



HAL
open science

Modéliser l'impact du changement climatique et de l'adaptation sur les légumineuses à graines en Europe : synthèse et perspectives

Marie Marteau-Bazouni, Marie-Hélène Jeuffroy, Nicolas Guilpart

► **To cite this version:**

Marie Marteau-Bazouni, Marie-Hélène Jeuffroy, Nicolas Guilpart. Modéliser l'impact du changement climatique et de l'adaptation sur les légumineuses à graines en Europe : synthèse et perspectives. Innovations Agronomiques, 2024, 93, pp.121-133. 10.17180/ciag-2024-vol93-art10 . hal-04583740

HAL Id: hal-04583740

<https://hal.inrae.fr/hal-04583740v1>

Submitted on 22 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



Modéliser l'impact du changement climatique et de l'adaptation sur les légumineuses à graines en Europe : synthèse et perspectives

Marie MARTEAU-BAZOUNI^{1*}, Marie-Hélène JEUFFROY¹, Nicolas GUILPART¹

¹ Université Paris-Saclay, AgroParisTech, INRAE, UMR Agronomie, 91120, PALAISEAU, France

Correspondance : marie.marteau-bazouni@inrae.fr

Résumé

La culture de légumineuses à graines est un levier majeur pour l'atténuation du changement climatique. Cependant, les connaissances sont encore peu nombreuses sur la capacité d'adaptation de ces espèces à des stress climatiques de plus en plus fréquents. Cette synthèse analyse 83 études qui simulent l'impact du changement climatique futur et de leviers d'adaptation sur les performances des légumineuses à graines en Europe. Ces simulations indiquent une expansion des zones favorables à la culture du soja dans le nord de l'Europe et une diminution du rendement dans d'actuels bassins de production, ainsi qu'un effet positif de plusieurs leviers d'adaptation sur le rendement des légumineuses à graines. La modélisation participative semble un outil pertinent pour compléter les connaissances existantes avec des simulations répondant aux besoins des acteurs.

Mots-clés : soja, pois, légumineuses à graines, protéagineux, modélisation, revue de littérature

Abstract: Modelling the impact of climate change and adaptation on grain legume crops in Europe: overview and prospects

Grain legume cultivation has been identified as a key lever to mitigate climate change. However, there is still a lack of knowledge regarding how grain legumes will respond to an increasing frequency of climatic stresses. This overview includes 83 studies that simulate the impact of future climate change and adaptation options on grain legume performance in Europe. The studies suggest an expansion of the area suitable for soybean cultivation towards northern Europe and yield losses in current production hotspots. Additionally, several adaptation options have been found to have a positive impact on grain legume yield. Participatory modelling involving various stakeholders can contribute to filling the gaps in existing knowledge.

Keywords: soybean, pea, grain legumes, pulses, modelling, review

1 Introduction

L'augmentation des surfaces cultivées en légumineuses est souvent proposée comme un levier incontournable de la transition agroécologique en Europe (Cusworth et al., 2021; Magrini et al., 2018). Les nombreux bénéfices agronomiques et environnementaux associés à ces cultures sont aujourd'hui bien documentés. Leur capacité à fixer l'azote atmosphérique permet une réduction de l'utilisation d'engrais azotés à l'échelle de la culture et de la rotation, ce qui entraîne une réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) et de la consommation d'énergies fossiles (Costa et al., 2021; Jensen & Hauggaard-Nielsen, 2003). Leur insertion dans une rotation comporte d'autres bénéfices tels que la rupture des cycles des bioagresseurs majeurs des cultures dominantes (Jensen et al., 2010; Köpke & Nemecek, 2010). Les légumineuses à graines (soja, pois, féverole, haricot, pois chiche, lentille, lupin), qui présentent un intérêt à la fois pour la nutrition animale et humaine, répondent en outre à des enjeux de santé humaine (Foyer et al., 2016; Rööös et al., 2020) et de souveraineté protéique (Watson et al.,



2017). Ces cultures sont au cœur de plusieurs politiques publiques à l'échelle Européenne (e.g., stratégie Farm to Fork (European Commission, 2020)) et nationale (e.g., stratégie nationale protéines végétales en France (MAA, 2020)).

La culture de légumineuses à graines a été bien identifiée comme une technique permettant d'atténuer le changement climatique (IPCC, 2023). En revanche, la capacité d'adaptation de ces espèces à des stress climatiques de plus en plus fréquents a été moins étudiée. Les légumineuses à graines, souvent cultivées comme cultures de printemps, sont en effet sensibles à de nombreux stress biotiques et abiotiques (Farooq et al., 2017; Gogoi et al., 2018), dont l'occurrence pourrait augmenter dans le futur (Ahmed et al., 2022; Vadez et al., 2012). Bien que le changement climatique soit mentionné comme un frein au développement de systèmes de culture riches en légumineuses (Joya & Hamon, 2021), peu de connaissances sont aujourd'hui disponibles sur la manière dont ces espèces seront impactées par ces changements.

L'utilisation de modèles (modèles basés sur des processus, modèles statistiques ou modèles de niche écologique) permet d'étudier la réponse des cultures à l'évolution simultanée de plusieurs facteurs climatiques (température, précipitations, concentration en CO₂ atmosphérique). Ces modèles, couplés à des projections climatiques, permettent ainsi de quantifier l'impact du changement climatique sur les cultures et d'évaluer plusieurs modalités d'adaptation des techniques agricoles. Récemment, plusieurs auteurs ont mobilisé ces techniques de modélisation pour estimer l'impact du changement climatique futur sur les légumineuses à graines en Europe. Nous avons synthétisé ces travaux dans une revue de la littérature regroupant 83 articles scientifiques (Marteau-Bazouni et al., 2024) : 40 études simulant l'impact du changement climatique sur les performances des légumineuses à graines en Europe sans adaptation et 53 études simulant l'impact de différents leviers d'adaptation sur ces espèces (10 études appartiennent aux deux corpus).

Nous produisons ici une synthèse de cette revue de la littérature, à destination des acteurs impliqués dans le développement des légumineuses à graines en France et en Europe. Nous présentons dans un premier temps l'impact du changement climatique sur ces cultures si aucune mesure d'adaptation n'est entreprise. Les résultats des simulations, bien que très incomplets, suggèrent un impact inégal en fonction des régions d'Europe, notamment pour le soja. Nous évaluons ensuite le potentiel de différents leviers d'adaptation, dont la mise en œuvre peut permettre de compenser les effets négatifs du changement climatique. Enfin, nous discutons les bénéfices de la modélisation participative pour compléter les résultats présentés dans cette synthèse.

2 Des légumineuses à graines impactées par le changement climatique

L'analyse présentée dans cette section s'appuie sur la synthèse de 40 études qui simulent l'impact du changement climatique sur les légumineuses à graines en Europe si aucune mesure d'adaptation n'est mise en œuvre. L'impact du changement climatique est mesuré sur le rendement et/ou l'évolution de la niche écologique favorable à la culture du soja (32 articles, soit 80 % des études), du pois protéagineux (5 articles ; 13 %), du haricot (5 articles ; 13 %), de la féverole (2 articles), du pois chiche, de la lentille et du lupin (1 article chacun). Le lecteur est invité à se référer à l'article de Marteau-Bazouni et al. (2024) pour plus de détails sur le corpus d'articles.

2.1 Une expansion des zones favorables au soja vers le nord de l'Europe

Sur l'ensemble des scénarios de changement climatique considérés, plus de 75 % des études du corpus simulent un effet positif du changement climatique sur le rendement du soja en Europe du Nord (sud de la Scandinavie, Pays Baltes, Pologne, Allemagne, Danemark, Royaume-Uni) dans la seconde moitié du 21^{ème} siècle (Coleman et al., 2021; Feng et al., 2021; Guilpart et al., 2022; Manners et al., 2020; Rosenzweig et al., 2014; Soares et al., 2021; Tatsumi et al., 2011) (Figure 1b). L'augmentation des



températures permettrait donc, à terme, une expansion des zones de culture vers le nord du continent. Les résultats pour la première moitié du 21^{ème} siècle sont plus incertains (Figure 1a), soit parce que le nombre d'études dans certaines régions est trop faible pour conclure, soit parce que les résultats diffèrent d'une étude à l'autre.

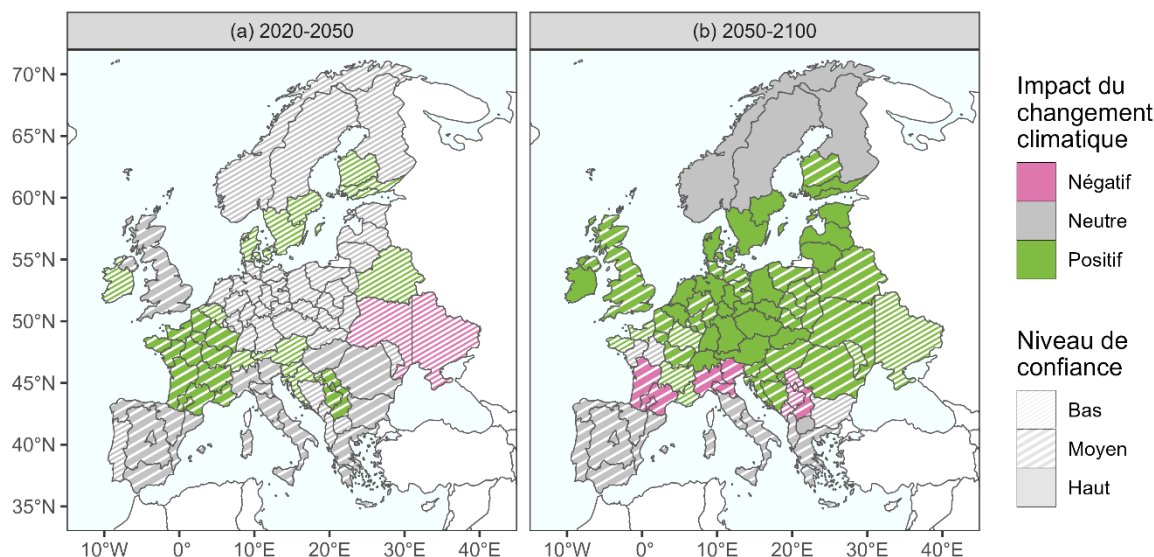


Figure 1 : Impact du changement climatique sur les performances du soja en Europe dans un futur proche (2020-2050) (a) et dans un futur lointain (2050-2100) (b) par rapport au passé récent (1960-2010). L'impact du changement climatique (positif, neutre ou négatif) correspond à l'impact simulé par une majorité relative d'études du corpus. Le niveau de confiance pour une région donnée dépend à la fois du nombre d'études réalisées dans cette région (« Bas » : nombre d'études inférieur ou égal à trois ; « Moyen » : inférieur ou égal à cinq ; « Haut » : supérieur à cinq) et du niveau de consensus entre ces études (« Bas » : strictement moins de 50 % des études aboutissent au même résultat ; « Moyen » : entre 50 % et 75 % ; « Haut » : plus de 75 %). Par exemple, plus de six études ont été réalisées en Autriche et au moins 75 % d'entre elles projettent un effet positif du changement climatique sur le soja. N.B. : Les résultats synthétisés ici regroupent plusieurs scénarios de changement climatique.

Ces simulations présentent plusieurs limites. Tout d'abord, les résultats de ces études sont souvent présentés sous la forme de cartes représentant soit des indices (généralement compris entre 0 et 1) quantifiant à quel point le climat est favorable à la culture du soja, soit des valeurs relatives d'évolution du rendement (par exemple +X % en 2100 par rapport à 2010). Cette présentation constitue une limite à leur utilisation, car elle donne peu d'informations sur le rendement potentiel, ainsi que sur la marge économique qui peut être attendue de ces cultures. Par conséquent, un effet positif du changement climatique en Europe du Nord ne se traduira pas nécessairement par une adoption du soja dans cette région.

Il est également important de noter que la majorité des études résumées Figure 1 ne prennent pas en compte l'évolution de la pression biotique (adventices, ravageurs, agents pathogènes). Seules trois études du corpus évaluent l'impact du changement climatique sur les bioagresseurs du soja. Ces simulations indiquent un risque accru de parasitisme par trois espèces du genre *Cuscuta* (Cai et al., 2022) et une expansion des zones favorables à la punaise à bandes rouges *Piezodorus guildinii* (Chen et al., 2023) et à l'agromyze des tiges du soja *Melanagromyza sojae* (Marchioro & Krechemer, 2023). Des recherches supplémentaires sont donc nécessaires pour évaluer les pertes de rendement résultant de l'augmentation de la pression biotique.



2.2 Des baisses de rendement probables dans des bassins actuels de production de soja

A l'inverse, la synthèse des études du corpus permet d'identifier un risque élevé de baisse de rendement dans d'actuels bassins de production de soja, situés principalement en France, en Italie et en Europe du Sud-Est (FAOSTAT, 2023). Une diminution du rendement est ainsi simulée dans le sud-ouest de la France et le nord de l'Italie dans la seconde moitié du 21^{ème} siècle (Deryng et al., 2014; Guilpart et al., 2022; Jägermeyr et al., 2021; Lesk et al., 2021; Osborne et al., 2013; Tatsumi et al., 2011) (Figure 1b).

Il est difficile de quantifier précisément cette diminution, dont l'ordre de grandeur varie en fonction des conditions climatiques locales, des scénarios de changement climatique et des modèles utilisés. Dans le sud-ouest de la France, les baisses de rendement estimées par Guilpart et al. (2022) (soja non-irrigué) et Tatsumi et al. (2011) (combinaison de soja irrigué et non-irrigué) varient entre -10 et -30 % dans les années 2050 en fonction des zones et des scénarios climatiques considérés et entre -10 et -60 % dans les années 2090. L'effet négatif du changement climatique s'accroît dans des scénarios « pessimistes » caractérisés par des trajectoires d'émissions élevées de GES qui engendrent une forte hausse des températures. En Italie, Osborne et al. (2013) simulent des pertes de rendement importantes (-30 à -70 % en 2050 avec un scénario de réchauffement intermédiaire A1B), tandis qu'une étude plus récente de Jägermeyr et al. (2021) aboutit à un résultat plus optimiste (+10 à -20 % à la fin du siècle avec un scénario de fort réchauffement RCP8.5).

A l'échelle de l'Europe, il est difficile d'évaluer si le déplacement des zones favorables à la culture de soja compensera la diminution du rendement dans les bassins de production actuels.

2.3 Encore beaucoup d'incertitudes pour les autres légumineuses à graines

Le très petit nombre d'études modélisant l'impact du changement climatique sur les autres espèces de légumineuses à graines (9 articles) et la dispersion des résultats ne permettent pas de tirer une conclusion à l'échelle de l'Europe. Comme pour le soja, un effet positif du changement climatique est simulé pour plusieurs espèces en Europe du Nord : hausse de rendement pour le pois de printemps en Finlande (Peltonen-Sainio et al., 2009) et en Allemagne (Nendel et al., 2014), expansion vers le nord des zones favorables à la culture du pois, de la féverole, de la lentille, du lupin (Manners et al., 2020) et du haricot (Manners et al., 2020; Ramirez-Cabral et al., 2016). A l'inverse, des baisses de rendement sont simulées dans le sud et le centre de l'Europe, notamment pour le pois de printemps en Italie (Ravasi et al., 2020) et dans le sud-ouest de la France (Falconnier et al., 2020) ou pour le haricot en Grèce (van der Schriek et al., 2020).

3 Des leviers d'adaptation qui peuvent permettre de compenser les effets négatifs du changement climatique

L'identification de leviers d'adaptation est nécessaire pour permettre l'augmentation des surfaces en légumineuses à graines malgré le changement climatique. L'analyse présentée dans cette section s'appuie sur la synthèse de 53 études qui simulent l'impact du changement climatique sur le soja (41 articles, soit 77 % des études), le haricot (5 articles), le pois chiche (4 articles), le pois protéagineux (2 articles), la féverole (1 article) et le lupin (1 article), avec et sans adaptation. Les leviers d'adaptation étudiés sont l'irrigation, le décalage des dates de semis, le choix des variétés et des précocités, la sélection variétale, la gestion de la fertilité du sol (fertilisation, gestion des résidus de culture), la mise en place de couverts végétaux, la réduction du travail du sol, la modification de la densité de semis, la mise en place d'une double culture blé-soja et des combinaisons d'un ou plusieurs de ces leviers (Figure 2).

Très peu d'études ont simulé l'impact de ces leviers sur les performances des légumineuses à graines en Europe (7 études). En revanche, d'autres études ont été menées dans des zones du globe où le climat est proche du climat européen (27 études en Amérique du Nord, 5 en Iran, 4 au Brésil, 4 en Australie et



6 à l'échelle mondiale). L'exploitation de ces résultats donne un ordre de grandeur des bénéfices qu'on peut attendre de la mise en œuvre de différents leviers d'adaptation sur les performances des légumineuses à graines. Comme dans la section précédente, une grande partie des résultats présentés ici s'appliquent au soja, en raison d'une nette prédominance de cette espèce sur les autres espèces de légumineuses à graines étudiées dans la littérature (Figure 2).

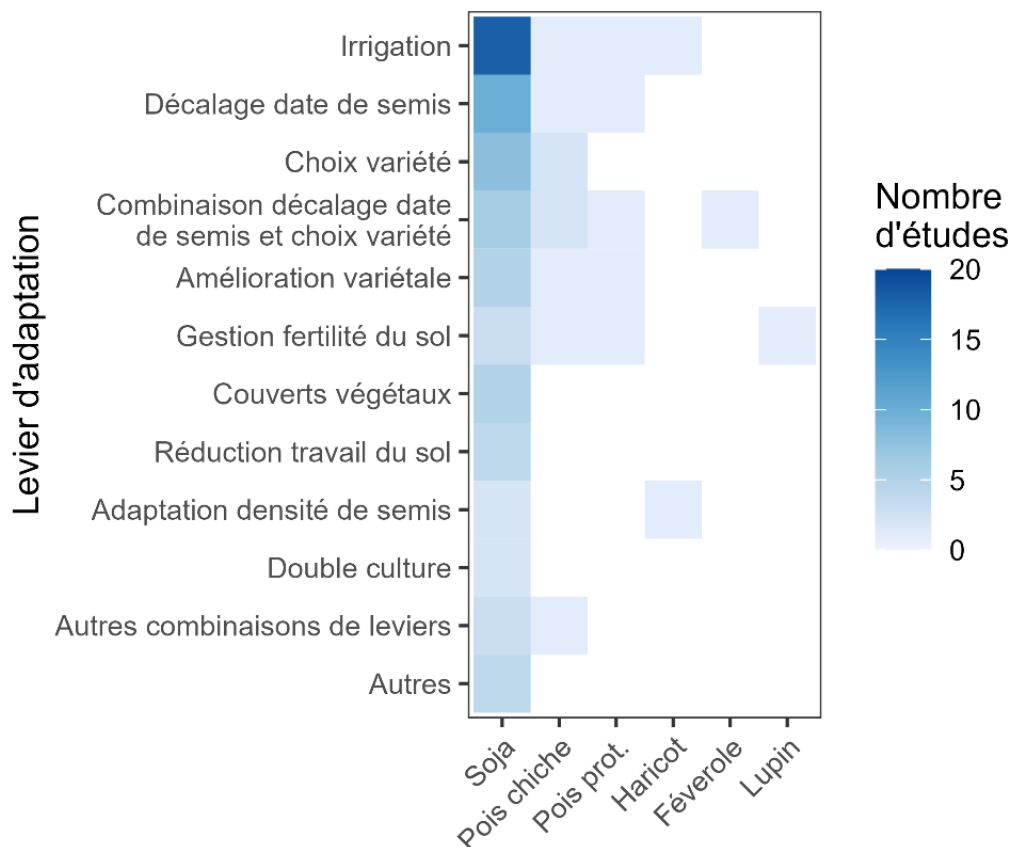


Figure 2 : Nombre d'études par espèce et levier d'adaptation. Une même étude peut apparaître dans plusieurs catégories.

3.1 Des leviers qui offrent un potentiel d'augmentation de rendement mais dont l'impact environnemental n'est pas modélisé

Une majorité d'études simulent un effet positif de l'irrigation, du décalage des dates de semis combiné à un choix de précocité adapté et de la sélection variétale sur le rendement des légumineuses à graines dans un contexte de changement climatique. Les hausses de rendement simulées varient en fonction des régions étudiées, des scénarios de changement climatique et des modèles utilisés (Figure 3).

Dans 93 % des articles du corpus, l'irrigation a un effet positif sur le rendement des légumineuses à graines, avec des hausses de rendement très variables (+7 à +142 % par rapport à une culture non irriguée) (Figure 3). Une étude toutefois simule une baisse du rendement du soja irrigué (-5 % en moyenne par rapport au soja non-irrigué à la fin du siècle), possiblement due à une perte d'éléments minéraux du sol par ruissellement (Paul et al., 2020).

Optimiser le choix de la précocité des variétés et décaler la date de semis a également un effet positif sur le rendement, avec des bénéfices particulièrement élevés lorsque ces deux leviers sont combinés (+20 à +280 % de rendement par rapport à des choix de date de semis et précocité sous-optimaux). Substituer



des cultures de printemps par des cultures d'hiver pourrait également constituer un levier pour s'adapter à des stress hydriques et thermiques plus fréquents. En effet, une étude simule des rendements plus élevés et plus stables pour le pois et la féverole d'hiver comparés au pois de printemps (Falconnier et al., 2020).

Enfin, l'utilisation de modèles de culture permet de simuler l'effet d'une sélection variétale virtuelle sur le rendement des légumineuses à graines. En faisant varier les paramètres contrôlant la croissance et le développement des cultures (e.g., somme de température entre deux stades physiologiques (Fu et al., 2016; Jing et al., 2017; Osborne et al., 2013; Ravasi et al., 2020), paramètres contrôlant la croissance des racines et la transpiration (Battisti et al., 2017)), les modélisateurs peuvent identifier des génotypes plus adaptées aux conditions climatiques futures. Les caractéristiques de ces nouveaux génotypes varient localement. Aux Etats-Unis, par exemple, allonger la durée du cycle du soja permet de compenser le raccourcissement des cycles induit par l'élévation des températures et d'augmenter le rendement (Fu et al., 2016; Jing et al., 2017). A l'inverse, des génotypes plus précoces avec une floraison anticipée sont plus performants dans des régions caractérisées par une plus forte occurrence de stress thermiques et hydriques (soja dans le sud-ouest de la France (Minoli et al., 2022), pois en Italie (Ravasi et al., 2020), pois chiche en Iran (Soltani & Sinclair, 2012)). L'impact de cette sélection variétale « virtuelle » sur le rendement varie entre +0 (effet neutre) et +43 %.

Les résultats de ces simulations sont toutefois limités par le très faible nombre d'études disponibles sur des espèces comme le pois, le haricot, la féverole et le lupin (Figure 2). Par ailleurs, seuls les gains de rendement sont évalués ici : l'analyse ne prend en compte ni la faisabilité technique (e.g., vraisemblance des génotypes virtuels simulés, impact du décalage de la date de semis sur le reste de l'itinéraire technique) ni le coût de mise en place de ces leviers (e.g., investissement et coût de l'irrigation). Des travaux additionnels sont également nécessaires pour évaluer l'impact environnemental de ces leviers, en particulier de l'irrigation dans un contexte de pression accrue sur les ressources en eau.

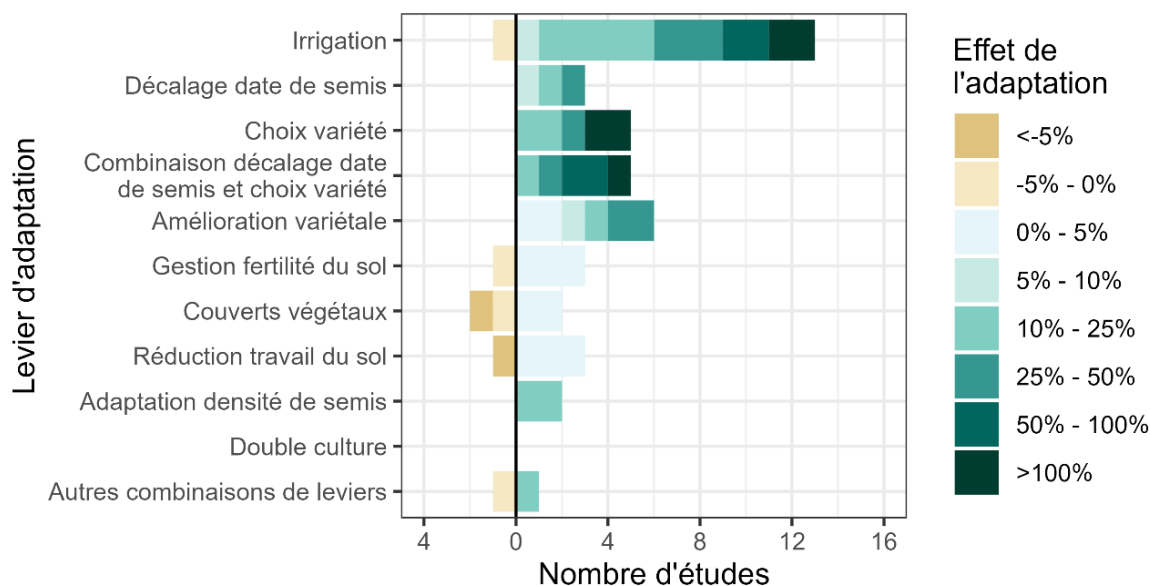


Figure 3 : Effet de différents leviers d'adaptation sur le rendement des légumineuses à graines. L'effet de l'adaptation est défini comme suit : $\text{Effet de l'adaptation} = (\text{Rendement avec adaptation} - \text{Rendement sans adaptation}) / \text{Rendement sans adaptation}$. Faute de données brutes accessibles, seules 34 études sur 53 ont pu être intégrées dans cette figure.



3.2 Des leviers neutres pour le rendement mais associés à des services environnementaux

Certains leviers tels que la réduction du travail du sol ou l'utilisation de couverts végétaux sont caractérisés par un effet neutre ou légèrement négatif sur le rendement du soja (-7 à +3 % pour l'implémentation de couverts végétaux, -6 à +0 % pour un travail du sol réduit). Si elle ne se traduit pas par une augmentation significative du rendement, la mise en place de ces leviers permet de réduire les pertes de nutriments par lixiviation et ruissellement (Malone et al., 2020; Panagopoulos et al., 2014, 2015), l'érosion des sols (Basche et al., 2016; Panagopoulos et al., 2014, 2015; Parajuli et al., 2016), les émissions de N₂O (Basche et al., 2016; He et al., 2018), et de conserver le carbone du sol (Basche et al., 2016). Ces leviers sont donc proposés comme des solutions à la fois d'atténuation et d'adaptation, puisqu'ils permettent une amélioration à long terme de la qualité des sols et une réduction de la pollution des eaux sans provoquer de baisse significative du rendement. Il est à noter que peu d'études du corpus ont modélisé ces leviers, et que leur effet a été simulé uniquement sur le soja (Figure 2).

4 Vers davantage de modélisation participative pour guider l'adaptation des légumineuses à graines au changement climatique ?

Les connaissances présentées dans cette synthèse sur l'impact du changement climatique et de l'adaptation sur les légumineuses à graines en Europe sont très fragmentaires. La modélisation, largement utilisée pour des cultures majeures comme le blé ou le maïs (Carr et al., 2022; Challinor et al., 2014; Knox et al., 2016), est encore peu mobilisée pour des cultures « mineures » telles que les légumineuses à graines. Au sein même de cette famille, on constate un déséquilibre important entre le nombre d'études sur le soja (80 % du corpus) et le nombre d'études sur les autres espèces de légumineuses à graines. Un effort de recherche supplémentaire est donc nécessaire pour guider l'adaptation de cultures comme le pois protéagineux, la féverole, la lentille ou le pois chiche.

Hybrider modélisation et connaissances locales (Beveridge et al., 2018), par exemple dans le cadre de modélisations participatives (Naulleau et al., 2022; Pelzer et al., 2020), permettrait de combler les lacunes dans la littérature scientifique et de proposer des résultats de modélisation plus pertinents pour les acteurs impliqués dans le développement des légumineuses à graines. Cette approche participative n'a été mise en œuvre dans aucune des études de notre corpus et n'a, à notre connaissance, jamais été utilisée en Europe pour étudier l'impact du changement climatique sur les légumineuses à graines. Une meilleure intégration des acteurs dans le processus de modélisation serait doublement bénéfique : cela permettrait, d'une part, de bénéficier des connaissances et données produites localement pour améliorer les performances des modèles, et, d'autre part, d'exploiter les techniques de modélisation pour guider localement l'adaptation, par exemple en comparant différents leviers, en identifiant des combinaisons de leviers pertinentes et en évaluant leurs effets sur le long terme.

Une approche participative contribuerait à améliorer l'évaluation de l'impact du changement climatique et la modélisation des stratégies d'adaptation. Identifier les besoins des acteurs permettrait notamment de guider le choix des indicateurs, des échelles spatiales et des horizons temporels utilisés dans les modèles pour répondre davantage à ces besoins. Identifier les leviers d'adaptation déjà mis en œuvre par les acteurs, ainsi que les pistes envisagées pour le futur, permettrait d'élargir la gamme de leviers modélisés et de corriger les biais existants, notamment la focalisation d'un grand nombre de simulations sur un petit nombre de leviers tels que l'irrigation et le décalage des dates de semis. Une approche participative permettrait en outre d'améliorer l'évaluation de ces leviers grâce au développement d'analyses multicritères intégrant des indicateurs répondant aux objectifs et aux besoins des acteurs (indicateurs de performance et de stabilité des systèmes de culture, indicateurs économiques, contribution des leviers d'adaptation à l'atténuation, etc.) (Beveridge et al., 2018; Pelzer et al., 2020).



5 Conclusion

Cette synthèse souligne l'importance de prendre en compte l'impact du changement climatique dans les projets de développement des légumineuses à graines et met l'accent sur la nécessité de considérer simultanément des objectifs d'adaptation et d'atténuation dans ces projets, ce qui est rarement le cas actuellement. En effet, les légumineuses à graines, comme de nombreuses autres espèces, seront vraisemblablement affectées par le changement climatique. Tandis que l'augmentation des températures peut constituer une opportunité pour le soja dans le nord de l'Europe dans la seconde moitié du 21^{ème} siècle, des pertes de rendement sont simulées dans des bassins de productions tels que le nord de l'Italie, le sud-ouest de la France et l'Europe du Sud-Est si aucune adaptation n'est mise en place. Plusieurs leviers d'adaptation peuvent toutefois permettre de compenser les effets négatifs du changement climatique sur le rendement de ces cultures.

Les connaissances présentées dans cette synthèse sont très fragmentaires et pourraient être complétées par des travaux additionnels visant à : réduire le déséquilibre entre le nombre d'études sur soja et les autres espèces de légumineuses à graines ; améliorer la prise en compte de la pression biotique future dans les simulations ; élargir la gamme des leviers d'adaptation simulés ; évaluer la faisabilité technique et économique de ces leviers et leur impact environnemental. Des approches faisant dialoguer modélisation et connaissances locales, par exemple à travers une modélisation participative, semblent des outils pertinents pour compléter les connaissances existantes avec des simulations répondant aux besoins des acteurs.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayaient 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.

ORCID des auteurs

Marie Marteau-Bazouni : [0009-0006-0108-0788](https://orcid.org/0009-0006-0108-0788), Marie-Hélène Jeuffroy : [0000-0003-0520-9172](https://orcid.org/0000-0003-0520-9172), Nicolas Guilpart : [0000-0003-3804-0211](https://orcid.org/0000-0003-3804-0211)

Contributions des auteurs

Rédaction - version originelle : Marie Marteau-Bazouni

Rédaction - Révision et correction : Marie-Hélène Jeuffroy, Nicolas Guilpart

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



Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir pas de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Références bibliographiques :

- Ahmed M., Sameen A., Parveen H., Ullah M. I., Fahad S., Hayat R. (2022). Climate Change Impacts on Legume Crop Production and Adaptation Strategies. In *Global Agricultural Production: Resilience to Climate Change* (pp. 149–181). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-14973-3_5
- Basche A. D., Archontoulis S. V., Kaspar T. C., Jaynes D. B., Parkin T. B., Miguez F. E. (2016). Simulating long-term impacts of cover crops and climate change on crop production and environmental outcomes in the Midwestern United States. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 218, 95–106. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.11.011>
- Battisti R., Sentelhas P. C., Boote K. J., Gil, G. M., Farias, J. R. B., & Basso, C. J. (2017). Assessment of soybean yield with altered water-related genetic improvement traits under climate change in Southern Brazil. *European Journal of Agronomy*, 83, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.11.004>
- Beveridge L., Whitfield S., Challinor A. (2018). Crop modelling: towards locally relevant and climate-informed adaptation. *Climatic Change*, 147(3–4), 475–489. <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2160-z>
- Cai C., Xiao J., Wan J., Ren Z., Van Kleunen M., Li J. (2022). Implications of climate change for environmental niche overlap between five *Cuscuta* pest species and their two main Leguminosae host crop species. *Weed Science*, 70(5), 543–552. <https://doi.org/10.1017/wsc.2022.45>
- Carr T. W., Mkuhlani S., Segnon A. C., Ali Z., Zougmore R., Dangour A. D., Green R., Scheelbeek P. (2022). Climate change impacts and adaptation strategies for crops in West Africa: A systematic review. *Environmental Research Letters*, 17(5). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac61c8>
- Challinor A. J., Watson J., Lobell D. B., Howden S. M., Smith D. R., Chhetri N. (2014). A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation. *Nature Climate Change*, 4(4), 287–291. <https://doi.org/10.1038/nclimate2153>
- Chen J., Jiang K., Wang S., Li Y., Zhang Y., Tang Z., Bu W. (2023). Climate change impacts on the potential worldwide distribution of the soybean pest, *Piezodorus guildinii* (Hemiptera: Pentatomidae). *Journal of Economic Entomology*, 116(3), 761–770. <https://doi.org/10.1093/jeetoad058>
- Coleman K., Whitmore A. P., Hassall K. L., Shield I., Semenov M. A., Dobermann A., Bourhis Y., Eskandary A., Milne A. E. (2021). The potential for soybean to diversify the production of plant-based protein in the UK. *Science of the Total Environment*, 767, 144903. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144903>
- Costa M. P., Reckling M., Chadwick D., Rees R. M., Saget S., Williams M., Styles D. (2021). Legume-Modified Rotations Deliver Nutrition With Lower Environmental Impact. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.656005>
- Cusworth G., Garnett T., Lorimer J. (2021). Legume dreams: The contested futures of sustainable plant-based food systems in Europe. *Global Environmental Change*, 69(February), 102321. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2021.102321>



- Deryng D., Conway D., Ramankutty N., Price J., Warren R. (2014). Global crop yield response to extreme heat stress under multiple climate change futures. *Environmental Research Letters*, 9(3), 034011. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/3/034011>
- European Commission. (2020). *A Farm to Fork Strategy*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52020DC0381>
- Falconnier G. N., Vermue A., Journet E.-P., Christina M., Bedoussac L., Justes E. (2020). Contrasted response to climate change of winter and spring grain legumes in southwestern France. *Field Crops Research*, 259, 107967. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107967>
- FAOSTAT. (2023). *FAOSTAT database (domains: Crops and livestock products and Land use)*. <https://www.fao.org/faostat/en/>
- Farooq M., Gogoi N., Barthakur S., Baroowa B., Bharadwaj N., Alghamdi S. S., Siddique K. H. M. (2017). Drought Stress in Grain Legumes during Reproduction and Grain Filling. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 203(2), 81–102. <https://doi.org/10.1111/jac.12169>
- Feng L., Wang H., Ma X., Peng H., Shan J. (2021). Modeling the current land suitability and future dynamics of global soybean cultivation under climate change scenarios. *Field Crops Research*, 263(January 2020), 108069. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108069>
- Foyer C. H., Lam H. M., Nguyen H. T., Siddique K. H. M., Varshney R. K., Colmer T. D., Cowling W., Bramley H., Mori T. A., Hodgson J. M., Cooper J. W., Miller A. J., Kunert K., Vorster J., Cullis C., Ozga J. A., Wahlqvist M. L., Liang Y., Shou H., ... Considine M. J. (2016). Neglecting legumes has compromised human health and sustainable food production. *Nature Plants*, 2(8), 1–10. <https://doi.org/10.1038/NPLANTS.2016.112>
- Fu T., Ha B., Ko J. (2016). Simulation of CO₂ enrichment and climate change impacts on soybean production. *International Agrophysics*, 30(1), 25–37. <https://doi.org/10.1515/intag-2015-0069>
- Gogoi N., Farooq M., Barthakur S., Baroowa B., Paul S., Bharadwaj N., Ramanjulu S. (2018). Thermal Stress Impacts on Reproductive Development and Grain Yield in Grain Legumes. *Journal of Plant Biology*, 61(5), 265–291. <https://doi.org/10.1007/s12374-018-0130-7>
- Guilpart N., Iizumi T., Makowski D. (2022). Data-driven projections suggest large opportunities to improve Europe's soybean self-sufficiency under climate change. *Nature Food*, 3(4), 255–265. <https://doi.org/10.1038/s43016-022-00481-3>
- He W., Yang J. Y., Drury C. F., Smith W. N., Grant B. B., He P., Qian B., Zhou W., Hoogenboom G. (2018). Estimating the impacts of climate change on crop yields and N₂O emissions for conventional and no-tillage in Southwestern Ontario, Canada. *Agricultural Systems*, 159, 187–198. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.025>
- IPCC (2023). Food, Fibre and Other Ecosystem Products. In *Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability* (pp. 713–906). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.007>
- Jägermeyr J., Müller C., Ruane A. C., Elliott J., Balkovic J., Castillo O., Faye B., Foster I., Folberth C., Franke J. A., Fuchs K., Guarin J. R., Heinke J., Hoogenboom G., Iizumi T., Jain A. K., Kelly D., Khabarov N., Lange S., ... Rosenzweig C. (2021). Climate impacts on global agriculture emerge earlier in new generation of climate and crop models. *Nature Food*, 2(11), 873–885. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00400-y>
- Jensen E. S., Hauggaard-Nielsen H. (2003). How can increased use of biological N₂ fixation in agriculture benefit the environment? *Plant and Soil*, 252(1), 177–186. <https://doi.org/10.1023/A:1024189029226>
- Jensen E. S., Peoples M. B., Hauggaard-Nielsen H. (2010). Faba bean in cropping systems. *Field Crops Research*, 115(3), 203–216. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.10.008>



- Jing Q., Huffman T., Shang J., Liu J., Pattey E., Morrison M. J., Jégo G., Qian B. (2017). Modelling soybean yield responses to seeding date under projected climate change scenarios. *Canadian Journal of Plant Science*, 97(6). <https://doi.org/10.1139/CJPS-2017-0065>
- Joya R., Hamon J. (2021). *Freins et leviers logistiques au développement de systèmes de culture diversifiés et riches en légumineuses*. <https://agriculture.gouv.fr/freins-et-leviers-logistiques-au-developpement-de-systemes-de-culture-diversifies-et-riches-en-0>
- Knox J., Daccache A., Hess T., Haro D. (2016). Meta-analysis of climate impacts and uncertainty on crop yields in Europe. *Environmental Research Letters* (Vol. 11, Issue 11). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/11/113004>
- Köpke U., Nemecek T. (2010). Ecological services of faba bean. *Field Crops Research*, 115(3), 217–233. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.10.012>
- Lesk C., Coffel E., Winter J., Ray D., Zscheischler J., Seneviratne S. I., Horton R. (2021). Stronger temperature–moisture couplings exacerbate the impact of climate warming on global crop yields. *Nature Food*, 2(9), 683–691. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00341-6>
- MAA. (2020). *Lancement de la stratégie nationale en faveur du développement des protéines végétales - Communiqué de presse du 01/12/2020*. <https://agriculture.gouv.fr/lancement-de-la-strategie-nationale-en-faveur-du-developpement-des-proteines-vegetales>
- Magrini M. B., Anton M., Chardigny J. M., Duc G., Duru M., Jeuffroy M. H., Meynard J. M., Micard V., Walrand S. (2018). Pulses for Sustainability: Breaking Agriculture and Food Sectors Out of Lock-In. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2(October), 1–17. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2018.00064>
- Malone R., Garbrecht J., Busteed P., Hatfield J., Todey D., Gerlitz J., Fang Q., Sima M., Radke A., Ma L., Qi Z., Wu H., Jaynes D., Kaspar T. (2020). Drainage N loads under climate change with winter rye cover crop in a Northern Mississippi River Basin corn-soybean rotation. *Sustainability (Switzerland)*, 12(18), 1–18. <https://doi.org/10.3390/su12187630>
- Manners R., Varela-Ortega C., van Etten J. (2020). Protein-rich legume and pseudo-cereal crop suitability under present and future European climates. *European Journal of Agronomy*, 113(June 2018), 125974. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.125974>
- Marchioro C. A., Krechmer F. da S. (2023). Climatic niche shift and distribution of *Melanagromyza sojae* under current and future climate scenarios: does this species pose a risk to soybean production? *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 171(6), 461–474. <https://doi.org/10.1111/eea.13293>
- Marteau-Bazouni M., Jeuffroy M.-H., Guilpart N. (2024). Grain legume response to future climate and adaptation strategies in Europe: A review of simulation studies. *European Journal of Agronomy*, 153, 127056. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.127056>
- Minoli S., Jägermeyr J., Asseng S., Urfels A., Müller C. (2022). Global crop yields can be lifted by timely adaptation of growing periods to climate change. *Nature Communications*, 13(1), 7079. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-34411-5>
- Naulleau A., Gary C., Prévot L., Berteloot V., Fabre J. C., Crevoisier D., Gaudin R., Hossard L. (2022). Participatory modeling to assess the impacts of climate change in a Mediterranean vineyard watershed. *Environmental Modelling and Software*, 150(June 2021). <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105342>
- Nendel C., Kersebaum K. C., Mirschel W., Wenkel K. O. (2014). Testing farm management options as climate change adaptation strategies using the MONICA model. *European Journal of Agronomy*, 52, 47–56. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.09.005>
- Osborne T., Rose G., Wheeler T. (2013). Variation in the global-scale impacts of climate change on crop productivity due to climate model uncertainty and adaptation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 170, 183–194. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.07.006>



- Panagopoulos Y., Gassman P. W., Arriitt R. W., Herzmann D. E., Campbell T. D., Jha M. K., Kling C. L., Srinivasan R., White M., Arnold J. G. (2014). Surface water quality and cropping systems sustainability under a changing climate in the Upper Mississippi River Basin. *Journal of Soil and Water Conservation*, 69(6), 483–494. <https://doi.org/10.2489/jswc.69.6.483>
- Panagopoulos Y., Gassman P. W., Arriitt R. W., Herzmann D. E., Campbell T. D., Valcu A., Jha M. K., Kling C. L., Srinivasan R., White M., Arnold J. G. (2015). Impacts of climate change on hydrology, water quality and crop productivity in the Ohio-Tennessee River Basin. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 8(3), 1–18. <https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20150803.1497>
- Parajuli P. B., Jayakody P., Sassenrath G. F., Ouyang Y. (2016). Assessing the impacts of climate change and tillage practices on stream flow, crop and sediment yields from the Mississippi River Basin. *Agricultural Water Management*, 168, 112–124. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.02.005>
- Paul M., Dangol S., Kholodovsky V., Sapkota A. R., Negahban-Azar M., Lansing S. (2020). Modeling the Impacts of Climate Change on Crop Yield and Irrigation in the Monocacy River Watershed, USA. *Climate*, 8(12), 139. <https://doi.org/10.3390/cli8120139>
- Peltonen-Sainio P., Jauhiainen L., Hakala K., Ojanen H. (2009). Climate change and prolongation of growing season: Changes in regional potential for field crop production in Finland. *Agricultural and Food Science*, 18(3–4), 171–190. <https://doi.org/10.2137/145960609790059479>
- Pelzer E., Bonifazi M., Soulié M., Guichard L., Quinio M., Ballot R., Jeuffroy M. H. (2020). Participatory design of agronomic scenarios for the reintroduction of legumes into a French territory. *Agricultural Systems*, 184(December 2019). <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102893>
- Ramirez-Cabral N. Y. Z., Kumar L., Taylor S. (2016). Crop niche modeling projects major shifts in common bean growing areas. *Agricultural and Forest Meteorology*, 218–219, 102–113. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.12.002>
- 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. *Agricultural and Forest Meteorology*, 291(June). <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108081>
- Röös E., Carlsson G., Ferawati F., Hefni M., Stephan A., Tidåker P., Witthöft C. (2020). Less meat, more legumes: Prospects and challenges in the transition toward sustainable diets in Sweden. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 35(2), 192–205. <https://doi.org/10.1017/S1742170518000443>
- Rosenzweig C., Elliott J., Deryng D., Ruane A. C., Müller C., Arneth A., Boote K. J., Folberth C., Glotter M., Khabarov N., Neumann K., Piontek F., Pugh T. A. M., Schmid E., Stehfest E., Yang H., Jones J. W. (2014). Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(9), 3268–3273. <https://doi.org/10.1073/pnas.1222463110>
- Soares J. R. S., Ramos R. S., da Silva R. S., Neves D. V. C., Picanço M. C. (2021). Climate change impact assessment on worldwide rain fed soybean based on species distribution models. *Tropical Ecology*, 62(4), 612–625. <https://doi.org/10.1007/s42965-021-00174-1>
- Soltani A., Sinclair T. R. (2012). Optimizing chickpea phenology to available water under current and future climates. *European Journal of Agronomy*, 38(1), 22–31. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2011.11.010>
- Tatsumi K., Yamashiki Y., Valmir da Silva R., Takara K., Matsuoka Y., Takahashi K., Maruyama K., Kawahara N. (2011). Estimation of potential changes in cereals production under climate change scenarios. *Hydrological Processes*, 25(17), 2715–2725. <https://doi.org/10.1002/hyp.8012>
- Vadez V., Berger J. D., Warkentin T., Asseng S., Ratnakumar P., Rao K. P. C., Gaur P. M., Munier-Jolain N., Larmure A., Voisin A.-S., Sharma H. C., Pande S., Sharma M., Krishnamurthy L., Zaman M. A. (2012).



Adaptation of grain legumes to climate change: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 32(1), 31–44. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0020-6>

van der Schriek T., Giannakopoulos C., Varotsos K. V. (2020). The impact of future climate change on bean cultivation in the Prespa Lake catchment, northern Greece. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 5(1). <https://doi.org/10.1007/s41207-020-0151-8>

Watson C. A., Reckling M., Preissel S., Bachinger J., Bergkvist G., Kuhlman T., Lindström K., Nemecek T., Topp, C. F. E., Vanhatalo A., Zander P., Murphy-Bokern D., Stoddard F. L. (2017). Grain Legume Production and Use in European Agricultural Systems. *Advances in Agronomy*, 144, 235–303. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.03.003>



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.