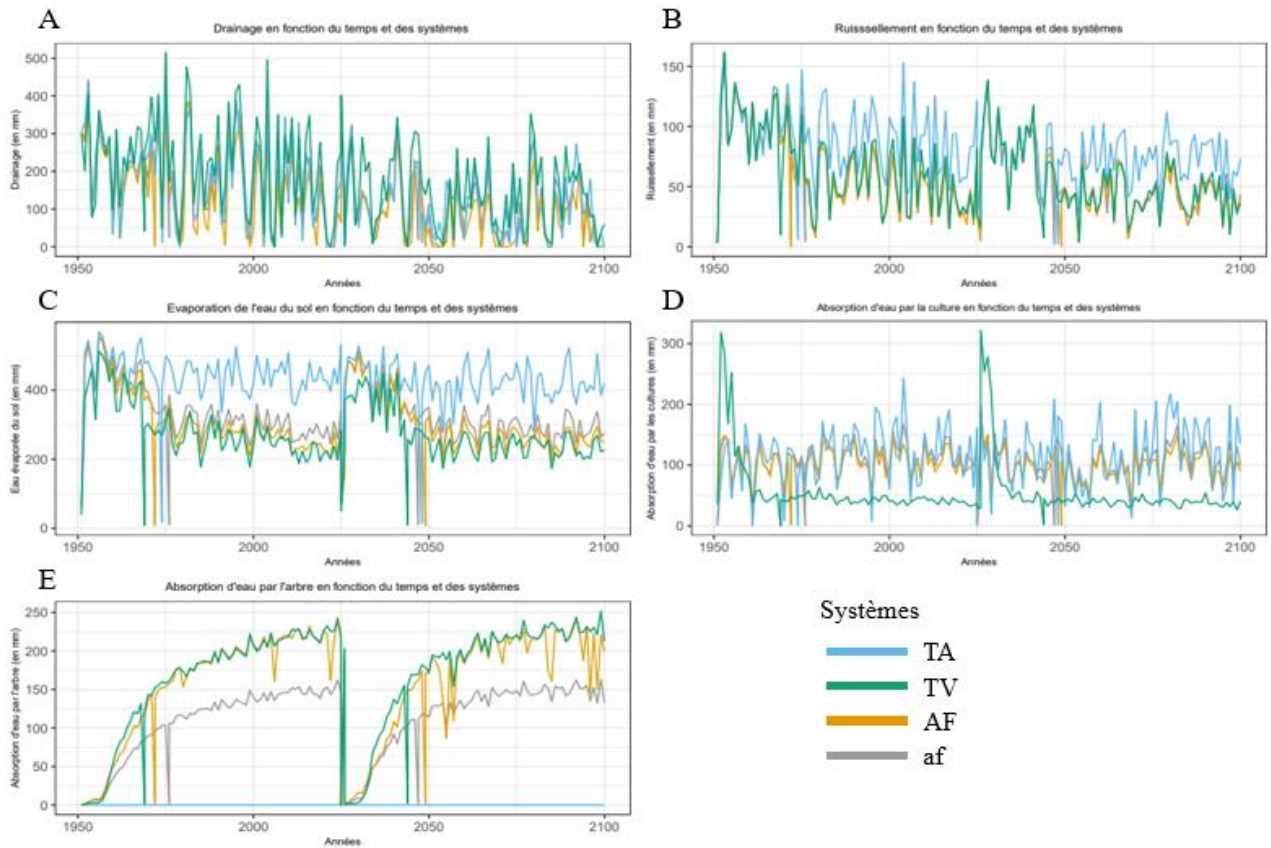
Annexe 10 : Dynamique d'évolution du cycle de l'azote pour le témoin verger (TV) densité de plantation 7x7 m, A pour la période climatique actuelle (1951-2025) et B pour la période climatique future (2025-2100)



Annexe 11 : Dynamique d'évolution du cycle de l'azote pour le SAF forte densité de plantation 7x7 m, en A pour la période climatique actuelle (1951-2025) et en B pour la période climatique future (2025-2100).



Annexe 12 : Dynamique d'évolution du cycle de l'azote pour le SAF faible densité de plantation 9x9 m, en A pour la période climatique actuelle (1951-2025) et en B pour la période climatique future (2025-2100)



Annexe 13 : Dynamique d'évolution de chaque variable du bilan hydrique (en mm) au cours du temps et en fonction des systèmes.


A – Dynamique d'évolution du drainage dans le temps en fonction des différents systèmes de culture.

B – Dynamique du ruissellement (en mm) dans le temps en fonction des différents systèmes de cultures

C – Dynamique de l'évaporation de l'eau du sol dans le temps en fonction des différents systèmes de cultures

D – Dynamique de l'absorption de l'eau par les cultures dans le temps en fonction des différents systèmes de cultures

E – Dynamique de l'absorption de l'eau par l'arbre dans le temps en fonction des différents systèmes de cultures

	Diplôme et Mention : Master Biologie, Agrosociétés Parcours : Amélioration, Production et Valorisation du Végétal Option : Fonctionnement et Gestion des Agrosystèmes Responsable d'option : M. Carof
Auteur(s) : Nolwenn Poulaillon Date de naissance* : 14/04/2000	Organisme d'accueil : UMR ABSys Adresse : L'Institut Agro Montpellier UMR ABSys - Bât 27 2 place Viala 34060 Montpellier Cedex 2 France
Nb pages : 25 Annexe(s) : 13	Maîtres de stage : Nicolas Barbault Marie Gosme
Année de soutenance : 2023	
Titre français : Evaluation par la modélisation des performances agronomiques et environnementales de systèmes agroforestiers à base d'oliviers en contexte de changement climatique Titre anglais : Model-based evaluation of the agronomic and environmental performance of olive-based agroforestry systems in a climate change context. Case study in mediterranean region (Montpellier, France)	
<p>Résumé : L'olivier est une culture emblématique du pourtour méditerranéen dont l'intensification des systèmes entraîne des répercussions sur l'environnement, notamment l'érosion des sols et la perte de biodiversité. La région méditerranéenne a été identifiée par le GIEC comme une zone sensible au changement climatique, la production d'olives pourrait être soumise à des conditions climatiques défavorables liées à de faibles précipitations et à des températures plus élevées. Les systèmes agroforestiers (SAF) peuvent être une solution d'atténuation du changement climatique. L'étude par la modélisation à l'aide du modèle Hi-sAFe a permis de simuler le scénario climatique médian RCP 4.5 sur une longue période (150 ans). Les SAF simulés sont des oliviers en allées avec sur l'inter rang une rotation triennale de cultures d'hiver. Les résultats des simulations ont mis en évidence un avantage de l'agroforesterie sous climat futur à l'aide du Land Equivalent Ratio (LER) (avec une augmentation des rendements en olives pour la période climatique future (2025-2100) par rapport à la période climatique actuelle (1951-2025)). Les SAF ont également permis d'améliorer certaines performances environnementales en réduisant la lixiviation de l'azote et le ruissellement de l'eau. Bien que présentant des limites et des incertitudes, cette étude met en évidence l'avantage des performances agronomiques et environnementales des SAF par rapport aux systèmes oléicoles traditionnels.</p>	
<p>Abstract : Olive tree is an emblematic crop of the Mediterranean region and the intensification of its systems is having repercussions on the environment, particularly in terms of soil erosion and loss of biodiversity. The Mediterranean region has been identified by the IPCC as an area sensitive to climate change, and olive production could be subject to unfavorable climatic conditions linked to low rainfall, and higher temperatures. Agroforestry systems (AFS) could be a solution for mitigating climate change. The Hi-sAFe model was used to simulate the median RCP 4.5 climate scenario over a long period (150 years). The AFS simulated were alley cropping of rotation of winter crops with olive trees and grass along the tree lines. Simulation results showed an advantage for AFS under future climate using the Land Equivalent Ratio (LER) (with an increase in olive yields for the future climate period (2025-2100) compared with the current climate period (1951-2025)). AFS has also improved environmental performance by reducing nitrogen leaching and water runoff. Although presenting limitations, this study highlights the agronomic and environmental performance advantages of AFS over traditional olive orchard.</p>	
Mots-clés : Changement climatique, cultures intercalaires, expérimentations virtuelles, Land Equivalent Ratio, modèle mécaniste, oliveraies, performances environnementales	
Key Words : Alley cropping, climate change, environmental performances, Land equivalent ratio, mechanistic model, olive orchard, virtual experiment	