



HAL
open science

Risques et opportunités liés à la double culture dans le Sud-Ouest de la France

Philippe Debaeke, Mathieu Abella, Julie Constantin, Nicolas Ferrand, Julie Pitchers, Manon Pull, Gilles Tison, Apolline Duchalais, Jay Ram Lamichhane, Clément Lemouzy, et al.

► To cite this version:

Philippe Debaeke, Mathieu Abella, Julie Constantin, Nicolas Ferrand, Julie Pitchers, et al.. Risques et opportunités liés à la double culture dans le Sud-Ouest de la France. *Innovations Agronomiques*, 2024, 94, pp.212-228. 10.17180/ciag-2024-vol94-art14 . hal-04595935

HAL Id: hal-04595935

<https://hal.inrae.fr/hal-04595935>

Submitted on 31 May 2024

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

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



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



Risques et opportunités liés à la double culture dans le Sud-Ouest de la France

Philippe DEBAEKE^{1*}, Mathieu ABELLA², Julie CONSTANTIN¹, Nicolas FERRAND³, Julie PITCHERS⁴, Manon PULL⁴, Gilles TISON⁵, Apolline DUCHALAIS¹, Jay Ram LAMICHHANE¹, Clément LEMOUZY⁵, Franck MICHEL³, Lionel ALLETTO^{1,4}, Pierre GOULARD⁴, Mélanie LOBIETTI⁴, Sébastien MINETTE³

¹ INRAE, Unité Mixte de Recherche AGroécologie – Innovations - teRritoires, 31326 Castanet-Tolosan, France

² Terres Inovia, 31450 Baziège, France

³ Chambre Régionale d'Agriculture Nouvelle-Aquitaine, 86550 Mignaloux-Beauvoir, France

⁴ Chambre Régionale d'Agriculture d'Occitanie, 31321 Castanet-Tolosan, France

⁵ INRAE, Unité Expérimentale d'AgroEcologie et de Phénotypage des Cultures, 31326 Castanet-Tolosan, France

*Correspondance : philippe.debaeke@inrae.fr

Résumé

La pratique d'une deuxième culture dans l'année, soit à la suite d'une récolte en début d'été (culture dérobée), soit par semis dans la culture primaire (culture en relais), permet une production supplémentaire, qu'elle soit destinée à l'alimentation animale ou humaine ou à vocation énergétique. Cette pratique de double culture peut générer un revenu supplémentaire tout en fournissant des services de soutien et de régulation. En tant que telle, elle peut être considérée comme une forme d'agriculture écologiquement intensive, mais aussi comme une opportunité offerte par le changement climatique. Le processus de prise de décision aboutissant à la double culture repose sur de nombreux facteurs liés aux conditions pédoclimatiques, mais aussi à l'espérance de gain et à la perception du risque. Le projet CASDAR "3C2A : Trois cultures en deux ans" (2019-2023) qui a regroupé 15 partenaires (*agriculteurs, conseillers de chambres d'agriculture, ingénieurs d'instituts techniques, chercheurs*) s'est efforcé de créer des références utiles pour la double culture dans le Sud-Ouest de la France, englobant les régions Nouvelle-Aquitaine et Occitanie. Cet article vise à illustrer l'intérêt potentiel du soja et du tournesol en tant que doubles cultures dans le Sud-Ouest de la France par une analyse qualitative des perceptions des agriculteurs sur les risques et les opportunités de cette pratique, complétée par une évaluation sur 4 ans des performances agronomiques et économiques de la double culture chez les agriculteurs (130 parcelles) ainsi qu'en station expérimentale où des gammes variétales ont été comparées pendant 3 ans. Avec l'appui de la simulation agronomique (SPA¹, STICS²), il a été possible d'évaluer la robustesse des conclusions (faisabilité, productivité) sur des séquences climatiques plus longues, pour des pédoclimats et des conduites culturales non expérimentées, et pour des scénarios de changement climatique, mais aussi d'apprécier les impacts environnementaux (besoins en eau, drainage, lixiviation du nitrate) des cultures dérobées dans le Sud-Ouest.

Mots-clés: rendement, marge semi-nette, changement climatique, irrigation, expérimentation à la ferme

¹ SPA : Simple Photothermal Algorithm, modèle de phénologie (Schoving *et al.*, 2020).

² STICS : Simulateur mulTidisciplinaire pour les Cultures Standard, modèle permettant de simuler le système sol-plante-atmosphère (Brisson *et al.*, 2008).



Abstract: Risks and opportunities of double cropping in south-western France

Growing a second crop in a year, either following an early summer harvest (catch crop) or by sowing into the previous autumn-sown crop (relay crop), enables additional production, whether for feed, food or energy purposes. This practice of double cropping can generate additional income while providing support and regulation services. As such, it can be seen as an ecologically intensive form of agriculture, but also as an opportunity offered by climate change. The decision-making process leading to double cropping is based on a number of factors linked to soil and climatic conditions, but also to the expectation of gain and the perception of risk. The CASDAR project "3C2A: Three crops in two years" (2019-2023), which gathered 15 partners (farmers, advisors from chambers of agriculture, engineers from technical institutes, researchers), was set up to create useful references for double cropping in south-western France, encompassing the regions of Nouvelle-Aquitaine and Occitanie. The aim of this article is to illustrate the potential interest of soybean and sunflower as second crops in south-western France by means of a qualitative analysis of farmers' perceptions of the risks and opportunities of this practice, enriched by a 4-year on-farm assessment of the agronomic and economic performances of double cropping (130 fields) and at the experimental station, where a range of varieties were compared over a 3-year period. With the support of agronomic simulation (SPA¹, STICS²), it was possible to assess the robustness of the conclusions (feasibility, productivity) over longer climatic sequences, for unexperimented soils, climates and cropping practices, and for climate change scenarios. It was also possible to assess the environmental impacts (water requirements, drainage, nitrate leaching) of catch crops in the South-West.

Keywords: yield, semi-net margin, climate change, irrigation, on-farm experiments

1. Introduction

Le réchauffement climatique, la dégradation des sols et l'épuisement des ressources naturelles menacent conjointement la productivité des cultures et la durabilité environnementale de l'agriculture. C'est dans ce contexte qu'ont été élaborées les notions d'agriculture « écologiquement intensive » et de systèmes agricoles résilients "fondés sur la biodiversité", en vue de contribuer à (re)générer des services écosystémiques et de limiter les externalités négatives liées à la production agricole (Bonny, 2010 ; Ghali *et al.*, 2014 ; Tittonell, 2014). Pour ce faire, il est nécessaire d'accroître la biodiversité cultivée à l'échelle du champ, de l'exploitation et du paysage, par exemple par la diversification des cultures dans l'espace et dans le temps (Lithourgidis *et al.*, 2011 ; Duru *et al.*, 2015). Ceci permettrait d'accroître l'efficacité d'utilisation des terres et, dans le cas des cultures de vente, le rendement par unité de surface cultivée (Caviglia *et al.*, 2004 ; Heaton *et al.*, 2013 ; Bowles *et al.*, 2020 ; Liu *et al.*, 2020). De plus, la diversification des cultures peut procurer un revenu supplémentaire à l'agriculteur tout en lui fournissant des services de soutien et de régulation tels que i) la couverture du sol pendant la période de jachère, qui contribue à accroître le stockage du carbone dans le sol et à réduire la perte d'éléments nutritifs, ii) la fixation symbiotique de l'azote par l'introduction de légumineuses, ou iii) la réduction de l'impact des adventices, pathogènes et ravageurs par un effet de rupture des cycles (Schipanski *et al.*, 2014 ; Bulan *et al.*, 2015 ; Blesh, 2018 ; Wauters *et al.*, 2021 ; Guinet *et al.*, 2023).

La culture d'une deuxième production alimentaire, d'un fourrage ou de biomasse à vocation énergétique (CIVE) pendant la période de jachère (interculture) est communément appelée "double culture" (DC). Cette pratique consiste à récolter la même année deux cultures, qu'elles soient implantées de manière successive (DC = culture dérobée) ou que la deuxième culture soit implantée au cours du cycle de la première (DC = culture en relais), ce qui implique un chevauchement de leurs périodes de croissance (Tanveer *et al.*, 2017 ; Lamichhane *et al.*, 2023). Dans les pays tempérés et méditerranéens, cela correspond à une culture d'été (par exemple, le maïs, le soja, le sorgho, le tournesol...) semée immédiatement après la récolte précoce d'une culture semée en hiver (par exemple l'orge, le pois, le colza...) (Jacquin, 1992 ; Yamane *et al.*, 2016). Ces deux pratiques, qui ne sont pas nouvelles, sont largement répandues dans le monde entier, mais dans des régions où la température et l'eau sont



suffisantes (Zhang *et al.*, 2008 ; Wang *et al.*, 2012 ; Borchers *et al.*, 2014 ; Andrade et Satorre, 2015 ; Schnitkey, 2018; Kawasaki, 2019; Page *et al.*, 2019 ; Xu *et al.*, 2021 ; Simon-Miquel *et al.*, 2023). Le changement climatique pourrait créer de nouvelles opportunités pour ces pratiques dans les régions plus tempérées, mais uniquement si le déficit hydrique induit par les températures élevées et le manque de précipitations peut être atténué par une irrigation de complément (Seifert et Lobell, 2015; Gammans et Mérel, 2019 ; Gao *et al.*, 2019 ; Kawasaki, 2019).

En France (et en Europe), la double culture est surtout utilisée pour produire une deuxième spéculation à vocation fourragère ou énergétique (Brochier *et al.*, 2011 ; Graß *et al.*, 2013 ; Morand *et al.*, 2013). Pourtant, la couverture automnale des sols étant désormais obligatoire sur les terres classées en zones vulnérables conformément à la Directive Nitrates européenne, cela a conduit certains agriculteurs à tester des doubles cultures en remplacement opportuniste de cultures intermédiaires (Callewaert, 2016). Le processus de prise de décision concernant l'adoption de la double culture repose sur de nombreux facteurs liés aux conditions pédologiques et climatiques, mais aussi sur l'espérance de gain financier et de services écosystémiques, et la perception du risque (Shapiro *et al.*, 1992).

Les oléoprotéagineux tels que le soja et le tournesol ont le potentiel d'améliorer la productivité et la rentabilité des cultures dans un large éventail de systèmes de culture (Le Gall *et al.*, 2022). Ces cultures de printemps permettent de diversifier les assolements basés sur les céréales d'hiver et présentent un avantage par rapport aux autres cultures en termes de prix, de facilité d'adoption et de production satisfaisante en conditions d'environnement sub-optimales (Debaeke *et al.*, 1997 ; Reddy et Suresh, 2009). Le soja et le tournesol, déjà cultivés en tant que cultures principales, pourraient également être considérés comme de bons candidats pour la double culture dans le Sud-Ouest de la France, principalement en raison de la sélection de cultivars très précoces permettant une période de croissance courte (100-120 jours) (Jacquin, 1992 ; Debaeke *et al.*, 1997 ; Egli et Bruening, 2000 ; Lecomte, 2009 ; Vlachostergios *et al.*, 2011; Debaeke *et al.*, 2021). Les performances des deux espèces en tant que doubles cultures ont été rapportées dans de nombreux pays (Borchers *et al.*, 2014; Andrade et Satorre, 2015 ; Yamane *et al.*, 2016 ; Hansel *et al.*, 2019). Par ailleurs, les filières soja et tournesol sont bien développées dans le Sud-Ouest de la France, ces cultures étant les deux piliers des systèmes de culture en pluvial et en irrigué, respectivement. Cependant, très peu de références ont été produites en Europe sur les performances de ces deux oléoprotéagineux cultivés en double culture. En France, à notre connaissance, aucune donnée statistique n'est disponible pour évaluer la contribution des doubles cultures aux surfaces récoltées ou à la production des terres arables.

C'est pourquoi, le projet CASDAR "3C2A : Trois cultures en deux ans" (2019-2023) avait pour objectif de produire des références sur les doubles cultures dans le Sud-Ouest de la France, qui englobe les régions Nouvelle-Aquitaine et Occitanie (Pitchers *et al.*, 2023). Le projet s'est principalement concentré sur les cultures récoltées en grains (céréales et oléoprotéagineux) plutôt que sur les cultures fourragères ou bioénergétiques, davantage référencées en France jusqu'à présent (Brochier *et al.*, 2011 ; Morand *et al.*, 2013). Les cultures à graines permettent de fournir un revenu supplémentaire et de répartir les coûts fixes (Shapiro *et al.*, 1992). Néanmoins, elles peuvent induire des coûts supplémentaires et sont confrontées à de nouveaux enjeux pour la conduite et la mobilisation des ressources (Borchers *et al.*, 2014).

Nous présentons ici une synthèse des principaux résultats de l'étude 3C2A qui a mobilisé plusieurs catégories d'acteurs (agriculteurs, conseillers de chambres d'agriculture, ingénieurs d'instituts techniques, chercheurs) autour de différents dispositifs : enquête sur les pratiques, expérimentation à la ferme et en station expérimentale, avec un appui de la modélisation agronomique pour la projection à l'échelle du territoire et l'intégration de la variabilité climatique actuelle et future.



2. Perceptions des agriculteurs vis-à-vis de la double culture

2.1. Méthode

La collecte des données a été réalisée en 2020 et 2021 par le biais d'une enquête en ligne (29 réponses) et d'entretiens directs (14) auprès d'agriculteurs participant ou non au projet (Pitchers *et al.*, 2023). L'objectif était d'identifier les pratiques actuelles de double culture des agriculteurs en Nouvelle Aquitaine (Charente, Charente-Maritime, Vienne, Pyrénées-Atlantiques) et Occitanie (Aude, Gers, Haute-Garonne, Hautes-Pyrénées, Tarn, Tarn-et-Garonne). Le questionnaire a été conçu pour recueillir les motivations des agriculteurs et les principaux facteurs perçus de réussite et d'échec de ces pratiques. Au sein du groupe, 35 agriculteurs avaient déjà une expérience de la double culture, 7 avaient testé la culture en relais et 6 n'avaient jamais testé l'une ou l'autre de ces pratiques. 13 % des agriculteurs étaient engagés en production biologique.

2.2. Résultats

En raison du petit nombre d'agriculteurs enquêtés, nous avons privilégié une analyse qualitative des réponses. La plupart des agriculteurs pratiquaient la double culture sous la forme dérobée (principalement soja et tournesol). En effet, perçue comme technique et risquée, la culture en relais est très peu pratiquée, le contrôle des adventices étant aléatoire en l'absence d'herbicides applicables sur la culture semée sous couvert de la céréale (Lamichhane *et al.*, 2023). Les entretiens ont révélé que les agriculteurs ont des motivations à la fois économiques et agronomiques pour pratiquer la culture en dérobée. Ils cherchent à augmenter leur revenu par hectare, à remplacer les cultures intermédiaires dans les régions où celles-ci sont obligatoires à l'automne, ou à compenser les mauvais résultats de la culture d'hiver précédente. Ils visent également à protéger les sols contre les risques d'érosion hydrique et éolienne et à diversifier leurs successions de cultures.

Tableau 1 - Facteurs perçus par les agriculteurs comme influençant l'échec ou la réussite des cultures dérobées (d'après les entretiens et l'enquête en ligne : 43 réponses)

FACTEURS DE SUCCÈS	RISQUES D'ÉCHEC
Irrigation disponible (pour sécuriser la levée et la production de biomasse)	Faible pluviométrie estivale
Récolte précoce de la culture précédente (pour semer plus tôt la culture dérobée)	Fortes températures estivales
Choix de cultivars très précoces à précoces (mieux adaptés à la durée de cycle : 100-120 jours)	Conditions humides en octobre: récolte tardive, perte de grains
Semis rapide après la récolte du précédent (< 3 jours) (pour bénéficier de l'humidité résiduelle après récolte et assurer la levée)	Compétition par repousses de céréales (orge...); manque de contrôle (récolte, post-récolte)
Destruction des repousses de céréales (pour limiter la compétition pour l'eau)	Phytotoxicité (due à la persistance de l'herbicide appliqué sur le précédent)
Disponibilité d'un séchoir sur la ferme (ce qui permet d'avancer la date de récolte du précédent et de sécuriser une récolte de la culture dérobée qui serait trop humide)	

Les facteurs qui garantissent le succès ou l'échec de la récolte tels que perçus par les agriculteurs sont très liés (**Tableau 1**). L'irrigation apparaît comme un facteur clé pour assurer un rendement suffisant à la récolte. Évidemment, ce constat a pu être biaisé par les conditions sèches enregistrées pendant deux années consécutives (2019, 2020) au moment de l'enquête. Les décisions relatives à la durée de la



culture et à la maturité précoce en automne (par le biais de la date de semis et du choix du cultivar) ont également été perçues comme des facteurs de réussite importants, en particulier lorsque les conditions automnales étaient humides. De même, la disponibilité d'un système de séchage des récoltes est un facteur qui permet de garantir la pratique de la culture dérobée en cas de récolte tardive.

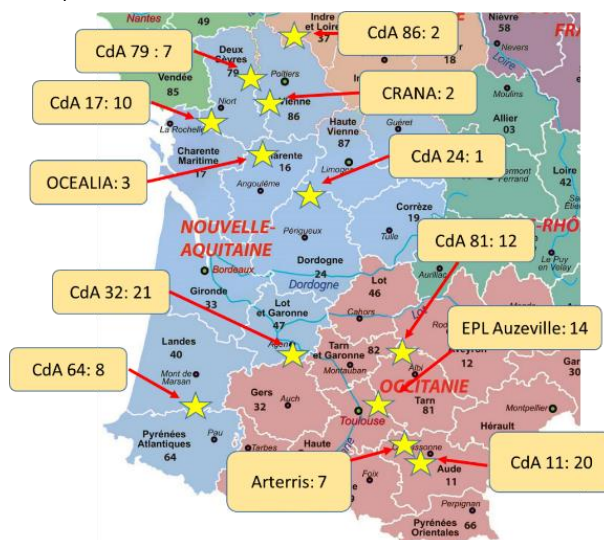
Les agriculteurs (6) n'ayant jamais testé cette pratique ont avancé cinq contraintes principales :

- Une augmentation du temps de travail lors de périodes déjà particulièrement chargées (récolte des cultures d'hiver, irrigation des cultures de maïs...)
- La nécessité d'un matériel adéquat (semoir...), notamment pour la culture en relais
- La forte dépendance à l'égard de l'irrigation pour sécuriser la pratique
- Des problèmes de désherbage (surtout pour les agriculteurs biologiques et en cultures relais)
- Une efficacité moindre que les cultures intermédiaires pour l'augmentation de la teneur en matière organique du sol et la réduction des stocks semenciers d'adventices.

3. Expérimentation à la ferme

3.1. Méthode

L'objectif de ces essais « à la ferme » était d'évaluer la faisabilité et les performances de différentes options pour la double culture (Pitchers *et al.*, 2023). Ainsi, de 2019 à 2022, 130 essais répartis entre la Nouvelle Aquitaine (Nord-Ouest et Sud) et l'Occitanie (Centre) (**Figure 1**) ont été mis en place par des agriculteurs volontaires parmi lesquels 107 ont été suivis jusqu'à la récolte avec des mesures de rendement (moissonneuse-batteuse, échantillonnage manuel en cas de récolte jugée non rentable). Chaque agriculteur a décidé lui-même des espèces cultivées, du travail du sol, du contrôle des adventices (chimique ou mécanique), de la fertilisation et de l'irrigation. Les causes d'échecs ont été notifiées. La marge semi-nette définie comme la différence entre le produit brut (rendement réel x prix du produit) et les coûts de production, calculés comme la somme des intrants appliqués (semences, fertilisation, produits phytosanitaires), des coûts d'irrigation et des coûts liés au machinisme (travail du sol, semis, récolte) a été estimée à l'aide de l'outil SYSTERRE® (Jouy et Tournier, 2011).



Chambres d'Agriculture (CdA) : 11 (Aude); 17 (Charente-Maritime); 24 (Dordogne); 32 (Gers); 64 (Pyrénées-Atlantiques); 79 (Deux-Sèvres); 81 (Tarn); 86, CRANA (Vienne);

Coopératives : Arterris (Haute-Garonne); Ocealia (Charente)

Formation : Exploitation du Lycée Agricole d'Auzeville (31)

Figure 1 – Nombre et localisation des essais au champ (2019-2022) suivis par 12 partenaires du projet 3C2A



3.2. Pratiques culturales en dérobé

Le soja et le tournesol ont été cultivés dans 25 % et 23 % des parcelles respectivement, suivis par le sarrasin (14 %) et le sorgho (11 %). Les autres doubles cultures (27 %) étaient : le maïs grain, les cultures énergétiques (y compris le maïs d'ensilage), les cultures fourragères (y compris le maïs fourrager, le millet et divers mélanges de graminées et de légumineuses), la cameline, le maïs doux et le chia. Les principales cultures précédentes étaient des céréales d'hiver (orge, blé tendre et blé dur), du colza (à destination huile ou semences) et du pois protéagineux. Par conséquent, les séquences "culture d'hiver - culture dérobée" les plus fréquentes étaient les suivantes: (1) colza suivi de soja, sorgho ou tournesol : 24 %, (2) orge suivi de soja ou de maïs : 20 %, (3) blé suivi de soja, tournesol ou sarrasin : 19 %. Les pratiques les plus fréquentes pour la double culture étaient les suivantes : opérations mécaniques pour broyer et enfouir superficiellement les résidus de la culture précédente (55 %), pas d'application d'herbicides (58 %) ni d'engrais (77 %) et irrigation d'appoint (54 %). L'absence d'engrais azotés est liée à la forte proportion de soja dans le panel (25 %) et à la volonté des agriculteurs de limiter les charges engagées dans ces cultures. Les variétés de soja les plus utilisées sont ES Comandor (000), Herta PZO (000), Solena (000) et ES Mentor (00). En ce qui concerne le tournesol, des variétés très précoces telles que SY Arco et ES Baltic ou des variétés précoces telles que MAS 82OL et Durban CS ont été fréquemment semées.

3.3. Succès et échecs de la culture dérobée

Les étés 2019 et 2020 n'ont pas été favorables à la double culture dans le Sud-Ouest. La faible quantité de précipitations après les semis a retardé la levée des plantules et entravé la croissance des cultures. Les températures élevées en juillet et août (par exemple à Toulouse : 34 jours avec une température maximum $T_{max} > 30$ °C en 2019 et 25 jours en 2020) avec peu ou pas de précipitations ont eu un impact dramatique sur les rendements en conditions pluviales. Puis, à partir de la mi-octobre 2019, des précipitations excessives ont entravé les récoltes. En 2021, la récolte tardive des cultures d'hiver due aux précipitations fréquentes en juin a retardé le semis des cultures dérobées, mais l'humidité du sol était optimale pour la levée. L'été 2021 a été relativement sec et plus favorable en termes de température (par exemple à Toulouse : uniquement 16 jours avec $T_{max} > 30$ °C), mais les conditions sont devenues très humides en fin de campagne agricole, ce qui a retardé la maturité des grains et entravé les opérations de récolte. Entre mai et septembre, la saison 2022 a été exceptionnellement sèche et chaude (ainsi, à Toulouse : 40 jours avec $T_{max} > 30$ °C en juillet et août), ce qui a permis une récolte très précoce des cultures d'hiver précédentes à partir de la mi-juin et donc un semis avancé des cultures dérobées, ce qui est un facteur potentiel de réussite. Toutefois, les quantités d'irrigation nécessaires pour assurer les cultures d'été étaient extrêmement élevées pour les doubles cultures en 2022.

Par conséquent, sur les 130 parcelles suivies au cours des quatre années d'essais agricoles, 39 % n'ont pas été récoltées en raison de conditions climatiques défavorables, avec quelques variations selon l'espèce : 21 % pour le tournesol, 22 % pour le soja, 43 % pour le sorgho et 50 % pour le sarrasin (**Figure 2**). Dans certains cas, la maturité des cultures a été retardée en raison de l'établissement décalé des plantules en conditions sèches. Dans d'autres cas, la récolte a été impossible en raison d'un salissement incontrôlé ou de conditions trop humides en automne. Mais la plupart des situations d'échec sont à relier à un fort déficit hydrique au semis, responsable de faibles peuplements et d'une biomasse réduite à la récolte. Cependant, 52 % des cultures non irriguées n'ont pas été récoltées contre 21 % des cultures irriguées.

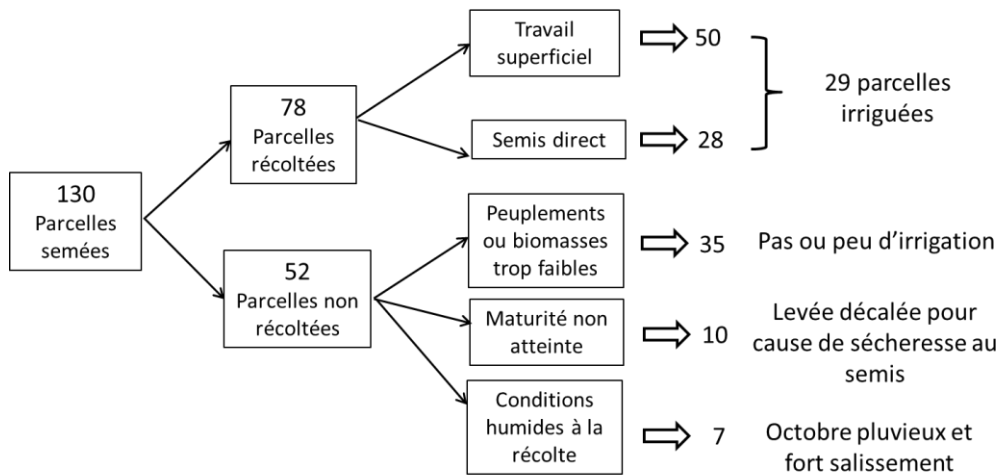


Figure 2 – Distribution des parcelles suivies selon les causes d'échec et certaines pratiques culturales

3.4. Performances du soja et du tournesol en dérobé

Les rendements moyens obtenus en soja et tournesol dérobés étaient de 18 q.ha⁻¹ et 12 q.ha⁻¹ en moyenne, avec un certain étalement des performances selon les années, les régions et la disponibilité en eau d'irrigation (Figure 3). Les deux tiers des 32 parcelles semées en soja ont été irriguées avec une quantité moyenne de 180 mm (128 mm à 193 mm selon les saisons de croissance). La plupart des récoltes de soja ont été fructueuses (78 %), et les échecs les plus graves se sont produits en conditions pluviales. Cependant, les essais situés dans la région du Béarn et du Pays Basque, qui ont reçu des précipitations suffisantes en raison d'un microclimat humide (par exemple 109 mm en moyenne en juillet et en août contre 50 mm à 63 mm pour les autres stations météorologiques d'Occitanie et du Nord de la Nouvelle Aquitaine) n'ont pas été irrigués. Dans ces essais, les rendements ont été élevés pour des variétés précoces même en conditions pluviales (25-30 q.ha⁻¹).

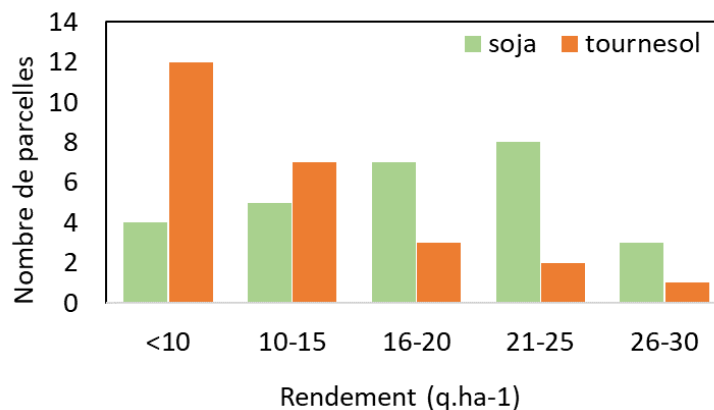


Figure 3 – Distribution des rendements de soja et tournesol en dérobé sur le réseau de parcelles 2019-2022 pour les parcelles récoltées (n = 27 pour le soja ; n = 25 pour le tournesol)

Dans le cas de la double culture de tournesol (29 essais semés), tous les échecs étaient dus à un manque d'eau en conditions non irriguées. Comme pour le soja, deux tiers des essais de tournesol ont été irrigués, mais les conditions non irriguées n'ont pas bénéficié systématiquement de précipitations abondantes. Les essais réussis ont reçu au moins 25 mm après le semis pour assurer l'émergence des plantules et une croissance précoce. La plupart des parcelles ont également été irriguées à la floraison, afin de réduire le stress hydrique pendant la phase la plus sensible et de garantir la teneur en huile. En 2019, 2020 et 2022, en raison du manque d'eau et des températures élevées, la quantité moyenne d'irrigation a été de 80 mm-

90 mm. En 2021, 48 mm ont été appliqués au tournesol car la saison estivale a été plus pluvieuse et plus fraîche. Cependant, même lorsque les besoins en eau ont été satisfaits, 6 essais sur 18 ont donné de faibles rendements ($< 10 \text{ q.ha}^{-1}$); l'une des raisons pourrait être la persistance des herbicides appliqués sur le blé précédent, combinée à une forte chaleur pendant la floraison et/ou à la sécheresse estivale. Ainsi, avec l'irrigation, seuls 6 essais ont atteint des rendements ($> 18 \text{ q.ha}^{-1}$) comparables à ceux du tournesol en culture principale mais sans irrigation. Cependant, dans les conditions climatiques actuelles, le soja et le tournesol ne peuvent être cultivés que dans le sud de la Nouvelle Aquitaine et de l'Occitanie, où leurs besoins en degrés-jours de croissance sont satisfaits. Dans le nord de la Nouvelle Aquitaine, la maturité physiologique n'a pas été atteinte avant l'automne, ce qui a trop retardé la date de récolte, d'où des conditions inadaptées.

Sur la base des coûts de production (CP) 2019-2021 et 2022, nous avons calculé, pour les conduites les plus communes en tournesol et soja, le "rendement à l'équilibre" (pour lequel la marge semi-nette est nulle) en considérant une récolte réussie soit chaque année (100 %), soit tous les deux ans (50 %) (**Figures 4 a et b**). Chaque courbe représente le rendement-grain minimum à atteindre pour que la conduite en dérobé soit rentable. Les prix de vente qui ont augmenté de 2019 à 2022 ont été indiqués sur les deux figures. Nous avons supposé une irrigation de 75 mm pour le tournesol et de 180 mm pour le soja, avec des coûts de $0,20 \text{ €} \cdot \text{m}^{-3}$ en 2019-2021 et $0,30 \text{ €} \cdot \text{m}^{-3}$ en 2022. Nous avons systématiquement opté pour des semences certifiées dans le cas du soja (environ 6 fois plus coûteuses que les semences de ferme).

Ainsi, en tournesol (**Figure 4a**), avec un prix de vente relativement bas en 2019, il était nécessaire d'atteindre au moins un niveau de rendement de 14 q.ha^{-1} chaque année pour être rentable. Avec les prix des graines en augmentation continue de 2020 à 2022, les rendements à l'équilibre étaient : 11, 8 et 6 q.ha^{-1} respectivement. Si la récolte n'est fructueuse qu'une année sur deux, il faut assurer des rendements à l'équilibre de 25, 20, 15 et 11 q.ha^{-1} pour des prix de vente croissants (entre 2019 et 2022). Pour le soja (**Figure 4b**), en raison des coûts élevés de l'irrigation et des semences, la culture dérobée est rentable si l'on atteint chaque année des rendements de $20\text{-}30 \text{ q.ha}^{-1}$, ce qui semble accessible avec l'irrigation. L'utilisation de semences de ferme pourrait réduire les coûts de production. La culture du soja dans la partie sud-ouest de la Nouvelle Aquitaine dans des conditions pluvieuses pourrait permettre d'augmenter la rentabilité de la double culture sans recours à l'irrigation.

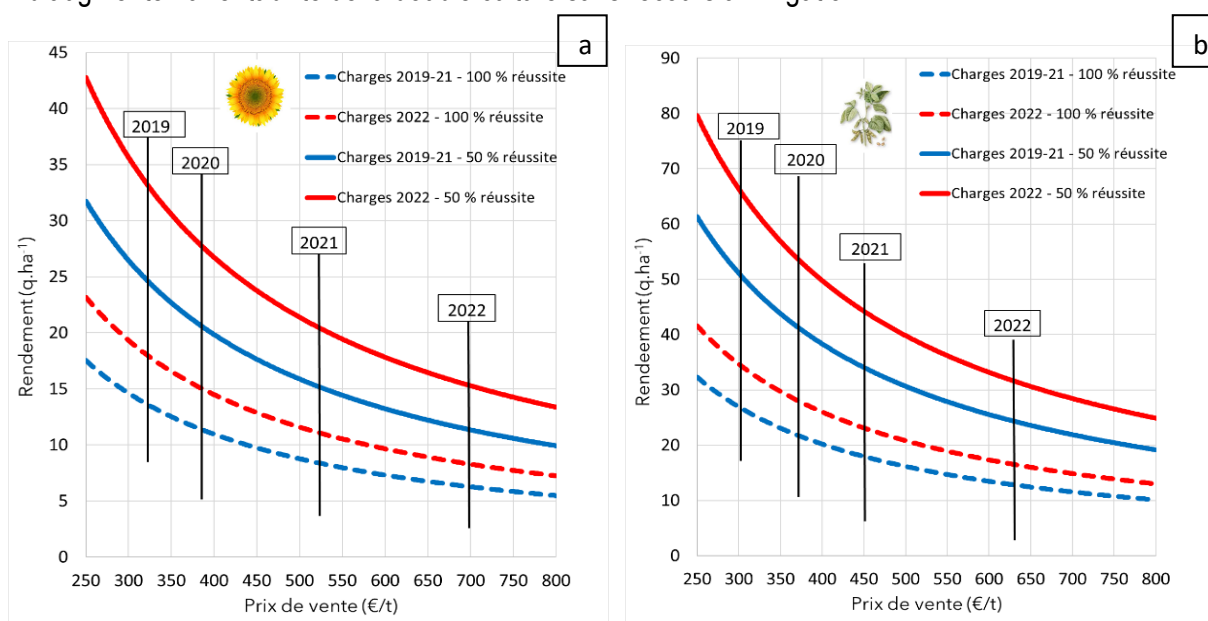


Figure 4 – Rendement à l'équilibre du tournesol (a) et du soja (b) en dérobé en fonction du prix de vente des graines (€/t), du niveau des charges (2019-21 ou 2022) et du taux de succès de la conduite (chaque année ou 1 an sur 2) - les étiquettes indiquent le niveau des prix pour les 4 années d'étude (2019-2022).



4. Expérimentation en station

Afin d'évaluer le potentiel des variétés de tournesol et de soja en dérobé et en conditions favorables, des essais en petites parcelles ont été menés en station expérimentale (INRAE & Terres Inovia) durant 3 années.

4.1. Réponse des variétés de tournesol en dérobé

Les 24/06/20 et 08/07/21, 24 et 28 variétés de tournesol des groupes « très précoce, TP », « précoce, P » et « demi-précoce, DP » ont été semées en sol profond sur le domaine d'Auzeville (INRAE) en dispositif de micro-parcelles randomisé à 6 (2020) et 3 (2021) répétitions, sans apport d'azote du fait d'un précédent pois. La récolte du tournesol a été réalisée les 22/10/20 et 28/10/21. Ceci masque des dates de maturité (M3) qui s'étalent entre le 08/10 et le 28/10 en 2020 et entre le 19/10 et le 03/11 en 2021. Les rendements moyens (Rdt) obtenus aux normes (11 %) ont été de 19.9 q.ha⁻¹ et 18.6 q.ha⁻¹ en moyenne pour des apports d'eau de 44 mm et 97 mm en 2020 et 2021 respectivement. Les gammes d'humidité (H) à la récolte ont été assez variables selon les groupes de précocité : 11 % à 31 % (2020), 11 % à 46 % (2021).

Le croisement des rendements et des taux d'humidité à la récolte a permis de mettre en évidence des variétés favorables pour ces 2 critères (Rdt > 20 q.ha⁻¹ et H < 17 %) appartenant aux groupes TP et P (**Figure 5**). Les variétés DP dans le contexte actuel n'ont pas permis d'exprimer le potentiel observé en culture principale. Le potentiel des variétés TP est assez variable mais certaines variétés se sont montrées très précoces (H < 13 % : RGT Bellus, ES Baltic, P62LL109) exprimant un rendement de 18 q.ha⁻¹.

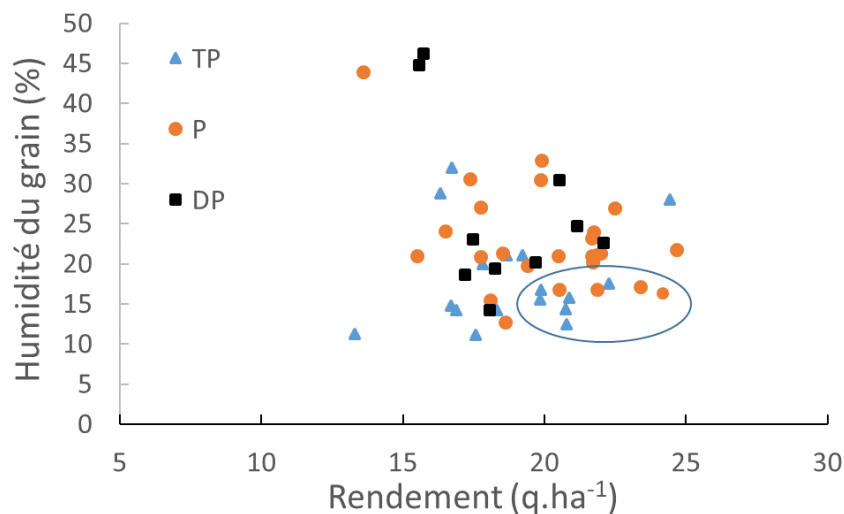


Figure 5 – Identification de variétés de tournesol à bon potentiel et à taux d'humidité modéré à la récolte pour la culture en dérobée (campagnes 2020 et 2021). Les valeurs entourées illustrent l'intérêt de certaines variétés pour la culture en dérobée avec un bon compromis entre rendement et humidité du grain à la récolte.

4.2. Réponse des variétés de soja en dérobé

De 2019 à 2021, 6 variétés de soja (groupes 0000 à I) ont été semées par Terres Inovia dans 2 sites du Sud-Ouest (En Crambade (31) et Castétis (64)) en blocs randomisés à 3 répétitions et 2 facteurs (variété, date de semis : S1 le plus tôt après récolte du précédent ; S2 : S1+7 jours ; S3= S1+14 jours). Le semis S1 a été réalisé entre le 25/06 et le 29/06.

Les rendements ont été plus élevés à Castétis (+24 %) qu'à En Crambade (**Figure 6a**) en raison d'un contexte pédoclimatique plus favorable sur ce site : précipitations plus abondantes (271-322 mm vs 149-224 mm) et sol plus profond. Les classements des rendements ont suivi logiquement les groupes de maturité (de 21 q.ha⁻¹ en 0000 à 35 q.ha⁻¹ en I) (**Figure 6b**).

Un retard de semis de 7 à 14 jours a conduit en tendance à une légère diminution du rendement (de 0 % à 8 % selon les variétés), à une diminution du nombre de jours nécessaire au soja pour accomplir son cycle (de 1 à 5 jours en moyenne), et n'a eu que peu d'incidence sur l'humidité du grain à la récolte. Dans la plupart des cas (à l'exception de RGT Speeda du groupe 0), les humidités à la récolte avoisinaient 17 %. Dans le contexte de ces essais, le décalage de la date de récolte est inférieur à la référence « 4 jours de retard à la récolte par jour perdu au semis » mise en évidence par des travaux antérieurs menés par Terres Inovia. Sur ce critère, une importante variabilité a toutefois été observée qui nécessitera de mener des travaux spécifiques.

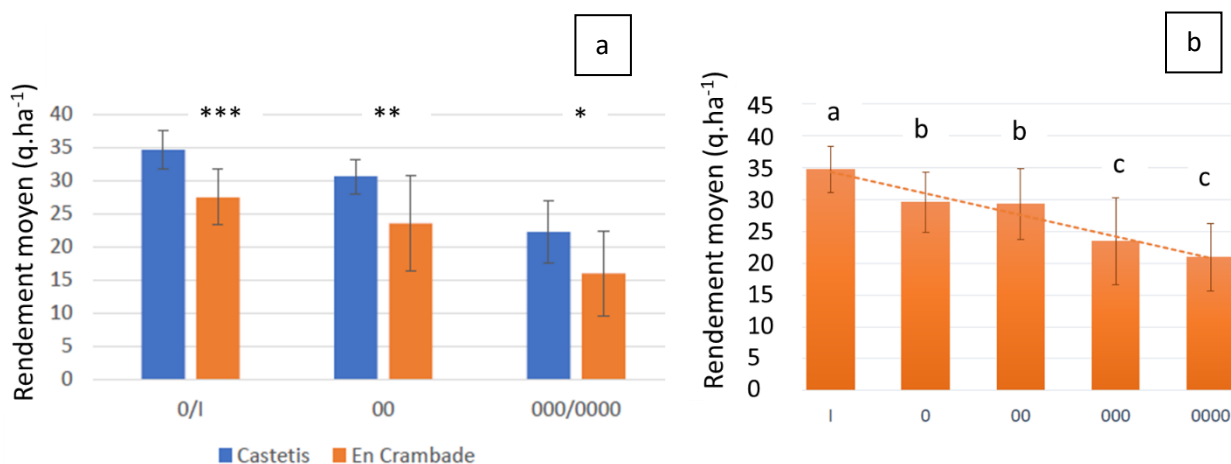


Figure 6 – Rendements moyens aux normes (14 % d'humidité) du soja déroché: a) effet du site d'étude pour 3 groupes de maturité : 0/I, 00 et 000/0000 (niveau de signification: *** : P < 0.001 ; ** : P < 0.01 ; * : P < 0.05) ; b) effet du groupe de maturité pour les 2 sites confondus (les lettres a, b et c indiquent des rendements moyens significativement différents pour P < 0.05). Les barres d'erreurs correspondent aux écart-types des échantillons. Analyse de variance réalisée pour l'année 2020 sur le facteur « site » par groupe de maturité (a) et sur le facteur « groupe de maturité » pour les 2 sites et les 3 années 2019-2021 (b). Comparaison des moyennes à l'aide du test de Tukey HSD.

5. Apport de la modélisation

Dans ce projet, deux types de modèles ont été mobilisés : SPA (Simple Photothermal Algorithm, Schoving et al., 2019 ; 2020), modèle de phénologie pour apprécier la faisabilité des cultures c'est-à-dire la possibilité de boucler le cycle; STICS (Simulateur mulTIdisciplinaire pour les Cultures Standard, Brisson et al., 2008), modèle de culture pour évaluer le rendement accessible, les besoins en eau et les impacts environnementaux (drainage, lixiviation du nitrate) des cultures dérochées. L'un des intérêts de ces modèles est d'explorer des conditions de sols, de climats et de conduites culturales au-delà des situations expérimentées, de prendre en compte le climat futur (scénarios RCP du GIEC), de simuler des variables difficiles à estimer (ex dynamique de l'eau et de l'azote dans le sol) à des échelles spatiales et temporelles étendues, dans le cadre d'expérimentations virtuelles.

5.1. Faisabilité des cultures dérochées

Le modèle SPA a été utilisé pour simuler la date de récolte du soja atteignable au moins 8 années sur 10 pour des variétés des groupes 000, I et II semées le 20/06 (i) pour 3 horizons temporels : actuel (2000-



2020), futur proche (2020-2040), futur lointain (2040-2060), (ii) pour le scénario d'émission des gaz à effet de serre le plus pessimiste (RCP 8.5) et (iii) pour toutes les mailles climatiques SAFRAN³ (8 km x 8 km) des 2 régions du Sud-Ouest (Duchalais *et al.*, 2022). Si l'on considère que le 20 Octobre est une date limite raisonnable pour sécuriser la récolte et permettre l'implantation d'une culture d'hiver dans le Sud-Ouest, on montre que la faisabilité du soja en dérobé s'étend progressivement avec une couverture régionale complète à l'horizon 2050 (**Figure 7**). A cet horizon, des variétés de groupe II semées en dérobé seraient faisables en Occitanie uniquement.

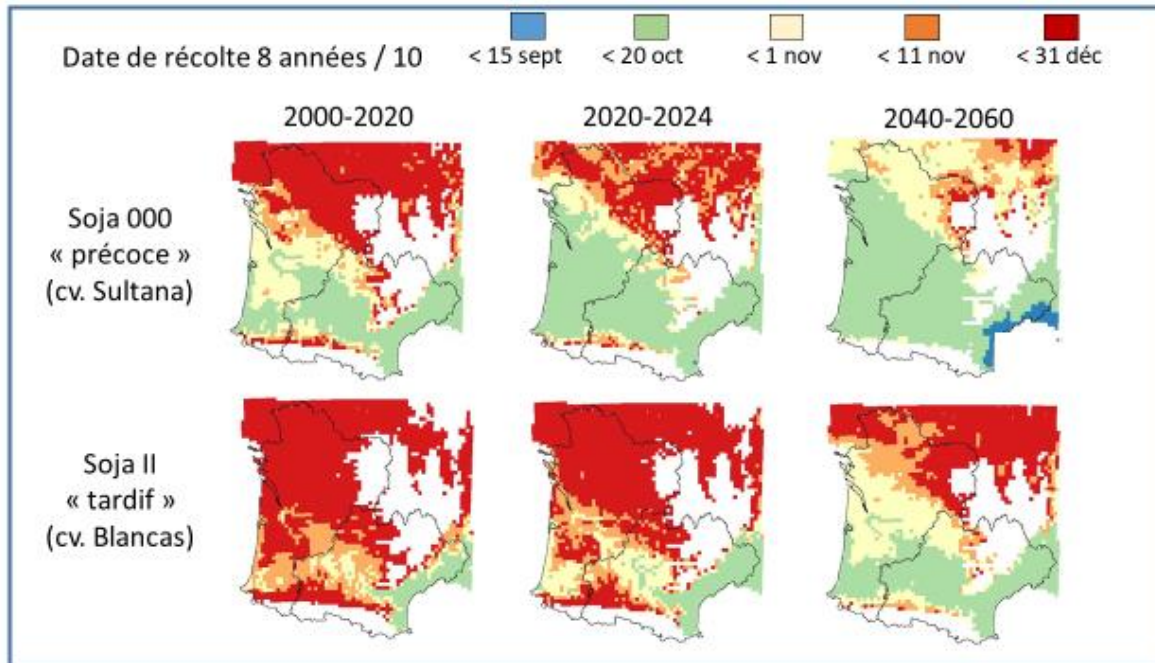


Figure 7– Dates de récolte du soja en dérobé atteignables au moins 8 années sur 10 pour 2 groupes de maturité extrêmes (000 et II) en climat actuel et futur (simulations SPA, Bourgeois *et al.*, 2023).

En tournesol, sur la base du modèle STICS calibré pour les cultures en dérobé, on montre une avancée des dates de maturité de 10 à 15 jours et une récolte entre le 15/09 et le 30/09 dans le Sud-Ouest.

5.2. Besoin en irrigation des cultures dérobées

Le développement des cultures dérobées peut difficilement s'envisager sans un recours à l'irrigation d'appoint souvent dès la levée. A l'aide du modèle STICS, il a été possible d'évaluer les quantités d'eau à apporter pour satisfaire les besoins hydriques du soja et du tournesol, en particulier sur un horizon projeté de 50 années et pour différents postes climatiques au sein des 2 régions d'étude (**Figure 8**). Les besoins en eau varient selon les programmes d'irrigation, les contextes pédoclimatiques et les groupes de maturité (pour le soja) : en moyenne, 47 mm et 85 mm pour le tournesol et 82 mm et 132 mm pour le soja (155 mm pour le groupe I le plus tardif) pour une irrigation restrictive centrée sur la floraison ou assurant la satisfaction des besoins, respectivement.

³ Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Adaptés à la Nivologie, module d'analyse objective, Météo France, qui utilise des mailles de 8 km de côté pour quadriller la France.

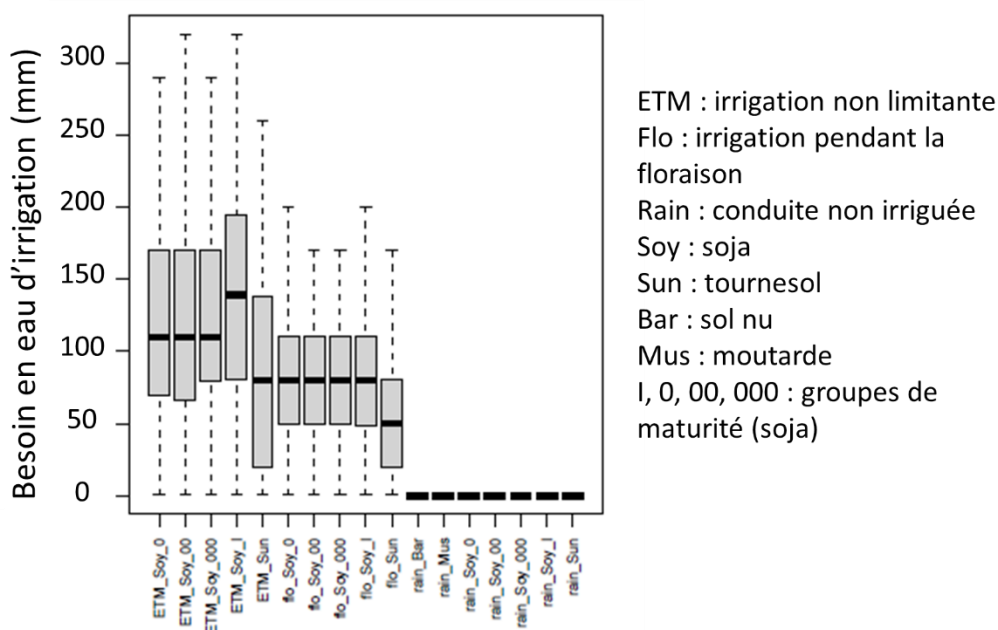


Figure 8 – Simulation des besoins futurs en irrigation (mm) pour le soja (type variétal 0 – 00 – 000 – I) et le tournesol (type variétal TP) pour 2 régimes d'irrigation à l'aide de STICS: (ETM) irrigation dès que l'offre du sol est inférieure à 65 % du besoin ; (FLO) irrigation à la floraison – Période 2019-2069 : valeurs médianes (en gras), valeurs comprises entre le 1^{er} et le 3^{ème} quartiles (en grisé), valeurs minimum et maximum, pour 7 sites de Nouvelle-Aquitaine et Occitanie.

5.3. Impact environnemental des cultures dérobées

La simulation à l'aide du modèle STICS montre que l'introduction de cultures dérobées peut avoir des effets positifs sur la réduction du drainage et de la lixiviation du nitrate. L'effet est plus important pour le tournesol que pour le soja. Cela peut être expliqué par des apports d'irrigation moindres en tournesol, un bilan d'azote moins excédentaire et un enracinement plus profond, par comparaison avec une moutarde implantée le 20/08 et enfouie le 13/11 (**Figure 9**). L'introduction d'une culture dérobée peut ainsi jouer un rôle de piégeage de l'azote du sol et réduire le drainage hivernal.

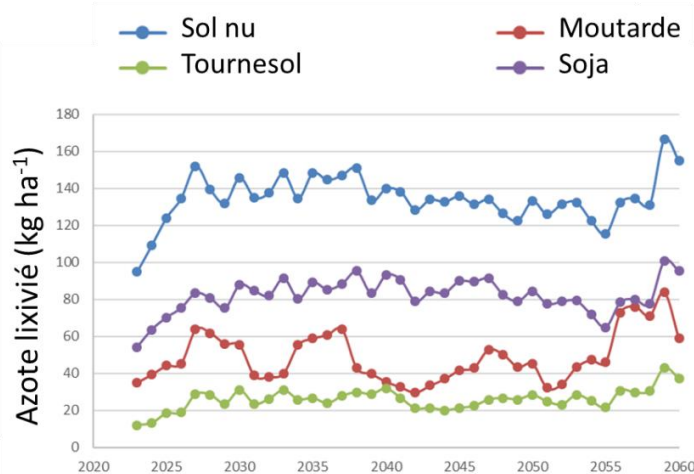


Figure 9 – Simulation des quantités d'azote lixiviées ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, entre le 29/06/année n et le 25/04/année n+1) pour 4 options après récolte de la céréale : sol nu ; semis de soja ou de tournesol le 20/06 ; semis d'une moutarde le 20/08. Les données représentées sont la moyenne de 7 sites.



6. Conclusion et perspectives

S'appuyant sur des expérimentations à la ferme et en station, de la modélisation agronomique et de l'enquête auprès des agriculteurs, l'étude 3C2A suggère que la culture dérobée d'oléoprotéagineux est réalisable dans les conditions agro-écologiques du sud-ouest de la France et peut constituer une opportunité rentable dans certaines conditions.

Le soja est apparu comme le meilleur candidat en dérobé dans le sud de la Nouvelle Aquitaine et l'ouest de l'Occitanie, avec un faible risque économique. Cependant, pour minimiser ce risque, cette pratique requiert de l'irrigation, sauf dans le sud-ouest de la Nouvelle Aquitaine où les précipitations sont bien réparties et suffisamment régulières en été. Le tournesol est un autre candidat potentiel, qui a été massivement adopté en 2022, année très sèche, mais avec des précédents récoltés exceptionnellement tôt en juin. La conjoncture favorable en termes de prix de vente en 2022 a également fortement influencé le choix des agriculteurs. Néanmoins, le risque économique semble plus élevé pour cette culture, en particulier en conditions pluviales. Le tournesol en dérobé ne devrait pas être concentré dans la région Occitanie, où cette culture est une composante majeure des assolements en semis de printemps, afin de prévenir les problèmes de pathogènes résultant de rotations courtes (par exemple, mildiou, phomopsis, phoma) (Mestries *et al.*, 2011). Par contre, les exigences de température pour ces deux cultures ne sont pas actuellement remplies avec une fréquence suffisante dans le nord de la Nouvelle Aquitaine, malgré des types variétaux très précoces, et le sarrasin reste le meilleur candidat potentiel dans cette région (Ferrand, 2018).

Ceci pourrait changer avec l'évolution du climat comme l'ont montré les simulations à l'aide des modèles SPA et STICS qui suggèrent une faisabilité étendue de ces cultures (avancée des dates de semis et de récolte) dans les zones septentrionales (nord Nouvelle Aquitaine) moyennant le choix de variétés adaptées. Des travaux sont en cours pour réduire l'incertitude des prédictions des rendements accessibles pour une gamme large de variétés et de conduites culturales et tester le potentiel des cultures dérobées pour des latitudes plus élevées en France et en Europe.

Les cultures dérobées peuvent créer un revenu supplémentaire et transformer les contraintes réglementaires en opportunités dans les zones vulnérables aux nitrates (Callewaert, 2016). Toutefois, les coûts sont plus élevés que pour les cultures intermédiaires, et le risque économique est plus important en cas d'échec de la culture. La culture dérobée nécessite plus de temps de travail et d'intrants que les cultures intermédiaires. Notre étude suggère cependant que la culture dérobée peut contribuer à réduire les impacts environnementaux, notamment la lixiviation du nitrate. La disponibilité en eau d'irrigation reste cependant une condition indispensable à la sécurisation de cette pratique.

Ethique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article

Déclaration relative à l'intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'Intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.



Contributions des auteurs

Debaeke P. : écriture & coordination de l'article, mise en forme des résultats; Abella M., Constantin J., Ferrand N., Lamichhane J.R., Pitchers J., Pull M., Tison G. : collecte et analyse des données, relecture ; Duchalais A., Lemouzy C., Michel F. : collecte et analyse des données ; Alletto L., Goulard P., Lobietti M., Minette S. : recherche de financement, administration et coordination du projet

Tous les auteurs et autrices ont lu et approuvé le manuscrit final.

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas avoir d'intérêts financiers ou de relations personnelles qui pourraient être considérés comme des intérêts potentiels

Remerciements

Nous remercions tous les agriculteurs et expérimentateurs (INRAE - UE APC, Terres Inovia, EPL - Auzeville) qui ont participé à ce projet ainsi que tous les techniciens et ingénieurs des Chambres d'Agriculture (11, 17, 24, 32, 64, 79, 81, 86) et des coopératives Arterris et Océalia, partenaires du projet. Ce projet a permis d'accueillir plusieurs étudiants en stage de césure ou de mémoire d'ingénieur : qu'ils soient tous et toutes sincèrement remerciés pour leur investissement sur le terrain.

Déclaration de soutien financier

Ce projet intitulé « Doubles cultures : opportunités, faisabilité et multiperformances de cultiver trois cultures en deux ans dans le Sud-Ouest de la France » (3C2A) a été financé par le compte d'affectation spécial pour le développement agricole et rural (CasDAR) n° 3C2A_012

Références bibliographiques

- Andrade J.F., Satorre E.H., 2015. Single and double crop systems in the Argentine Pampas: Environmental determinants of annual grain yield. *Field Crops Research* 177, 137–147.
- Blesh J., 2018. Functional traits in cover crop mixtures: Biological nitrogen fixation and multifunctionality. *Journal of Applied Ecology* 55, 38–48.
- Bonny S., 2010. L'intensification écologique de l'agriculture : voies et défis. In: Coudel E, Devautour H, Soulard CT, Hubert B (eds.), ISDA 2010. Cirad-Inra-SupAgro, Montpellier, France.
- Borchers A., Truex-Powell E., Wallander S., Nickerson C., 2014. Multi-cropping practices : recent trends in double-cropping. United States Department of Agriculture. EIB-125, U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service, May 2014.
- Bowles T.M., Mooshammer M., Socolar Y., Calderón F., Cavigelli M.A., Culman S.W., Deen W., Drury C.F., Garcia y Garcia A., Gaudin A.C.M., Harkcom W.S., Lehman R.M., Osborne S.L., Robertson G.P., Salerno J., Schmer M.R., Strock J., Grandy A.S., 2020. Long-term evidence shows that crop-rotation diversification increases agricultural resilience to adverse growing conditions in North America. *One Earth* 2, 284–293.
- Brisson N., Launay M., Mary B., Beaudoin N. (eds), 2008. Conceptual basis, formalisations and parameterization of the STICS crop model. Editions QUAE, Versailles (France), 297 p.
- Brochier M., Savouré M.L., Guy P., Chapron L., Deceuninck A., 2011. Bien choisir sa culture dérobée. *Agro-Transfert Ressources et Territoires*. Juin 2011, 16 p.
- Bulan M.T.S., Stoltenberg D.E., Posner J.L., 2015. Buckwheat species as summer cover crops for weed suppression in no-tillage vegetable cropping systems. *Weed Science* 63, 690–702.



- Callewaert H., 2016. Faisabilité technique et intérêt économique, agronomique et environnemental de cultiver 3 cultures graines en 2 ans. Mémoire d'ingénieur de fin d'études, Institut Polytechnique LaSalle Beauvais, France.
- Caviglia O.P., Sadras V.O., Andrade F.H., 2004. Intensification of agriculture in the south-eastern Pampas I. Capture and efficiency in the use of water and radiation in double-cropped wheat–soybean. *Field Crops Research* 87, 117-129.
- Debaeke P., Hilaire A., 1997. Production of dryland and irrigated crops under different crop rotations and input levels in Southwestern France. *Canadian Journal of Plant Science* 77, 539-548.
- Debaeke P., Casadebaig P., Langlade N.B., 2021. New challenges for sunflower ideotyping in changing environments and more ecological cropping systems. *OCL- Oilseeds & fats Crops and Lipids* 28, 29.
- Duchalais A., Schoving C., Constantin J., Champolivier L., Maury P., Debaeke P., 2022. Combining simple cultivar phenotyping and photothermal algorithm to explore the present and future suitability of soybean crop in France. *PHENOLOGY 2022 - Phenology at the crossroads*, 20-24 Juin, Avignon, France.
- Duru M., Therond O., Martin G., Martin-Clouaire R., Magne M.A., Justes E., Journet E.P., Aubertot J.N., Savary S., Bergez J.E., Sarthou J.P., 2015. How to implement biodiversity-based agriculture to enhance ecosystem services: a review. *Agronomy for Sustainable Development* 35, 1259–1281.
- Egli B.E., Bruening W.P., 2000. Potential of early-maturing soybean cultivars in late plantings. *Agronomy Journal* 92, 532-537.
- Ferrand N., 2018. Étude prospective de la faisabilité technique et de l'intérêt économique, agronomique et environnemental de cultiver trois cultures en deux ans dans le contexte pédoclimatique de Nouvelle-Aquitaine. Mémoire d'ingénieur de fin d'études, AgroCampus Ouest, Rennes, France.
- Gammans M., Mérel P., 2019. Double cropping as an adaptation to climate change in the United States. *Agricultural and Applied Economics Association, 2019 Annual Meeting*, July 21-23, Atlanta, Georgia, USA.
- Gao J., Yang X., Zheng B., Liu Z., Zhao J., Sun S., Li K., Dong C., 2019. Effects of climate change on the extension of the potential double cropping region and crop water requirements in Northern China. *Agricultural Forest Meteorology* 268, 146–155.
- Ghali M., Daniel K., Colson F., Sorin S., 2014. L'agriculture écologiquement intensive. Une approche économique. *Économie Rurale* 341, 83–99.
- Graß R., Heuser F., Stülpnagel R., Piepho H.P., Wachendorf M., 2013. Energy crop production in double-cropping systems: Results from an experiment at seven sites. *European Journal of Agronomy* 51, 120–129.
- Guinet M., Adeux G., Cordeau S., Courson E., Nandillon R., Zhang Y., Munier-Jolain N., 2023. Fostering temporal crop diversification to reduce pesticide use. *Nature Communications* 14, 7416.
- Hansel D.S.S., Schwalbert R.A., Shoup D.E., Holshouser D.L., Parvej R., Prasad P.V.V., Ciampitti I.A., 2019. A review of soybean yield when double-cropped after wheat. *Agronomy Journal* 111, 677-685.
- Heaton E.A., Schulte L.A., Berti M., Langeveld H., Zegada-Lizarazu W., Parrish D., Monti A., 2013. Managing a second-generation crop portfolio through sustainable intensification: Examples from the USA and the EU. *Biofuels Bioproducts and Biorefining* 7, 702–714.
- Jacquin C., 1992. La pratique des doubles cultures. Approche climatique, technique et économique. In: *L'irrigation en grandes cultures. Synthèse des acquis et perspectives d'avenir*. Chambre Régionale d'Agriculture Midi-Pyrénées, Avril 1992, 13 p.



- Jouy L., Tournier A., 2011. Ajuster ses pratiques grâce à des indicateurs. *Perspectives Agricoles* 383, 40–42.
- Kawasaki K., 2019. Two harvests are better than one: double cropping as a strategy for climate change adaptation. *American Journal of Agricultural Economics* 101, 172–192.
- Lamichhane J.R., Alletto L., Cong W., Dayoub E., Maury P., Plaza-Bonilla D., Reckling M., Saia S., Soltani E., Tison G., Debaeke P., 2023. Relay cropping for sustainable intensification of agriculture across temperate regions: crop management challenges and future research priorities. *Field Crops Research* 291, 108795
- Lecomte V., 2009. Tournesol et soja : réussir une culture dérobée. *Perspectives Agricoles* 357, 93-95.
- Le Gall C., Lecomte V., Wagner D., 2022. Oilseed and protein crops grown in French organic farms: an overview of cultivation practices for sunflower and soybean. *OCL - Oilseeds & fats Crops and Lipids* 29, 4.
- Lithourgidis A.S., Dordas C.A., Damalas C.A., Vlachostergios D.N., 2011. Annual intercrops: an alternative pathway for sustainable agriculture. *Australian Journal of Crop Science* 5, 396–410.
- Liu R., Wells M.S., Garcia y Garcia A., 2020. Relay and sequential cropping corn with winter oilseed crops in northern climates. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 116, 195–203.
- Mestries E., Desanlis M., Seassau C., Moinard J., Debaeke P., Dechamp-Guillaume G., 2011. Impact de la conduite de culture sur les maladies du tournesol. *Innovations Agronomiques* 14, 91-108.
- Morand N., Chambalier C., Tendrille R., Mounier P., Dupic G., Faure P., Lacour C., Violleau S., Zapata J., Pirot A., 2013. Guide cultures dérobées fourragères. *Chambre d'Agriculture du Puy-de-Dôme*, 14 p.
- Page E.R., Meloch S., Larsen J., 2019. Evaluating the potential for double cropping in Canada: effect of seeding date and relative maturity on the development and yield of maize, white bean, and soybean. *Canadian Journal of Plant Science* 99, 751-760.
- Pitchers J., Ferrand N., Pull M., Minette S., Abella M., Debaeke P., 2023. Opportunities and risks of double cropping in southwestern France with a focus on soybean and sunflower crops. *OCL - Oilseeds & fats Crops and Lipids* 30, 16.
- Reddy B.N., Suresh G., 2009. Crop diversification with oilseed crops for maximizing productivity, profitability and resource conservation. *Indian Journal of Agronomy* 54, 206–214.
- Schipanski M.E., Barbercheck M., Douglas M.R., Finney D.M., Haider K., Kaye J.P., Kemanian A.R., Mortensen D.A., Ryan M.R., Tooker J., White C., 2014. A framework for evaluating ecosystem services provided by cover crops in agroecosystems. *Agricultural Systems* 125, 12–22.
- Schnitkey G., 2018. Revised 2018 Corn and Soybean Budgets. Department of Agricultural and Consumer Economics, University of Illinois at Urbana-Champaign. *Farmdoc daily* (8), 24, February 13, 2018.
- Schoving C., Alric F., Berger M., Chambert C., Champolivier L., Colombet C., Gras A., Jeanson P., Labalette F., Marchand D., Stöckle C.O., Debaeke P., Maury P., 2019. Comprendre et prédire la phénologie du soja pour adapter la culture à de nouveaux environnements thermiques et photopériodiques. *Innovations Agronomiques* 74, 1-14.
- Schoving C., Stöckle C., Colombet C., Champolivier L., Debaeke P., Maury P., 2020. Combining simple phenotyping and photothermal algorithm for the prediction of soybean phenology: application to a range of common cultivars grown in Europe. *Frontiers in Plant Science* 10, 1755.



Seifert C.A., Lobell D.B., 2015. Response of double cropping suitability to climate change in the United States. *Environmental Research Letters* 10, 024002.

Shapiro B.I., Brorsen B.W., Doster D.H., 1992. Adoption of double-cropping soybeans and wheat. *Journal of Agricultural and Applied Economics* 24, 33–40.

Simon-Miquel G., Reckling M., Lampurlanes J., Plaza-Bonilla D., 2023. A win-win situation – Increasing protein production and reducing synthetic N fertilizer use by integrating soybean into irrigated Mediterranean cropping systems. *European Journal of Agronomy* 146: 126817

Tanveer M., Anjum S.A., Hussain S., Cerdà A., Ashraf U., 2017. Relay cropping as a sustainable approach: problems and opportunities for sustainable crop production. *Environmental Science and Pollution Research* 24, 6973–6988.

Tittonell P., 2014. Ecological intensification of agriculture—sustainable by nature. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 8, 53–61.

Vlachostergios D.N., Noulas C., Baxevanos D., Raptopoulou C.G., Aggelopoulos V., Karanika C., Kantartzi S.K., Mavromatis A.G., 2021. Response of early maturity soybean cultivars to row spacing in full-season crop and double-crop systems. *Plant, Soil and Environment* 67, 18-25.


Wang J., Wang E., Yang X., Zhang F., Yin H., 2012. Increased yield potential of wheat-maize cropping system in the North China Plain by climate change adaptation. *Climatic Change* 113, 825–840.

Wauters V.M., Grossman J.M., Pfeiffer A., Cala R., 2021. Ecosystem services and cash crop tradeoffs of summer cover crops in northern region organic vegetable rotations. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 5, 635955

Xu J., Gao J., de Holanda H.V., Rodríguez L.F., Caixeta-Filho J.V., Zhong R., Jiang H., Li H., Du Z., Wang X., Wang S., Ting K.C., Ying Y., Lin T., 2021. Double cropping and cropland expansion boost grain production in Brazil. *Nature Food* 2, 264–273.

Yamane K., Ikoma A., Iijima M., 2016. Performance of double cropping and relay intercropping for black soybean production in small-scale farms. *Plant Production Science* 19, 449–457.

Zhang L., Spiertz J.H.J., Zhang S., Li B., van der Werf W., 2008. Nitrogen economy in relay intercropping systems of wheat and cotton. *Plant and Soil* 303, 55–68.



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 4.0)
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>
 Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations Agronomiques* et son DOI, la date de publication.