



HAL
open science

Comparaison des performances de différentes espèces de légumineuses à graines

Charles Cernay, David Makowski, Philippe Lescoat, Elise Pelzer

► To cite this version:

Charles Cernay, David Makowski, Philippe Lescoat, Elise Pelzer. Comparaison des performances de différentes espèces de légumineuses à graines. *Innovations Agronomiques*, 2017, 60, pp.1-21. 10.15454/1.513850748029309E12 . hal-01685942

HAL Id: hal-01685942

<https://hal.science/hal-01685942>

Submitted on 16 Jan 2018

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

Comparaison des performances de différentes espèces de légumineuses à graines

Cernay C.¹, Makowski D.¹, Lescoat P.², Pelzer E.¹

¹UMR Agronomie, INRA, AgroParisTech, Université Paris Saclay, F-78850 Thiverval-Grignon

²UMR SADAPT, AgroParisTech, INRA, Université Paris Saclay, 16 rue Claude Bernard, F-75005 Paris

Correspondance : elise.pelzer@inra.fr

Résumé

L'objectif de cette étude est d'identifier des espèces de légumineuses à graines caractérisées par des niveaux élevés de production en Europe, à partir d'une base de données expérimentales incluant 173 articles publiés, 39 espèces de légumineuses et 41 pays. Les résultats d'une première méta-analyse montrent que le soja, le lupin à feuilles étroites et la fêverole présentent des niveaux de production similaires, voire supérieurs, à ceux du pois protéagineux en Europe. Les résultats d'une seconde méta-analyse montrent que les rendements des céréales cultivées après des légumineuses à graines sont, en moyenne, 29% plus élevés que les rendements des céréales cultivées après des céréales (effet significatif pour 13 des 16 espèces de légumineuses à graines analysées). L'effet des cultures précédentes de légumineuses à graines décroît quand la dose de fertilisation azotée (N) appliquée sur les céréales suivantes augmente, et devient négligeable quand la dose moyenne est supérieure à 150 kg N ha⁻¹. Globalement, ces résultats préliminaires montrent que la fêverole est une espèce candidate intéressante en Europe, suivie du pois protéagineux, du soja, et des lupins. La lentille, le pois chiche, et le haricot commun présentent de faibles niveaux de rendement, mais ces espèces sont souvent reconnues pour leurs bénéfices nutritionnels en alimentation humaine. A partir des résultats obtenus en Amérique du Nord et Océanie, il est suggéré d'évaluer les niveaux de production de plusieurs espèces de lupins, gesses, et vesces dans de nouvelles expérimentations agronomiques en Europe. La base de données mobilisée dans cette étude est accessible librement. Elle pourrait à l'avenir faire l'objet d'analyses plus approfondies tenant compte de la diversité génétique au sein de chaque espèce de légumineuses, des pratiques appliquées à ces espèces, ainsi que des conditions pédoclimatiques.

Mots-clés : Méta-analyse, Rendement, Protéine, Effet précédent, Scénario

Abstract: Comparison of performances of grain legume species

Our objective is to identify grain legume species with high production level in Europe. A dataset was built by extracting data from 173 papers for 39 grain legume species across 41 countries. The results of a first meta-analysis show that soybean, narrowleaf lupine and faba bean have similar or higher productivity than pea in Europe. The results of a second meta-analysis show that the yields of cereals grown after grain legume crops are in average 29% higher than the yields of cereals grown after cereals (significant effect for 13 out of 16 grain legume species). The positive effect of preceding grain legume species decreases when N fertilization rate applied to the following cereal increases, and becomes negligible when the average rate applied exceeds 150 kg N ha⁻¹. Globally, fababean is an interesting grain legumes species in Europe followed by pea and soybean, and lupine species. Lentil, chickpea and common bean show lower productivity, but these species are known for their nutritional benefits in human diets. In view of results obtained in North America and Oceania, it is suggested to analyze the

productivity of some lupine and vetch species in new comparative European experiments. Our database was made freely available. In the future, this database could be used to make a more detailed analysis of legume species performances accounting for genetic diversity, cropping practices, and environmental conditions.

Keywords: Méta-analysis, Yield, Protein, Preceding effect, Scenario

Introduction

Les surfaces de légumineuses à graines représentaient 1.8% des surfaces cultivées européennes en 2013. Depuis une vingtaine d'années, de nombreuses études soulignent l'intérêt agronomique, environnemental et économique des légumineuses. Ces études encouragent un développement de leur production, notamment en Europe mais également en Australie ou au Canada. En effet, les légumineuses à graines sont capables de fixer l'azote de l'air (N₂) selon une efficacité de fixation qui varie entre les espèces, les variétés au sein de chaque espèce, les pratiques agricoles et les milieux. Le besoin en fertilisation azotée des légumineuses est généralement nul, et ce besoin est réduit sur les espèces cultivées à la suite de légumineuses. Les graines de la plupart des légumineuses représentent une source intéressante en protéines et en autres nutriments pour l'alimentation animale et humaine. Leurs propriétés nutritionnelles varient entre les espèces et variétés, et peuvent générer des effets favorables sur la santé humaine ainsi qu'être valorisées en complément protéique dans les rations animales. Plusieurs espèces de légumineuses à graines sont cultivables en Europe. Cependant, ces espèces ont été principalement comparées jusqu'à maintenant sur la base de références locales ou d'approches qualitatives. Il n'existait pas de synthèse quantitative globale des performances des espèces de légumineuses à graines.

L'objectif de ce travail est d'identifier des espèces de légumineuses à graines potentiellement intéressantes à produire en Europe. Pour répondre à cet objectif, un grand nombre d'espèces ont été comparées en utilisant plusieurs critères de production à l'échelle du cycle cultural : le rendement en grains et sa variabilité interannuelle, la biomasse aérienne totale, la quantité d'azote, la teneur en protéines et la quantité d'énergie brute dans les graines, et l'utilisation en eau. Ces comparaisons ont été réalisées à partir de trois types de données : (1) des données expérimentales situées en Europe, Amérique du Nord et Océanie, (2) des données nutritionnelles issues de la base FEEDIPEDIA, et (3) des données de statistique publique issue de la base FAOSTAT. Les effets de différentes espèces de légumineuses à graines sur les rendements des céréales suivantes ont également été comparés à partir de données expérimentales issues de différentes régions du monde. La possibilité de couvrir les besoins protéiques des volailles élevées en Europe à partir de protéines issues d'espèces de légumineuses à graines européennes a été étudiée à partir d'une démarche de scénarisation simple.

1. Une base de données expérimentales pour comparer les performances productives des légumineuses à graines à l'échelle mondiale

Depuis cinquante ans, de nombreuses expérimentations ont comparé les performances agronomiques et environnementales de différentes espèces de légumineuses à graines. Ces performances varient entre les sites expérimentaux, les saisons culturales, les choix variétaux et les techniques culturales. Il est difficile d'établir des comparaisons plurispécifiques à large échelle à partir d'expérimentations individuelles considérées séparément. La base de données construite par Cernay *et al.*, (2016) permet de comparer les performances productives (et environnementales, dans une moindre mesure) des cultures de légumineuses à graines à l'échelle mondiale. Les données expérimentales ont été extraites à partir de 173 articles publiés entre 1967 et 2016, selon une procédure de sélection systématique et rigoureuse (Cernay *et al.*, 2016). Les informations collectées concernent 39 espèces de légumineuses à graines, comparées au moins deux à deux sur 360 sites expérimentaux, et situés à travers 18 zones

climatiques dans 41 pays sur cinq continents. Au total, la base de données contient 8581 situations de culture. Pour chacune d'entre elles, la référence de l'article, les coordonnées géographiques, les conditions pédoclimatiques des sites expérimentaux, les rendements en grains, les biomasses aériennes, les utilisations en eau, les quantités en azote dans le sol ont été enregistrés. La production des céréales et des cultures oléagineuses cultivées après des légumineuses à graines a aussi été collectée. L'erreur associée à chaque valeur de production (quand elle était disponible) a été systématiquement extraite. Quand les informations étaient disponibles, les variétés, ainsi que les techniques culturales ont été systématiquement enregistrées (i.e., le travail du sol, la fertilisation en azote, phosphore et potassium, le contrôle des adventices, insectes et champignons, et l'irrigation). La base de données a été publiée dans une revue « open source », et mise librement à disposition de la communauté scientifique (Cernay et al., 2016). Les paragraphes suivants présentent les résultats d'analyses préliminaires de cette base de données. Des analyses complémentaires pourront être réalisées à l'avenir, par exemple pour étudier les effets des types variétaux, des dates de semis, des pratiques de travail du sol, ou d'autres variables caractérisant les systèmes de culture, le sol et le climat. Notre objectif n'était pas de comparer des rendements potentiels de différentes espèces de légumineuses mais de comparer des rendements de cultures soumises à une diversité de conditions culturales. Aucun essai n'a donc été éliminé de la base, même ceux exposés à des facteurs limitants biotiques ou abiotiques.

Pour visualiser le contenu de la base de données, il est utile de tracer des réseaux graphiques identifiant les espèces de légumineuses comparées entre elles. Ces réseaux permettent non seulement d'identifier les paires d'espèces qui sont fréquemment (ou peu fréquemment) comparées entre elles sur les mêmes sites expérimentaux durant les mêmes saisons culturales (Figure 1), mais également d'identifier les séquences culturales de légumineuses (en tant que cultures précédentes) et de non-légumineuses (en tant que cultures suivantes) qui sont les plus (ou les moins) testées sur les mêmes sites expérimentaux dans différentes régions du monde (Figure 2). Il s'agit ici d'une description de la base de données obtenue. Les performances relatives des espèces sont décrites quantitativement dans les deux méta-analyses présentées dans les paragraphes 2 et 3.

Le jeu de données obtenu permet d'analyser la variabilité de la production d'une diversité de légumineuses à graines, et de quantifier l'incertitude associée à travers un large spectre de conditions environnementales. Il permet également de hiérarchiser des espèces de légumineuses en fonction de plusieurs critères de production. Les classements obtenus permettent de comparer les performances d'espèces peu cultivées avec celles d'espèces majeures, dans une région donnée. Ces classements peuvent apporter un nouvel éclairage et conduire à l'identification d'espèces à forts niveaux de production. La base de données peut également être utilisée pour évaluer l'effet de différentes espèces de légumineuses à graines sur la production des céréales et des cultures oléagineuses qui les suivent à l'échelle de la séquence culturale. Il est important de noter que cette base de données n'inclut pas la totalité des articles analysant les performances des légumineuses à graines. En effet, étant donné l'objectif de la base, nous avons inclus des articles où au moins deux espèces de légumineuses étaient systématiquement comparées sur le même site expérimental durant la(es) même(s) saison(s) culturale(s), et dont les données de rendement en grains étaient systématiquement renseignées. Ces deux conditions initiales étaient nécessaires pour comparer un grand nombre d'espèces de légumineuses à graines entre elles tout en minimisant les confusions d'effets liés à l'environnement et aux techniques culturales. Le nombre d'essais retenus diffère entre les espèces de légumineuses. Cela est explicitement pris en compte dans l'ajustement des modèles dans les deux méta-analyses suivantes (paragraphes 2 et 3) et représenté par la taille des intervalles de confiance, qui permet de moduler certaines conclusions.

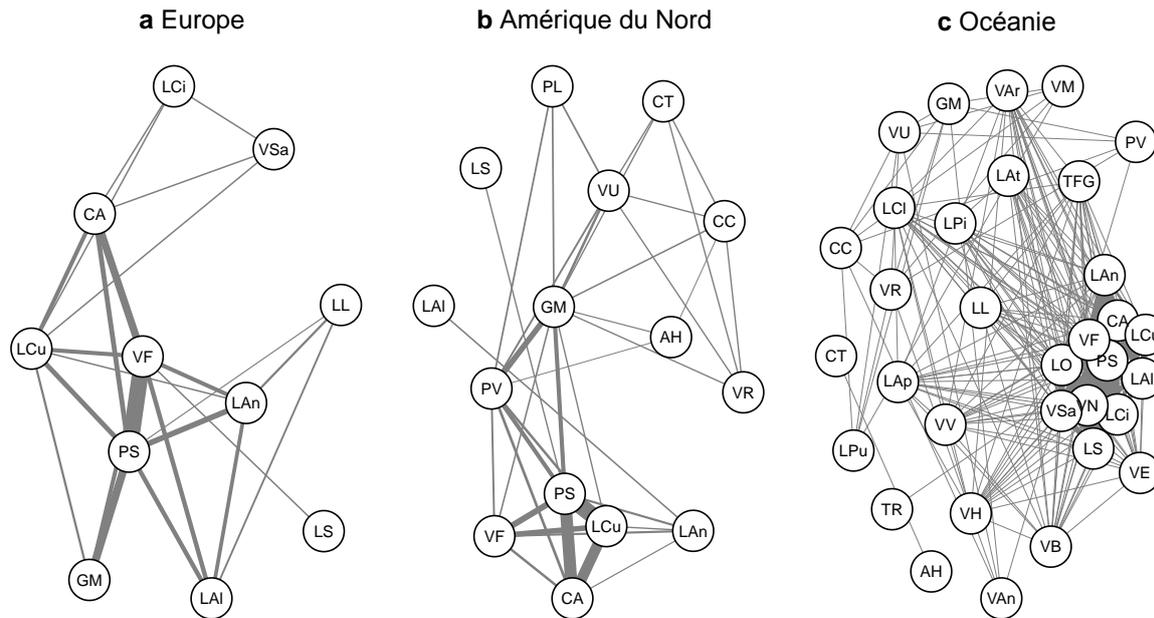


Figure 1 : Réseau des couples de légumineuses à graines inclus dans la base de données dans trois régions : (a) Europe, (b) Amérique du Nord, et (c) Océanie. Chaque nœud correspond à une espèce cultivée de légumineuses à graines. Chaque lien indique un couple de légumineuses à graines comparées ; les deux espèces étant cultivées sur le même site expérimental durant une même saison culturale. L'épaisseur du lien indique le nombre de sites expérimentaux et de saisons culturales pour lesquelles les deux espèces sont comparées. En Europe (a), le réseau inclut 11 espèces et 585 situations de culture de légumineuses à graines. En Amérique du Nord (b), le réseau inclut 15 espèces et 1243 situations de culture de légumineuses à graines. En Océanie (c), le réseau inclut 33 espèces et 1899 situations de culture de légumineuses à graines. Les acronymes indiquent les noms scientifiques des espèces : AH : *Arachis hypogaea*, CA : *Cicer arietinum*, CC : *Cajanus cajan*, CT : *Cyamopsis tetragonoloba*, GM : *Glycine max*, LAI : *Lupinus albus*, LAN : *Lupinus angustifolius*, LAp : *Lathyrus aphaca*, LAAt : *Lupinus atlanticus*, LCi : *Lathyrus cicera*, LCI : *Lathyrus clymenum*, LCu : *Lens culinaris*, LL : *Lupinus luteus*, LM : *Lupinus mutabilis*, LO : *Lathyrus ochrus*, LPi : *Lupinus pilosus*, LPu : *Lablab purpureus*, LS : *Lathyrus sativus*, MU : *Macrotyloma uniflorum*, PL : *Phaseolus lunatus*, PS : *Pisum sativum*, PV : *Phaseolus vulgaris*, TFG : *Trigonella foenum-graecum*, TR : *Trifolium repens*, VAc : *Vigna aconitifolia*, Van : *Vigna angularis*, Var : *Vicia articulata*, VB : *Vicia benghalensis*, VE : *Vicia ervilia*, VF : *Vicia faba*, VH : *Vicia hybrida*, VM : *Vigna mungo*, VN : *Vicia narbonensis*, VP : *Vicia pannonica*, VR : *Vigna radiata*, VSa : *Vicia sativa*, VSu : *Vigna subterranea*, VU : *Vigna unguiculata*, VV : *Vicia villosa*.

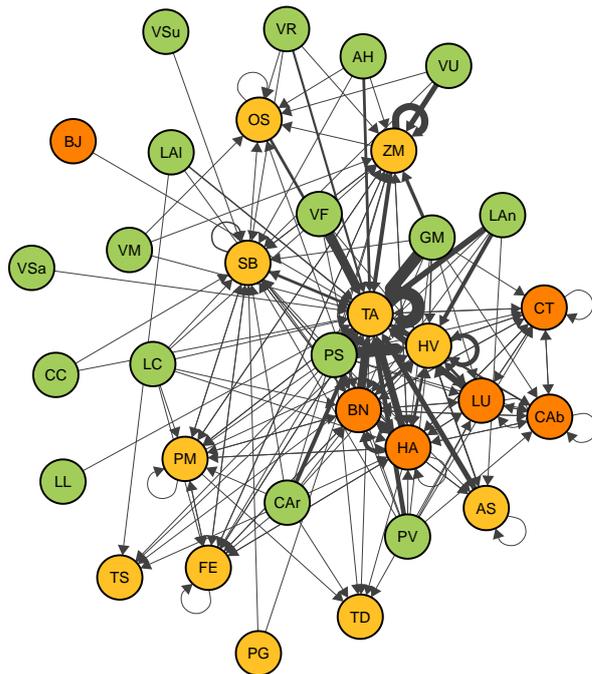


Figure 2 : Réseau des couples de culture précédente et de culture suivante inclus dans la base de données. Chaque nœud correspond à une espèce cultivée. Chaque flèche indique un couple de culture précédente et de culture suivante ; le sens de la flèche indique l'espèce qui est la culture précédente d'une autre espèce qui est la culture suivante ; les deux espèces étant cultivées sur le même site expérimental durant deux saisons culturales successives. Si la flèche d'un nœud est une boucle, alors l'espèce est cultivée en monoculture. L'épaisseur de la flèche indique le nombre de sites expérimentaux et de saisons culturales pour lesquelles les deux espèces cultivées (ou l'espèce cultivée dans le cas d'une monoculture) se suivent. L'espèce est soit une légumineuse à graines (vert), une céréale (jaune) ou un oléagineux (orange). Les acronymes indiquent les noms scientifiques des espèces : AH : *Arachis hypogaea*, AS : *Avena sativa*, BJ : *Brassica juncea*, BN : *Brassica napus*, CC : *Cajanus cajan*, CT : *Carthamus tinctorius*, CAr : *Cicer arietinum*, Cab : *Crambe abyssinica*, FE : *Fagopyrum esculentum*, GM : *Glycine max*, HA : *Helianthus annuus*, HV : *Hordeum vulgare*, LC : *Lens culinaris*, LU : *Linum usitatissimum*, LAI : *Lupinus albus*, LAn : *Lupinus angustifolius*, LL : *Lupinus luteus*, OS : *Oryza sativa*, PM : *Panicum miliaceum*, PG : *Pennisetum glaucum*, PS : *Pisum sativum*, PV : *Phaseolus vulgaris*, SB : *Sorghum bicolor*, TA : *Triticum aestivum*, TD : *Triticum durum*, TS : *Triticum sativum*, VF : *Vicia faba*, VM : *Vigna mungo*, VR : *Vigna radiata*, VSa : *Vicia sativa*, VSu : *Vigna subterranea*, VU : *Vigna unguiculata*, ZM : *Zea mays*.

2. Comparer les niveaux de production des légumineuses à graines en Europe, Amérique du Nord et Océanie

Depuis cinquante ans, le pois protéagineux est la légumineuse à graines la plus cultivée en Europe (FAOSTAT, 2016). La diversification plurispécifique de la production européenne de légumineuses à graines représenterait une stratégie moins risquée et plus viable qu'une spécialisation monospécifique de la production. Notre première méta-analyse de la base de données Cernay et al. (2016) a deux objectifs. Le premier est d'identifier en Europe des espèces de légumineuses à graines caractérisées par des niveaux de production plus faibles, similaires, ou plus élevés, que celui du pois protéagineux. Le second est d'identifier des légumineuses à graines caractérisées par des niveaux de production élevés par rapport à celui du pois protéagineux en Amérique du Nord et Océanie ; ces espèces peuvent être des espèces candidates à inclure potentiellement dans de nouvelles expérimentations en Europe.

Les niveaux de production de 22 espèces de légumineuses à graines ont été comparés à celui du pois protéagineux (*Pisum sativum*, défini comme espèce de référence puisque c'est l'espèce la plus cultivée en Europe) en Europe, Amérique du Nord et Océanie, par méta-analyse de données expérimentales issues de 61 articles publiés. Toutes les espèces de légumineuses à graines sont directement comparées au pois par l'estimation des ratios moyens log-transformés de six critères (X) de production: (1) le rendement en grains, (2) la biomasse aérienne totale, (3) la quantité d'azote (4), la quantité de protéines, (5) la quantité d'énergie brute dans les graines, et (6) l'utilisation en eau.

Le ratio log-transformé $L_{ijk} = \text{Log}_e \frac{\bar{X}_{ijk}}{\bar{X}_{rjk}}$ est calculé pour chaque espèce i cultivé dans chaque site

expérimental*année culturale k dans chaque article j . \bar{X}_{ijk} représente la valeur du critère X moyenné pour des pratiques culturales données (*i.e.*, travail du sol, fertilisation, pesticides, irrigation) pour l'espèce i cultivé dans chaque site expérimental*année culturale k dans chaque article j , et \bar{X}_{rjk} représente la valeur du critère X moyenné pour les mêmes pratiques culturales pour le pois cultivé dans le même site expérimental*année culturale dans le même article.

Le ratio moyen log-transformé est estimé pour chaque critère X et chaque espèce i et pour l'ensemble des combinaisons site expérimental*année culturale des articles sélectionnés, avec un modèle linéaire à effet aléatoire. Différents modèles incluant un effet aléatoire "site expérimental*année culturale" ou deux effets aléatoires "article" et "site expérimental*année culturale" sont ajustés avec la fonction "lme" du package "nlme" (version 3.1.111) (Pinheiro et al., 2013) du logiciel R (version 3.0.2, 2013).

Le meilleur modèle est sélectionné sur la base du critère d'Akaike (Akaike, 1974). Les ratios R_i et les intervalles de confiance à 95% sont ensuite calculés avec l'exponentiel du ratio moyen log-transformé estimé, pour chaque critère X et chaque espèce i . Les ratios sont considérés comme significativement différents de 1 (*i.e.*, l'espèce présente une performance pour le critère X significativement plus élevée ou moins élevée que le pois) si l'intervalle de confiance à 95% n'inclut pas la valeur 1. Les ratios moyens log-transformés ont été estimés de façon indépendante pour l'Europe, l'Amérique du Nord et l'Océanie.

L'ensemble des résultats est synthétisé dans la Figure 3.

Le nombre d'essais disponibles diffère entre les espèces de légumineuses, et ces différences sont reflétées par la taille des intervalles de confiance dans la figure 4. Pour certaines espèces, le nombre d'essais disponibles est particulièrement faible (ex : lupin jaune en Europe, gesse blanche en Amérique du Nord) et l'incertitude est grande. Les résultats montrent cependant que le soja (*Glycine max*), le lupin à feuilles étroites (*Lupinus angustifolius*) et la fèverole (*Vicia faba*) peuvent être des espèces intéressantes à produire en Europe comme alternatives au pois protéagineux (Figure 4a). En Amérique du Nord, la plupart des légumineuses à graines ne sont pas plus productives que le pois protéagineux (Figure 4b). En Océanie, plusieurs espèces de gesses (*Lathyrus spp.*), de lupins (*Lupinus spp.*), et de vesces (*Vicia spp.* excepté *Vicia faba*) sont plus productives que le pois protéagineux. La fèverole est l'espèce qui présente un des meilleurs niveaux de production par rapport à celui du pois protéagineux dans cette région (Figure 4c). Le nombre d'espèces de légumineuses comparées au pois protéagineux est trois fois supérieur en Océanie à celui observé en Europe et Amérique du Nord.

Ces analyses sont préliminaires et montrent l'intérêt de la base de données de Cernay et al. (2016), décrite dans la partie 1. Comme les coordonnées géographiques et les conditions pédoclimatiques des sites expérimentaux ont été systématiquement renseignées, ainsi que les variétés, les techniques culturales, et d'autres variables que le rendement en grain (biomasses aériennes, quantités en azote dans le sol ou les plantes) quand elles étaient disponibles dans les articles, des analyses complémentaires pourraient être réalisées, par exemple sur la diversité génétique intra espèce connue

(hiver/printemps), les interactions géotypes*environnement*conduites (en partie reflétées dans les analyses préliminaires par la variabilité), ou l'impact du climat. Par ailleurs, il est important de considérer que toutes les espèces ne peuvent pas encore être cultivées dans toutes les régions de l'Europe. C'est le cas par exemple du soja, dont l'extension est limitée par ses besoins en eau, ou le lupin jaune, avec des conditions pédologiques de culture particulières. On peut faire l'hypothèse que le progrès génétique en cours pour différentes espèces de légumineuses pourrait conduire à une évolution des zones de culture possibles. Bien que certaines espèces de lupins (e.g., le lupin à feuilles étroites (*Lupinus angustifolius*)) présentent des performances productives intéressantes par rapport à celles du pois protéagineux (*Pisum sativum*) en Europe (en particulier, pour leurs quantités de protéines dans les graines), ces espèces sont caractérisées par une très forte variabilité interannuelle de leurs rendements en grains dans la majorité des sous-régions européennes. L'incertitude est assez élevée pour certaines espèces de lupin (e.g., les lupins jaunes et blancs (*Lupinus luteus*, et *Lupinus albus*, respectivement) à cause d'un nombre faible de données expérimentales où elles sont comparées directement au pois protéagineux (*Pisum sativum*) en Europe. Il est intéressant de noter que les espèces de lupins ont beaucoup plus été comparées à d'autres espèces de légumineuses à graines en Océanie. Certaines espèces comme *L. pilosus* ou *L. atlanticus* sont même des espèces en cours de domestication. Entre 1961 et 2014, les lupins (*Lupinus* spp.) étaient les légumineuses à graines les plus récoltées dans l'agriculture australienne, représentant, en moyenne annuelle, 37% de la surface de légumineuses à graines (FAOSTAT, 2016 ; Cernay, 2016).

Les résultats de cette première méta-analyse peuvent servir de support intéressant, en particulier dans le cadre de la prise de décision face à l'intérêt croissant du soja dans l'agriculture européenne. En 2014, les surfaces de soja représentaient plus de 25% et 50% de la surface récoltée de légumineuses à graines en France et en Europe, respectivement (FAOSTAT, 2016). Récemment, la surface de soja a fortement augmenté en Allemagne (Recknagel, 2015), en l'Italie et en Roumanie où sa production atteint des niveaux historiquement élevés (FAOSTAT, 2016). L'augmentation de la consommation de soja en alimentation humaine a probablement favorisé l'intérêt de cette espèce en Europe en multipliant le développement de filières locales de production telles qu'en Allemagne (Krön et Bittner, 2015 ; Recknagel, 2015) et en France (Jouffret et al., 2015 ; Le Cadre et al., 2015 ; Maury et al., 2015 ; Quinsac et al., 2015). Le succès du soja tiendrait donc aussi d'une démarche réussie d'organisation de la filière (valorisation de l'huile et des protéines). Dans l'ensemble, le soja reste actuellement la légumineuse à graines la plus utilisée dans la ration alimentaire des monogastriques en Europe (European Feed Manufacturers' Federation, 2016 ; Martin, 2014, 2015). Entre 1961 et 2011, l'Europe a importé 63% de sa demande domestique en légumineuses à graines (FAOSTAT, 2014). L'alimentation des productions animales européennes est ainsi progressivement devenue dépendante de ces importations (Bues et al., 2013 ; De Visser et al., 2014 ; Hache, 2015 ; Martin, 2014, 2015). L'autonomie protéique est un enjeu d'actualité en Europe, qui peut en partie expliquer la récente augmentation de la production de soja dans cette région. Ce fort enjeu pourrait à terme conduire à une diversification des espèces de légumineuses à graines cultivées en Europe.

La fève présente des performances productives similaires à celles du pois protéagineux pour tous les critères étudiés en Europe (Figure 3). Flores et al. (2012, 2013) ont montré que la fève était relativement bien adaptée à la diversité des conditions pédoclimatiques européennes. Le lupin à feuilles étroites et le lupin jaune (*Lupinus luteus*) présentent également des performances productives intéressantes par rapport à celles du pois protéagineux. Lucas et al. (2015) ont souligné la nécessité des innovations en sélection variétale et des traitements technologiques afin de mieux valoriser ces espèces en tant que matières premières en Europe. Contrairement à celles du soja, les graines de fève et certaines espèces de lupins (*Lupinus* spp.) peuvent être utilisées crues (Guillamón et al., 2008). Elles peuvent constituer une source de protéines alternative à celles du pois protéagineux en alimentation animale (Crépon et al., 2010 ; Jezierny et al., 2010 ; Koivunen et al., 2016 ; Multari et al., 2015).

Nom scientifique	Europe				Amérique du Nord				Océanie				Monde		
	Ratio de rendement en grains ^a	Ratio de biomasse aérienne totale ^b	Ratio d'énergie brute dans les graines ^c	Ratio d'azote dans les graines ^d	Ratio de rendement en grains ^a	Ratio de biomasse aérienne totale ^b	Ratio d'énergie brute dans les graines ^c	Ratio d'azote dans les graines ^d	Ratio de rendement en grains ^a	Ratio de biomasse aérienne totale ^b	Ratio d'énergie brute dans les graines ^c	Ratio d'azote dans les graines ^d	Ratio de variance de rendement	Effet sur les rendements des céréales ^e	N ₀
<i>Arachis hypogaea</i>														+	139
<i>Cajanus cajan</i>														+	115
<i>Cicer arietinum</i>	-	0	0	(0)	-	-	(-)	-	-	-	-	-	-	+	124
<i>Glycine max</i>	0	+	+			(0)	0							+	135
<i>Lathyrus aphaca</i>															
<i>Lathyrus cicera</i>															
<i>Lathyrus dymnorum</i>															
<i>Lathyrus ochrus</i>															
<i>Lathyrus sativus</i>	(-)	(0)	(-)	(-)		(0)	(0)	(-)						+	184
<i>Lens culinaris</i>	-	(-)												+	195
<i>Lupinus albus</i>	-	0	0	0			(-)	(0)						+	190
<i>Lupinus angustifolius</i>															
<i>Lupinus luteus</i>	(0)	(0)	(0)	(0)										(0)	190
<i>Lupinus pilosus</i>														+	129
<i>Phaseolus vulgaris</i>														+	168
<i>Rumex sativum</i>															
<i>Vicia articulata</i>															
<i>Vicia benghalensis</i>															
<i>Vicia ervilia</i>	0	0	0	0		(0)	0	(0)						+	198
<i>Vicia faba</i>															
<i>Vicia hybrida</i>															
<i>Vicia narbonensis</i>															
<i>Vicia sativa</i>															
<i>Vicia villosa</i>															
<i>Vigna mungo</i>															
<i>Vigna radiata</i>															
<i>Vigna subterranea</i>														+	133
<i>Vigna unguiculata</i>														+	155

Figure 3 : Synthèses quantitatives des performances productives (et environnementales, dans une moindre mesure) des légumineuses à graines en Europe, Amérique et Océanie. Pour les ratios dans chaque région, trois couleurs ont été utilisées : orange = performance moins bonne, jaune = performance égale, vert = performance meilleure. Les symboles « + », « 0 » et « - » indiquent que la performance de l'espèce de légumineuses à graines est soit significativement meilleure, significativement égale, ou significativement moins bonne que celle du pois protéagineux (*Pisum sativum*) pour un critère de production donné, respectivement. Cette performance a été estimée à partir de données expérimentales issues d'un nombre d'articles strictement supérieur à deux. Les symboles « (+) », « (0) » et « (-) » indiquent que la performance de l'espèce de légumineuses à graines a été estimée à partir de données expérimentales issues d'un nombre d'articles inférieur ou égal à deux. La ligne pour le pois protéagineux est hachurée puisque cette espèce est définie comme référence dans les comparaisons directes de la méta-analyse. La partie droite du tableau (intitulée « Monde ») indique les effets des espèces de légumineuse à graines sur les rendements des céréales suivantes à l'échelle mondiale. Les symboles « + », « 0 » et « - » indiquent que l'effet de l'espèce de légumineuses à graines est soit significativement meilleur, significativement non différent (i.e., nul), ou significativement moins bon que l'effet d'une céréale sur les rendements des céréales suivantes. N₀ indique la dose de fertilisation azotée (kgN.ha⁻¹) appliquée sur les céréales suivantes, et au-dessus de laquelle l'effet de l'espèce de légumineuses à graines sur les rendements des céréales devient négligeable. Trois couleurs ont été utilisées : orange = l'effet de l'espèce de légumineuses à graines sur les rendements des céréales suivantes est significativement positif quand la dose de fertilisation azotée des céréales suivantes est considérée comme faible (i.e., 0 < N₀ < 130 kgN.ha⁻¹), jaune = l'effet de l'espèce de légumineuses à graines sur les rendements des céréales suivantes est significativement positif quand la dose de fertilisation azotée des céréales suivantes est considérée comme intermédiaire (i.e., 130 < N₀ < 160 kgN.ha⁻¹), vert = l'effet de l'espèce de légumineuses à graines sur les rendements des céréales suivantes est significativement positif quand la dose de fertilisation azotée des céréales suivantes est considérée comme forte (i.e., 160 < N₀ < 200 kgN.ha⁻¹). De la même manière que dans la première partie du tableau, les symboles « (+) », « (0) » et « (-) » indiquent l'incertitude associée à partir du nombre d'articles dont les données expérimentales sont collectées. L'indice « a » indique que les données sont issues de la base de données FAOSTAT. L'indice « b » indique que les données sont issues d'expérimentations agronomiques collectées dans la base de données Cernay et al. (2015). L'indice « c » indique que les données sont issues de la base de données FEEDIPEDIA.

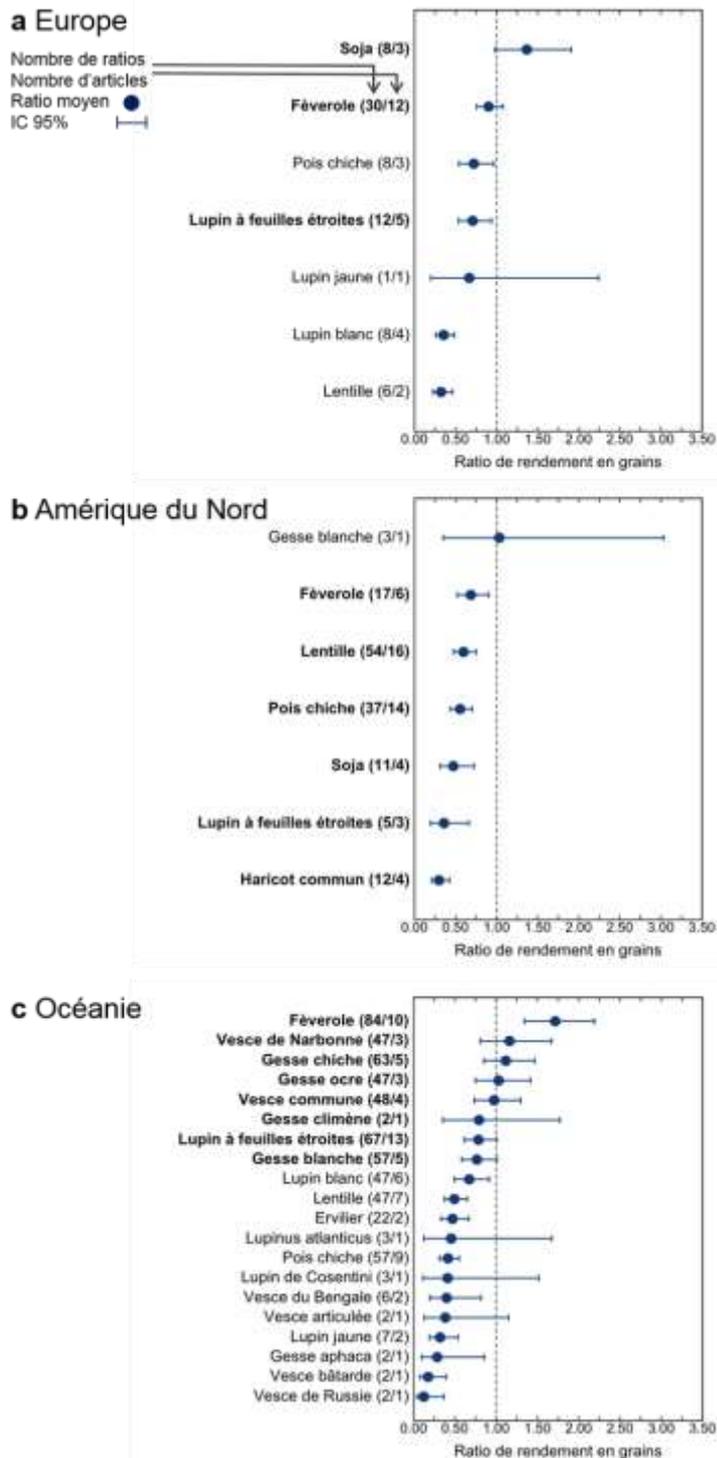


Figure 4 : Ratios moyens de rendement en grains estimés pour différentes espèces de légumineuses à graines comparées au pois protéagineux en Europe (a), Amérique du Nord (b) et Océanie (c).

La méta-analyse a montré que le pois chiche (*Cicer arietinum*) et la lentille (*Lens culinaris*) ont des performances productives moindres que celle du pois protéagineux en Europe, même si le nombre d'études disponibles pour ces deux espèces est plus faible. Bien que ces deux espèces puissent être utilisées en alimentation animale, elles sont généralement destinées à l'alimentation humaine. Leurs prix de vente sont souvent plus rémunérateurs que celui du pois protéagineux (Schneider et al., 2015). Le pois chiche et la lentille peuvent constituer des opportunités de marché intéressantes, en termes de valorisation et de retours économiques par l'intermédiaire d'appellations d'origine contrôlée, permettant de compenser leurs faibles niveaux de production (Erskine et al., 2011 ; Jukanti et al., 2012 ; Magrini et al., 2016 ; Voisin et al., 2014).

Dans l'ensemble, les classements des espèces en Amérique du Nord et Océanie confirment les principaux résultats en Europe. En Amérique du Nord, les faibles productions des espèces de légumineuses à graines par rapport à celle du pois protéagineux peuvent être expliquées par la localisation géographique des expérimentations nord-américaines incluses dans la méta-analyse, principalement situées dans le Nord des Grandes Plaines. Dans cette région, Miller et al. (2002) ont en effet indiqué que le rendement en grains du pois protéagineux était supérieur à ceux des autres légumineuses. Les auteurs ont montré par exemple que le rendement en grains du soja était plus faible de 47% à celui du pois protéagineux. Cette diminution de rendement en grains est similaire avec celle estimée dans la méta-analyse (i.e., 41% et 53% sans et avec pondération des données par leurs précisions, respectivement).

En Océanie, la fève présente une production significativement supérieure à celle du pois protéagineux. Siddique *et al.* (2013) ont indiqué que cette espèce était adaptée à une plus grande diversité de conditions environnementales que le pois protéagineux en Australie. L'ubiquité de la fève pourrait ainsi expliquer en partie ses forts niveaux de production dans cette région.

La gesse blanche (*Lathyrus sativus*) présente des performances productives similaires à celles du pois protéagineux en Amérique du Nord et Océanie. Cependant, la production estimée pour cette espèce est associée à une forte incertitude en raison d'un faible nombre de comparaisons directes au pois protéagineux (un article en Amérique du Nord et 5 articles en Océanie, Figure 4). Les graines de la gesse blanche – ainsi que celles d'autres espèces de gesses (*Lathyrus* spp.) et vesces (*Vicia* spp. excepté *Vicia faba*) – contiennent des facteurs nutritionnels indésirables (Gilani et al., 2005 ; Hanbury et al., 2000 ; Vaz Patto et Rubiales, 2014), voire neurotoxiques (Yan et al., 2006). Même si les espèces riches en facteurs antinutritionnels ont souvent un avantage adaptatif qui peut leur conférer un bénéfice en terme de rendement par rapport à une espèce pleinement domestiquée, ces facteurs peuvent réduire la valeur azotée des protéines issues des graines de ces légumineuses dans l'alimentation des animaux (Jezierny et al., 2010 ; Koivunen et al., 2016 ; Longstaff et al., 1991). Bien que des opérations technologiques permettent de les inactiver (D'Mello, 1992 ; Singh, 1988), leur coût d'application reste souvent déterminant (Gilani et al., 2005).

La méta-analyse a montré la nécessité de réaliser d'autres expérimentations agronomiques comparant certaines espèces de légumineuses à graines, encore peu étudiées en Europe. Ces futures expérimentations peuvent inclure certaines espèces déjà cultivées en Europe, mais pour lesquelles, nos estimations sont associées d'une forte incertitude en raison du faible nombre de données expérimentales. C'est le cas notamment du soja, du lupin à feuilles étroites, et lupin jaune. Ces nouvelles expérimentations pourraient également inclure des espèces non comparées au pois protéagineux en Europe, mais comparées dans d'autres régions du monde – comme en Océanie – et caractérisées par des niveaux élevés de production, notamment des espèces de gesses (*Lathyrus cicera*, *Lathyrus clymenum*, *Lathyrus ochrus*, et *Lathyrus sativus*), des espèces de lupins (*Lupinus atlanticus*, et *Lupinus pilosus*), et des espèces de vesces (*Vicia articulata*, *Vicia narbonensis*, et *Vicia sativa*). Bien que certaines de ces espèces présentent des facteurs nutritionnels indésirables dans leurs graines (comme la vesce commune, *Vicia sativa*, déjà cultivée en Europe mais dont le facteur antinutritionnel β cyanoalanine est un frein à l'usage en alimentation des monogastriques dont les humains), il serait néanmoins intéressant de les étudier dans de futures expérimentations en Europe afin de mieux déterminer leurs productions relatives au travers d'un gradient de conditions pédoclimatiques.

3. Comparer l'effet des légumineuses à graines sur les rendements des céréales suivantes

L'effet des légumineuses à graines sur les rendements (en grains) des céréales suivantes a été quantifié en réalisant une seconde méta-analyse à partir de la base de données de Cernay et al.

(2016). Les rendements des céréales cultivées après différentes espèces de légumineuses (et oléagineuses) ont été systématiquement comparés aux rendements des céréales cultivées après des espèces de céréales. Ces comparaisons ont été effectuées sur les mêmes sites expérimentaux durant les mêmes saisons culturales et les mêmes techniques de culture. Les rendements des céréales après des espèces de céréales ont été définis comme des rendements de référence. Ces comparaisons directes ont été conduites à l'échelle mondiale à partir des données expérimentales de 33 articles publiés, et incluant 16 espèces de légumineuses à graines en tant que cultures précédentes. La dose de fertilisation en azote minéral des céréales suivantes a été analysée en covariable dans les modèles statistiques.

Cette méta-analyse a deux objectifs. Le premier est de déterminer si l'effet des légumineuses à graines sur les rendements des céréales suivantes est significativement positif, et s'il dépend de l'espèce de légumineuses. Le second est de quantifier l'effet des légumineuses à graines sur les rendements des céréales suivantes en fonction de la dose de fertilisation en azote minéral appliquée sur céréales suivantes.

Les rendements des céréales cultivées après des non-céréales (légumineuses à graines ou oléagineuses) ont été comparés avec ceux des céréales cultivées après des céréales sur les mêmes sites expérimentaux et années culturales, et sous les mêmes pratiques culturales appliquées. Le ratio log-transformé des rendements de la céréale a été calculé de la manière suivante :

$$L_{ipjk} = \text{Log}_e \frac{\bar{Y}_{ipjk}}{\bar{Y}_{cpjk}}$$

où L_{ipjk} est le ratio log-transformé des rendements de la céréale, \bar{Y}_{ipjk} est le rendement de la céréale cultivée après une non-céréale i (légumineuse à graines ou oléagineuse), moyenné sur le traitement expérimental ayant reçu une dose de fertilisation azotée p appliqué sur la céréale, sur le site expérimental*année culturale k dans l'article j . \bar{Y}_{cpjk} est le rendement de la même espèce de céréale cultivée après une céréale c moyenné sur le même traitement expérimental ayant reçu la dose de fertilisation azotée p appliqué sur la céréale, sur le même site expérimental*année culturale dans le même article. Le ratio moyen log-transformé des rendements de la céréale a été estimé pour chaque espèce précédente légumineuse à graines et pour l'ensemble des espèces précédentes oléagineuses (OI, Figure 5) à l'aide de modèles statistiques mixtes. Comme précédemment, plusieurs modèles statistiques ont été ajustés à l'aide de la fonction 'lme' du package R 'nlme', et les meilleurs modèles ont été sélectionnés à l'aide du critère AIC, afin d'estimer les ratios R_j et les intervalles de confiance à 95%. Dans un deuxième temps, les ratios R_j ont été reliés à la dose de fertilisation N appliquée à la céréale suivante en utilisant également des modèles mixtes ajustés avec 'lme'.

Les résultats montrent que les cultures précédentes de 13 espèces de légumineuses à graines augmentent significativement de 29% en moyenne les rendements des céréales suivantes. Les espèces de légumineuses à graines qui conduisent aux plus forts gains de rendement des céréales suivantes sont – par ordre croissant de gain – le pois protéagineux, la lentille, la fèverole, et les lupins (*Lupinus* spp.) (Figure 5a). L'effet positif résultant des cultures précédentes de légumineuses à graines décroît significativement en fonction de la dose de fertilisation azotée. En fait, cet effet positif devient négligeable quand les céréales suivantes sont fertilisées, en moyenne, au-dessus de la dose « seuil » de 150 kg N ha⁻¹ (Figure 5b).

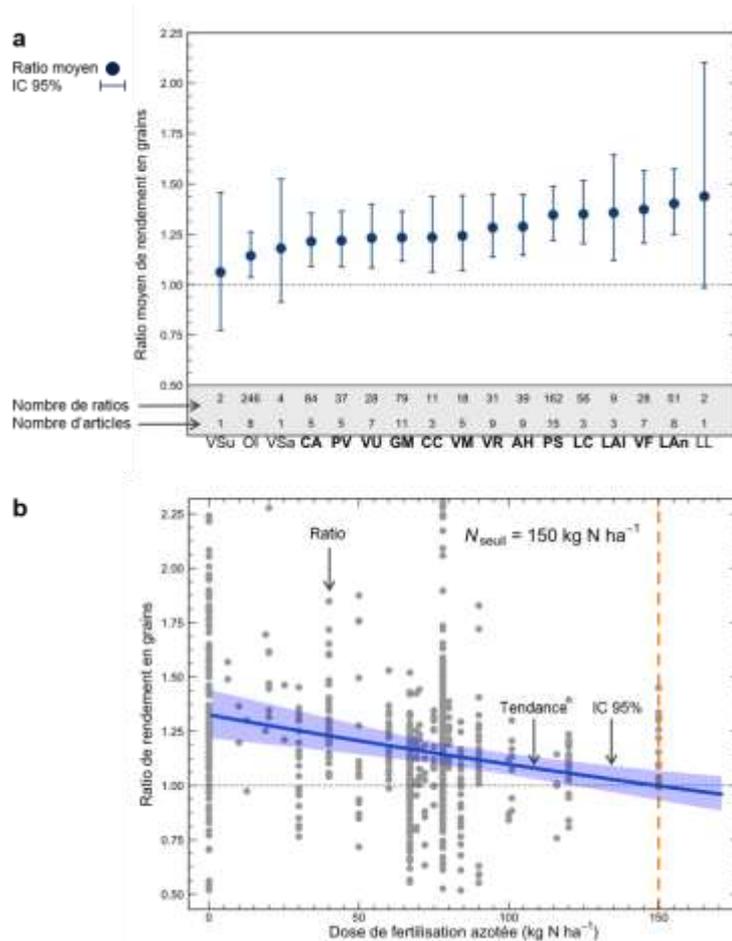


Figure 5 : Ratios moyens de rendement en grains estimés pour des céréales cultivées après différentes espèces de légumineuses à graines ou espèces oléagineuses (a), et ratios de rendement en grains pour des céréales cultivées après des légumineuses à graines et oléagineux en fonction de la dose de fertilisation azotée appliquée sur les céréales suivantes (b). Les acronymes indiquent les noms scientifiques des espèces : AH : *Arachis hypogaea*, CA : *Cicer arietinum*, CC : *Cajanus cajan*, GM : *Glycine max*, LAI : *Lupinus albus*, LAn : *Lupinus angustifolius*, LC : *Lens culinaris*, LL : *Lupinus luteus*, Ol : oléagineux, PS : *Pisum sativum*, PV : *Phaseolus vulgaris*, VF : *Vicia faba*, VM : *Vigna mungo*, VR : *Vigna radiata*, VSa : *Vicia sativa*, VSu : *Vigna subterranea*, VU : *Vigna unguiculata*.

Le gain de rendement des céréales suivantes varie toutefois entre les espèces de légumineuses à graines. Les rendements moyens des céréales suivantes sont plus élevés de 21% pour une culture précédente de pois chiche, de 35% pour une culture précédente de pois protéagineux, et de 40% pour une culture précédente de lupin à feuilles étroites. Ces différences mesurées entre les espèces de légumineuses à graines peuvent être liées aux différences spécifiques d'efficacité à fixer du N_2 atmosphérique (Hardarson et Atkins, 2003). Certaines légumineuses à graines ont des systèmes racinaires plus nodulés que ceux d'autres espèces de légumineuses à graines, permettant de fixer potentiellement plus de N_2 , et de générer plus de résidus aériens riches en azote (Angus et al., 2015 ; Peoples et al., 2009 ; Seymour et al., 2012). Ces résidus aériens peuvent retourner au sol et être minéralisés. A partir de modèles de culture appliqués en Australie, Evans *et al.* (2001) ont calculé que la fourniture potentielle en azote (incluant les résidus souterrains riches en azote) était en moyenne de 18 kg N ha^{-1} pour une culture de pois chiche, de 44 kg N ha^{-1} pour une culture de pois protéagineux, et de 88 kg N ha^{-1} pour une culture de lupin à feuilles étroites. Pour ces trois espèces, ces différences de fourniture potentielle pourraient expliquer les différences d'augmentation des rendements des céréales suivantes estimées dans la méta-analyse.

A l'échelle mondiale, la dose de fertilisation azotée appliquée sur les céréales est souvent supérieure à 150 kg N ha^{-1} dans les systèmes céréaliers conventionnels intensifs (Mueller et al., 2014), principalement en Europe (Lassaletta et al., 2014). En France, la dose moyenne de fertilisation en azote minéral appliquée sur l'orge (*Hordeum vulgare*), le blé (*Triticum aestivum*), le blé dur (*Triticum durum*), et le maïs (*Zea mays*) est estimée à 160 kg N ha^{-1} à partir de données statistiques nationales en 2011 (AGRESTE, 2014). En Europe, la dose moyenne de fertilisation azotée appliquée aux systèmes céréaliers à bas niveau d'intrants est de 126 kg N ha^{-1} (Hossard et al., 2016), inférieure à la dose

« seuil » de 150 kg N ha⁻¹ au-dessus de laquelle l'effet positif des cultures précédentes de légumineuses à graines devient, en moyenne, significativement négligeable. Pour préciser les résultats de la méta-analyse, l'effet de certaines espèces de légumineuses à graines (cultivées actuellement en Europe) a été quantifié sur les rendements des céréales suivantes fertilisées à différentes doses d'azote minéral (Tableau 1).

Tableau 1 : Changement relatif (%) de rendement en grains des céréales fertilisées en azote minéral (N) et cultivées après dix espèces de légumineuses à graines. Les espèces de légumineuses sont les suivantes (*n* est le nombre de ratios de rendement en grains des céréales suivantes) : *Cicer arietinum* (pois chiche, *n*=84), *Glycine max* (soja, *n*=64), *Lens culinaris* (lentille, *n*=56), *Lupinus albus* (lupin blanc, *n*=9), *Lupinus angustifolius* (lupin à feuilles étroites, *n*=51), *Lupinus luteus* (lupin jaune, *n*=2), *Phaseolus vulgaris* (haricot commun, *n*=37), *Pisum sativum* (pois protéagineux, *n*=162), *Vicia faba* (fèverole, *n*=28), *Vicia sativa* (vesce commune, *n*=4). Les changements relatifs moyens de rendement en grains des céréales sont indiqués ainsi que les changements relatifs estimés pour les bornes inférieures et supérieures des intervalles de confiance 95% (IC 95%). Ces changements sont soit des gains relatifs (symbole « + »), des pertes relatives (symbole « - »), ou sans changement (« 0 ») de rendement en grains des céréales (par rapport aux rendements en grains des céréales cultivées après des céréales). *N*₀ indique la dose de fertilisation azotée appliquée sur les céréales suivantes, et au-dessus de laquelle les ratios moyens de rendement en grains des céréales suivantes sont inférieurs à zéro. Trois doses de fertilisation azotée appliquées sur les céréales suivantes sont indiquées : (1) 160 kg N ha⁻¹, (2) 126 kg N ha⁻¹, et (3) 80 kg N ha⁻¹.

Nom scientifique	<i>N</i> ₀ (kg N ha ⁻¹)	Changement relatif (%) de rendement en grains des céréales fertilisées en azote minéral (N) et cultivées après des espèces de légumineuses à graines								
		160 kg N ha ⁻¹			126 kg N ha ⁻¹			80 kg N ha ⁻¹		
		Moyen	IC 95%		Moyen	IC 95%		Moyen	IC 95%	
<i>Cicer arietinum</i>	124	-7	-15	+2	0	-8	+8	+9	+2	+17
<i>Glycine max</i>	135	-5	-13	+4	+2	-5	+9	+11	+5	+18
<i>Lens culinaris</i>	184	+5	-5	+16	+12	+3	+22	+22	+13	+33
<i>Lupinus albus</i>	185	+5	-13	+27	+12	-6	+34	+23	+3	+46
<i>Lupinus angustifolius</i>	190	+6	-3	+17	+13	+5	+23	+24	+15	+33
<i>Lupinus luteus</i>	190	+6	-27	+55	+13	-22	+64	+24	-14	+80
<i>Phaseolus vulgaris</i>	129	-6	-14	+3	0	-7	+9	+10	+2	+18
<i>Pisum sativum</i>	168	+1	-6	+10	+8	+2	+16	+19	+13	+25
<i>Vicia faba</i>	198	+8	-4	+21	+15	+4	+28	+26	+14	+39
<i>Vicia sativa</i>	115	-9	-29	+17	-2	-23	+24	+7	-16	+36

Trois doses de fertilisation azotée ont été considérées : (1) la dose moyenne de fertilisation azotée appliquée sur les céréales actuellement en France (i.e., 160 kg N ha⁻¹), (2) la dose moyenne de fertilisation azotée appliquée sur les systèmes céréaliers à bas niveaux d'intrants actuellement en Europe (i.e., 126 kg N ha⁻¹), et (3) la moitié de la dose moyenne de fertilisation azotée appliquée sur les céréales actuellement en France (i.e., 80 kg N ha⁻¹). Si la dose moyenne de fertilisation azotée appliquée sur les céréales actuellement en France (i.e., 160 kg N ha⁻¹) est considérée, alors l'effet positif des légumineuses à graines sur les rendements des céréales suivantes est, en moyenne, inférieur à 10% (Tableau 1). Le gain moyen de rendement en grains des céréales est le plus élevé (8%) pour une culture précédente de fèverole alors que le gain est de 5% et 6% pour des cultures précédentes de lentille et de lupins, et de 1% pour une culture précédente de pois protéagineux. A cette

dose de fertilisation azotée, les effets des cultures précédentes de pois chiche, de soja, de haricot commun (*Phaseolus vulgaris*), et de vesce commune (*Vicia sativa*) sont négligeables sur les rendements des céréales suivantes. Si la dose moyenne de fertilisation azotée appliquée sur les systèmes céréaliers à bas niveaux d'intrants actuellement en Europe (i.e., 126 kg N ha⁻¹) est considérée, alors l'effet positif des légumineuses à graines sur les rendements des céréales suivantes est au maximum de 15% pour une culture précédente de fèverole, approximativement de 13% pour des cultures précédentes de lentille et de lupins, de 8% pour une culture précédente de pois protéagineux, et de 2% pour une culture précédente de soja (Tableau 1). Il faudrait en fait réduire de 50% la dose moyenne de fertilisation azotée appliquée sur les céréales actuellement en France (i.e., 80 kg N ha⁻¹) pour que le gain moyen de rendement en grains des céréales (résultant des cultures précédentes de légumineuses à graines) soit supérieur à 15%. Le gain de rendement en grains des céréales suivantes fertilisées à 80 kg N ha⁻¹ serait alors de 19% quand elles sont cultivées après une culture de pois protéagineux, et de 11% après une culture de soja.

L'effet de différentes espèces de légumineuses à graines a été estimé sur les rendements en grains de dix espèces de céréales suivantes : (1) l'avoine (*Avena sativa*, 1% des données de rendement des céréales suivantes dans le jeu de données), (2) le sarrasin (*Fagopyrum esculentum*, 2%), (3) l'orge (*Hordeum vulgare*, 19%), (4) le riz (*Oryza sativa*, 3%), (5) le millet commun (*Panicum miliaceum*, 2%), (6) le sorgho commun (*Sorghum bicolor*, 6%), (7) le blé (*Triticum aestivum*, 56%), (8) le blé dur (*Triticum durum*, 2%), (9) le blé touselle (*Triticum sativum*, 1%), et (10) le maïs (*Zea mays*, 8%). Les espèces de céréales suivantes ont été regroupées en raison du faible nombre de données de rendement disponibles pour chacune d'entre elles. Parmi ces dix espèces de céréales suivantes, le plus grand nombre de données de rendement était disponible pour le blé. Il était donc difficile d'estimer l'effet de différentes cultures précédentes de légumineuses à graines en fonction de l'espèce de la céréale suivante. Cet effet spécifique serait plus facilement quantifiable si de nouvelles expérimentations incluant des données de rendement de céréales autres que du blé étaient enregistrées dans la base de données.

L'effet bénéfique de la légumineuse à graines sur la céréale suivante n'est pas uniquement lié au cycle de l'azote. Le rendement de la céréale suivante est plus élevé par rapport à d'autres cultures précédentes, pour une dose d'azote réduite (Angus et al., 2015 ; Preissel et al., 2015), le risque de maladies, en particulier les maladies telluriques de la céréales, peuvent être réduites (Bennett et al., 2012), la matière organique et la structure du sol est modifiée, et l'introduction de légumineuses dans la rotation permet de réduire les adventices par rapport à des successions spécialisées incluant des céréales d'hiver et du colza (Deytieux et al., 2012). Cependant, les informations concernant les bioagresseurs sont peu présentes et souvent incomplètes dans les articles afin de les étudier de manière systématique et standardisée. Par ailleurs, l'effet des bioagresseurs se mesurerait préférentiellement à une échelle temporelle plus large que celle d'une séquence culturale, composée d'un couple de cultures précédente et suivante.

4. Intérêt de la méta-analyse et des données FAOSTAT dans une démarche de scénarisation

La possibilité de couvrir les besoins protéiques des volailles élevées en Europe à partir de protéines issues de légumineuses à graines cultivées en Europe a été explorée. Actuellement, la demande protéique des volailles en Europe est principalement couverte par l'importation de matières premières riches en protéines, essentiellement du tourteau de soja d'Amérique (European Feed Manufacturers' Federation, 2016 ; Martin, 2014, 2015). Comme il a été souligné précédemment, l'autonomie protéique des productions animales est un enjeu d'actualité en Europe. Pour répondre à cet enjeu, plusieurs études ont suggéré d'augmenter la production (surface) de protéines issues de graines de légumineuses (cultures de légumineuses à graines) en Europe. Une augmentation de la surface totale

de légumineuses pourrait favoriser des phénomènes de substitution entre les surfaces allouées aux différentes espèces de légumineuses à graines. Dans cette perspective, l'objectif de cette partie est d'analyser l'effet d'une substitution de la surface de pois protéagineux par du soja (espèce emblématique à l'échelle globale et dont les graines sont riches en protéines) sur la couverture des besoins protéiques des volailles en Europe. Cette partie est illustrative et montre un exemple d'application de la base de données présentée dans la partie 2 et de la méta-analyse conduite dans la partie 3.

Nous avons fait l'hypothèse que la production de volailles est constante en Europe, et que les besoins protéiques des volailles ainsi que les surfaces et les rendements des cultures de pois protéagineux et de soja sont ceux observés, en moyenne, en Europe entre 2003 et 2013. Deux productions de volailles ont été considérées : (1) les volailles pondeuses, et (2) les volailles de chair. Ces deux productions ont des besoins protéiques différents. Leurs demandes protéiques ont donc été distinguées.

La base de données FAOSTAT ne renseignait pas directement le nombre de volailles de chair. Il a été nécessaire de l'estimer à partir de : (1) du nombre de volailles de chair et de volailles pondeuses, et (2) du nombre de volailles pondeuses. A partir de la base de données FAOSTAT, le nombre de volailles de chair et de volailles pondeuses NT en Europe entre 2003 et 2013 a été collecté. Les catégories utilisées ont été : « *Livestock Primary; Meat indigenous, chicken* » et « *Producing Animals; Slaughtered* ». Le nombre de volailles pondeuses NL en Europe entre 2003 et 2013 a été collecté. Les catégories utilisées ont été : « *Livestock Primary; Egg, hen, in shell* » et « *Producing Animals; Slaughtered* ». Le nombre de volailles de chair NB en Europe entre 2003 et 2013 a été déduit à partir de l'équation (1) :

$$NB = NT - NL \quad (1)$$

A partir de la base de données FAOSTAT, le rendement de volailles de chair (et de volailles pondeuses) QT (10^{-1} g tête⁻¹) en Europe entre 2003 et 2013 a été collecté. Les catégories utilisées ont été : « *Livestock Primary; Meat indigenous, chicken* » et « *Yield* ». La quantité de viande produite de volailles de chair MB (tonne carcasse) en Europe entre 2003 et 2013 a été déduite à partir de l'équation (2) :

$$MB = NB \times 10^{-7} \times QT \quad (2)$$

MB a été converti en poids vif (i.e., de tonne carcasse à tonne poids vif) par un facteur de 73% (FranceAgriMer, 2016). Le taux de conversion alimentaire pour les volailles de chair a été estimé à FCRB = 1.6, signifiant qu'il faut 1.6 kg d'aliments distribués pour un gain de production obtenu de 1 kg de poids vif. Les besoins protéiques PRTB dans la ration alimentaire des volailles de chair ont été estimés à PRTB = 0.20 (les besoins protéiques représentent 20% de la ration alimentaire). Les constantes FCRB et PRTB ont été estimées à partir des recommandations nutritionnelles de deux grandes entreprises avicoles mondiales : (1) Aviagen (<http://en.aviagen.com/>), et (2) Cobb-Vantress (<http://www.cobb-vantress.com/>). Sachant FCRB et PRTB, le besoin protéique PRB (tonne) nécessaire pour produire MB en Europe entre 2003 et 2013 a été déduit à partir de l'équation (3) :

$$PRB = MB \times FCRB \times PRTB \quad (3)$$

A partir de la base de données FAOSTAT, la quantité d'œufs produite EL (tonne) en Europe entre 2003 et 2013 a été collectée. Les catégories utilisées ont été : « *Livestock Primary; Egg, hen, in shell* » et « *Production Quantity* ». A partir des recommandations nutritionnelles de deux grandes entreprises avicoles mondiales : (1) Lohman GB (<http://www.lohmanngb.co.uk/>), et (2) Hendrix Genetics (<http://www.hendrix-genetics.com/>), le taux de conversion alimentaire FCRL appliqué aux volailles pondeuses et les besoins protéiques PRTL dans la ration alimentaire des volailles pondeuses ont été estimés par FCRL = 2.1, et PRTL = 0.184. Sachant FCRL et PRTL, le besoin protéique PRL (tonne) nécessaire pour produire EL en Europe entre 2003 et 2013 a été déduit à partir de l'équation (4) :

$$PRL = EL \times FCRL \times PRTL \quad (4)$$

A partir de la base de données FAOSTAT, les surfaces récoltées de pois protéagineux AP (ha) et de soja AS (ha) en Europe entre 2003 et 2013 ont été collectées. Les catégories utilisées ont été : « *Crop; Peas, dry; Soybeans* » et « *Area Harvested* ». Les rendements des cultures de pois protéagineux YP (t ha⁻¹) et de soja YS (t ha⁻¹) en Europe entre 2003 et 2013 ont été collectés. Les catégories utilisées ont été : « *Crop; Peas, dry; Soybeans* » et « *Yield* ».

A partir de la base de données FEEDIPEDIA, les pourcentages moyens de matière sèche dans les graines de pois protéagineux DMP et dans les graines de soja DMS, ainsi que les pourcentages moyens de protéines dans les graines de pois protéagineux CPP et dans les graines de soja CPS ont été collectés. Les catégories utilisées ont été : « *Pea seeds; Soybean seeds* ». Il a été déduit que DMP = 0.865, DMS = 0.888, CPP = 0.239, et CPS = 0.396. Le rendement protéique de la culture du pois protéagineux GPYP (t ha⁻¹) et le rendement protéique de la culture de soja GPYS (t ha⁻¹) en Europe entre 2003 et 2013 ont été déduits à partir des équations (5) et (6), respectivement :

$$\text{GPYP} = \text{YP} \times \text{DMP} \times \text{CPP} \quad (5)$$

$$\text{GPYS} = \text{YS} \times \text{DMS} \times \text{CPS} \quad (6)$$

Les besoins protéiques des volailles de chair PRB et des volailles pondeuses PRL, les surfaces récoltées de pois protéagineux AP et de soja AS, les rendements protéiques de pois protéagineux GPYP et de soja GPYS, ont été estimés par année puis moyennés sur la période 2003-2013. Ces valeurs ont ensuite été utilisées dans les équations (7) à (12).

La couverture des besoins protéiques des volailles par des protéines de pois protéagineux et de soja a été estimée, en testant la sensibilité des résultats à deux sources de données pour déterminer l'offre protéique moyenne totale suite à la substitution de la surface de pois protéagineux par du soja.

Dans un premier temps, le rendement moyen protéique de la culture de pois protéagineux – calculé à partir de la base de données FAOSTAT – a substitué par celui de la culture de soja – calculé également à partir de la base de données FAOSTAT. Cette approche est souvent utilisée dans des démarches de scénarisation. La surface de pois protéagineux a été substituée par du soja sans facteur de conversion lié aux effets des conditions environnementales et des techniques culturales. L'offre protéique moyenne totale PSFAOSTAT (tonne) résultant d'une proportion de substitution λ de la surface de pois protéagineux par du soja a été déduite de l'équation (7) :

$$\text{PSFAOSTAT} = (\text{GPYS} \times \text{AS}) + (\text{GPYS} \times \lambda \times \text{AP}) + (\text{GPYP} \times (1 - \lambda) \times \text{AP}) \quad (7)$$

Les couvertures moyennes des besoins protéiques des volailles de chair PPB(FAOSTAT) (%) et des volailles pondeuses PPL(FAOSTAT) (%) ont été déduites des équations (8) et (9) :

$$\text{PPB(FAOSTAT)} = \text{PSFAOSTAT} / \text{PRB} \quad (8)$$

$$\text{PPL(FAOSTAT)} = \text{PSFAOSTAT} / \text{PRL} \quad (9)$$

Dans un second temps, le ratio moyen (RM) de la quantité de protéines dans les graines de soja sur la quantité de protéines dans les graines de pois protéagineux a été estimé à partir de données expérimentales dans la première méta-analyse (section 2). La prise en compte des estimations de cette méta-analyse limite le risque de confusion d'effets liés aux conditions pédoclimatiques et aux techniques culturales. A partir de la base de données FAOSTAT et à partir des estimations de cette méta-analyse, l'offre protéique moyenne totale PSMA (tonne) a été estimée à partir de l'équation (10) en fonction de la proportion de substitution λ de la surface de pois protéagineux par du soja, et de ratio moyen RM de la quantité de protéines dans les graines de soja sur la quantité de protéines dans les graines de pois protéagineux:

$$\text{PSMA} = (\text{GPYS} \times \text{AS}) + (\text{GPYP} \times \text{RM} \times \lambda \times \text{AP}) + (\text{GPYP} \times (1 - \lambda) \times \text{AP}) \quad (10)$$

Les couvertures moyennes des besoins protéiques des volailles de chair PPB(MA) (%) et des volailles pondeuses PPL(MA) (%) ont été calculées à partir des équations (11) et (12), respectivement :

$$PPB(MA) = PSMA / PRB \quad (11)$$

$$PPL(MA) = PSMA / PRL \quad (12)$$

L'intervalle de confiance 95% a été estimé de la même manière que l'offre protéique moyenne totale PSMA, mais en remplaçant le ratio moyen RM de l'équation (10) par les bornes inférieures et supérieures des intervalles de confiance à 95% des ratios estimés.

Les résultats obtenus à partir de la base de données FAOSTAT sans utilisation des résultats de la méta-analyse montrent un gain moyen de 6% de couverture des besoins protéiques des volailles de chair (6%) et des volailles pondeuses (7%), en considérant une substitution totale de la surface de pois protéagineux par du soja en Europe (Figure 6). Au contraire, les résultats obtenus à partir de la base de données FAOSTAT avec utilisation des résultats de la méta-analyse montrent un gain moyen de 20% de couverture des besoins protéiques des volailles de chair (17%) et des volailles pondeuses (22%), en considérant une substitution totale de la surface de pois protéagineux par du soja en Europe (Figure 6). La méthode avec utilisation des résultats de la méta-analyse permet de quantifier l'incertitude associée au gain moyen de couverture des besoins protéiques des volailles en Europe. Cette incertitude est forte en raison du faible nombre de données expérimentales disponibles en Europe où le pois protéagineux et le soja sont directement comparés sur les mêmes sites expérimentaux durant les mêmes saisons culturales et avec les mêmes techniques culturales. Cette démarche de scénarisation, aussi simple soit-elle, montre que les conclusions peuvent être sensibles à la source de données utilisée, soulignant ainsi la nécessité d'utiliser différentes sources de données pour quantifier l'incertitude associée aux conclusions. Plus généralement, cette démarche aurait pu être appliquée à d'autres espèces de légumineuses à graines, éventuellement plus adaptées aux conditions pédoclimatiques de certaines régions européennes comme le lupin ou la féverole. En effets, le soja a des besoins en eau importants qui ne permettent pas de le cultiver sans irrigation, en général. Par ailleurs, les résultats présentés ici sont surtout expliqués par la teneur élevée en protéines de ses graines. Il faudrait également analyser l'impact d'un tel scénario sur la création et l'organisation de nouvelles filières de valorisation de cette espèce. Enfin, dans un souci de diversification des systèmes de cultures européens, il serait peut-être souhaitable de substituer des espèces de légumineuses (à graines ou autre) non pas à d'autres espèces de légumineuses mais plutôt à des espèces cultivées majoritaires comme le blé ou le colza.

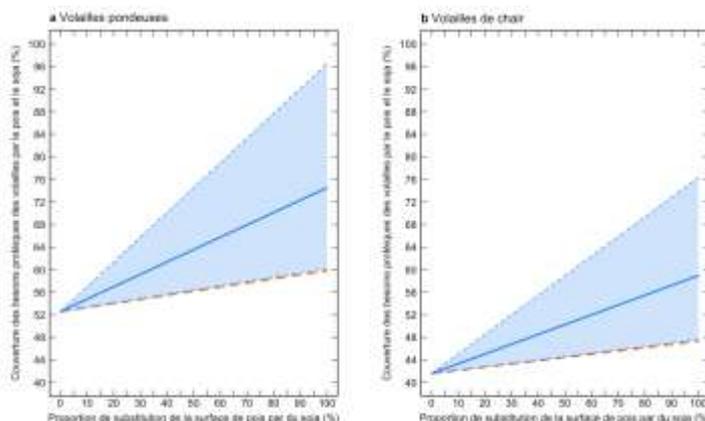


Figure 6 : Couverture (%) des besoins protéiques des volailles en Europe par la culture de pois protéagineux et la culture de soja en fonction de la proportion (%) de substitution de la surface de pois protéagineux par du soja. Deux productions de volailles sont considérées : (a) les volailles pondeuses, et (b) les volailles de chair. La courbe orange pointillée indique la couverture moyenne des besoins protéiques des volailles, estimée à partir de la base de données FAOSTAT sans utilisation des résultats de la méta-analyse. La courbe bleue continue indique la couverture moyenne des besoins protéiques des volailles, estimée à partir de la base de données FAOSTAT avec utilisation des résultats de la méta-analyse. Les deux courbes bleues pointillées indiquent l'intervalle de confiance 95% associé à la couverture moyenne des besoins protéiques des volailles, estimées à partir de la base de données FAOSTAT avec utilisation des résultats de la méta-analyse.

Conclusion

Dans cet article, nous avons illustré l'intérêt de la base de données mondiale mise à disposition par Cernay et al. (2016) pour comparer des espèces de légumineuses et évaluer leurs effets sur les cultures suivantes. Cette base de données inclut les rendements de nombreuses espèces de légumineuses à graines comparées sur des sites expérimentaux. Elle inclut également d'autres types de données, comme les coordonnées géographiques et les conditions pédoclimatiques des sites expérimentaux, les rendements des espèces cultivées suivantes, les variétés, les techniques culturales (travail du sol, fertilisation, pesticides, dates, densité de semis, etc.), et d'autres variables que le rendement en grain (biomasses aériennes, quantités en azote dans le sol ou les plantes). Ainsi, de nombreuses analyses complémentaires pourraient être réalisées, pour affiner celles présentées ici, par exemple pour explorer l'impact de la diversité génétique au sein de chaque espèce de légumineuses, des pratiques, des interactions génotypes*environnement*conduites, ou de l'impact de la position géographique des essais et donc des conditions pédoclimatiques. Le nombre de données disponibles diffère entre les espèces de légumineuses et les régions. Nos analyses en tiennent compte de manière transparente, car nous avons calculé des intervalles de confiance qui reflète l'incertitude des estimations.

Ces résultats préliminaires montrent que la fève est une des espèces de légumineuses à graines les plus performantes en Europe. Les performances productives de la fève sont similaires ou supérieures à celles du pois protéagineux pour l'ensemble des critères étudiés en Europe. L'incertitude associée à ses performances est faible. Le classement obtenu pour la fève en Europe est confirmé en Amérique du Nord et Océanie. L'effet de la fève sur les rendements des céréales suivantes est positif, et est le moins impacté par la dose de fertilisation azotée appliquée sur les céréales ; cet effet ne devient négligeable qu'à partir d'une dose de fertilisation azotée supérieure à 198 kg N ha⁻¹ appliquée sur les céréales. Le pois protéagineux est également une espèce performante en Europe. Ses niveaux de production sont similaires à ceux de la fève pour l'ensemble des critères étudiés. L'effet du pois protéagineux sur les rendements des céréales suivantes devient négligeable à partir d'une dose de fertilisation azotée supérieure à 168 kg N ha⁻¹ appliquée sur les céréales. Les résultats montrent également que le soja et les lupins ont de bonnes performances productives en Europe pour plusieurs critères. Les bons niveaux de production du soja sont principalement dus à ses graines riches en protéines et en énergie brute. L'effet du soja sur les rendements des céréales suivantes est limité, et devient négligeable à partir d'une dose de fertilisation azotée supérieure à 135 kg N ha⁻¹ appliquée sur les céréales.

Certaines espèces de lupins (e.g., le lupin à feuilles étroites) présentent des performances productives intéressantes par rapport à celles du pois protéagineux en Europe, en particulier sur les quantités de protéines dans les graines. A l'instar de la fève, les lupins sont les espèces de légumineuses à graines qui ont l'effet le plus élevé sur les rendements des céréales suivantes. Leur effet tend à devenir négligeable qu'à partir d'une dose de fertilisation azotée supérieure à 190 kg N ha⁻¹ appliquée sur les céréales. La lentille et le pois chiche ont des performances productives moins bonnes que celles du pois protéagineux pour plusieurs critères en Europe. Leurs rendements en grains et leurs quantités en protéines dans les graines sont plus faibles que ceux du pois protéagineux. L'effet du pois chiche sur les rendements des céréales suivantes devient négligeable à partir d'une dose de fertilisation azotée supérieure à 124 kg N ha⁻¹ appliquée sur les céréales. Malgré leurs performances productives relativement faibles, la lentille, le pois chiche, et le haricot commun ont des propriétés nutritionnelles intéressantes qui permettent de les utiliser préférentiellement en alimentation humaine – un débouché généralement plus rémunérateur que celui de l'alimentation animale.

Les classements obtenus en Amérique du Nord et Océanie montrent qu'il serait intéressant de tester plusieurs espèces de légumineuses à graines dans de futures expérimentations agronomiques en Europe afin de préciser leurs intérêts pour l'agriculture européenne, en particulier les lupins, les gesses, et les vesces. Cependant, toutes les espèces de légumineuses à graines ne peuvent pas être cultivées

dans toutes les régions de l'Europe, comme le soja, dont l'extension est limitée par ses besoins en eau, ou le lupin jaune, qui ne se développe de manière satisfaisante que dans des conditions pédologiques particulières. Afin de diversifier les systèmes de cultures européens, le développement d'une diversité de légumineuses à graines ou autres légumineuses, sous différentes formes (cultures pures, associées, plantes de services, etc.), doit être encouragé.

Références bibliographiques

- AGRESTE, 2014. Enquêtes sur les pratiques culturales 2011. La fertilisation, Les Dossiers AGRESTE, 21.
- Akaike H. 1974. A new look at the statistical model identification. *IEEE T Automat. Contr.* 19:716–723.
- Angus J.F., Kirkegaard J.A., Hunt J.R., Ryan M.H., Ohlander L., Peoples M.B., 2015. Break crops and rotations for wheat. *Crop Pasture Sci.* 66, 523–552.
- Bennett A.J., Bending G.D., Chandler D., Hilton S., Mills P., 2012. Meeting the demand for crop production: the challenge of yield decline in crops grown in short rotations. *Biological Reviews* 87, 52–71.
- Bues A., Preissel S., Reckling M., Zander P., Kuhlman T., Topp K., Watson C., Lindström K., Stoddard F.L., Murphy-Bokern D., 2013. The environmental role of protein crops in the new Common Agricultural Policy. European Parliament. <http://www.legumefutures.de/legumefuturesnews/30052013brussels.html>. Accès en octobre 2014.
- Cernay C., Ben-Ari T., Pelzer E., Meynard J.M., Makowski D., 2015. Estimating variability in grain legume yields across Europe and the Americas. *Scientific reports*, 5, 11171
- Cernay C., 2016. Identifier des légumineuses à graines productives en Europe par synthèses quantitatives de données à large échelle. Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay préparée à l'Institut des sciences et industries du vivant et de l'environnement (AgroParisTech). 326p.
- Cernay C., Pelzer E., Makowski D., 2016. A global experimental dataset for assessing grain legume production. *Sci. Data* 3, 160084.
- Crépon K., Marget P., Peyronnet C., Carrouée B., Arese P., Duc G., 2010. Nutritional value of faba bean (*Vicia faba* L.) seeds for feed and food. *Field Crop. Res.* 115, 329–339.
- De Visser C.L.M., Schreuder R., Stoddard F., 2014. The EU's dependency on soya bean import for the animal feed industry and potential for EU produced alternatives. *OCL* 21, D407.
- Deytieux V., Nemecek T., Freiermuth Knuchel R., Gaillard G., Munier-Jolain N.M., 2012. Is Integrated Weed Management efficient for reducing environmental impacts of cropping systems? A case study based on life cycle assessment. *European Journal of Agronomy* 36, 55–65.
- D'Mello J.P.F., 1992. Chemical constraints to the use of tropical legumes in animal nutrition. *Anim. Feed Sci. Tech.* 38, 237–261.
- Erskine W., Sarker A., Kumar S., 2011. Crops that feed the world 3. Investing in lentil improvement toward a food secure world. *Food Secur.* 3, 127–139.
- European Commission, 2015. EU Agricultural Outlook. Prospects for EU agricultural markets and income 2015-2025. European Commission. http://ec.europa.eu/agriculture/markets-and-prices/medium-term-outlook/index_en.htm. Accès en juin 2016.
- European Feed Manufacturers' Federation, 2016. Annual report 2015-2016. European Feed Manufacturers' Federation. <http://www.fefac.eu/>. Accès en septembre 2016.
- Evans J., McNeill A.M., Unkovich M.J., Fettel N.A., Heenan D.P., 2001. Net nitrogen balances for cool-season grain legume crops and contributions to wheat nitrogen uptake: a review. *Aust. J. Exp. Agr.* 41, 347–359.
- FAOSTAT, 2016. Statistics Division of Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://faostat3.fao.org/home/E>. Accès en septembre 2016.
- Flores F., Nadal S., Solis I., Winkler J., Sass O., Stoddard F.L., Link W., Raffiot B., Muel F., Rubiales D., 2012. Faba bean adaptation to autumn sowing under European climates. *Agron. Sustain. Dev.* 32, 727–734.

- Flores F., Hybl M., Knudsen J.C., Marget P., Muel F., Nadal S., Narits L., Raffiot B., Sass O., Solis I., Winkler J., Stoddard F.L., Rubiales D., 2013. Adaptation of spring faba bean types across European climates. *Field Crop. Res.* 145, 1–9.
- FranceAgriMer, 2016. Données et bilans. Les filières animales terrestres et aquatiques. Bilan 2015. Perspectives 2016. FranceAgriMer. [http://www.franceagrimer.fr/Stockage-Actualites/Publication-Bilan-2015-Perspectives-2016-des-filieres-animales-terrestres-et-aquatiques/\(filiere\)/539/\(nodeActu\)/546](http://www.franceagrimer.fr/Stockage-Actualites/Publication-Bilan-2015-Perspectives-2016-des-filieres-animales-terrestres-et-aquatiques/(filiere)/539/(nodeActu)/546). Accès en septembre 2016.
- Gilani G.S., Cockell K.A., Sepehr E., 2005. Effects of antinutritional factors on protein digestibility and amino acid availability in foods. *J. AOAC Int.* 88, 967–987.
- Guillamón E., Pedrosa, M.M., Burbano C., Cuadrado C., Sánchez M. de C., Muzquiz M., 2008. The trypsin inhibitors present in seed of different grain legume species and cultivar. *Food Chem.* 107, 68–74.
- Hache E., 2015. Géopolitique des protéines. *Rev. Int. Strat.* 97, 36–46.
- Hanbury C.D., White C.L., Mullan B.P., Siddique K.H.M., 2000. A review of the potential of *Lathyrus sativus* L. and *L. cicera* L. grain for use as animal feed. *Anim. Feed Sci. Tech.* 87, 1–27.
- Hardarson G., Atkins C., 2003. Optimising biological N₂ fixation by legumes in farming systems. *Plant Soil* 252, 41–54.
- Hossard L., Archer D.W., Bertrand M., Colnenne-David C., Debaeke P., Ernfors M., Jeuffroy M.-H., Munier-Jolain N., Nilsson C., Sanford G.R., Snapp S.S., Jensen E.S., Makowski D., 2016. A meta-analysis of maize and wheat yields in low-input vs. conventional and organic systems. *Agron. J.* 108, 1155–1167.
- Jezierny D., Mosenthin R., Bauer E., 2010. The use of grain legumes as a protein source in pig nutrition: a review. *Anim. Feed Sci. Tech.* 157, 111–128.
- Jouffret P., Labalette F., Parachini E., 2015. Analyse multicritère de la production de soja dans des exploitations agricoles contrastées du Sud-Ouest de la France. OCL 22, D505.
- Jukanti A.K., Gaur P.M., Gowda C.L.L., Chibbar R.N., 2012. Nutritional quality and health benefits of chickpea (*Cicer arietinum* L.): a review. *Br. J. Nutr.* 108, 11–26.
- Koivunen E., Partanen K., Perttilä S., Palander S., Tuunainen P., Valaja J., 2016. Digestibility and energy value of pea (*Pisum sativum* L.), faba bean (*Vicia faba* L.) and blue lupin (narrow-leaf) (*Lupinus angustifolius*) seeds in broilers. *Anim. Feed Sci. Tech.* 218, 120–127.
- Krön M., Bittner U., 2015. Danube Soya – improving European GM-free soya supply for food and feed. OCL 22, D509.
- Lassaletta L., Billen G., Grizzetti B., Anglade J., Garnier J., 2014. 50 year trends in nitrogen use efficiency of world cropping systems: the relationship between yield and nitrogen input to cropland. *Environ. Res. Lett.* 9, 105011.
- Le Cadre P., Pressenda F., Labalette F., Peyronnet C., 2015. Valorisation de tourteaux de soja issus d'une production locale non OGM chez les fabricants d'aliments. OCL 22, D507.
- Longstaff M., McBain B., McNab J.M., 1991. The antinutritive effect of proanthocyanidin-rich and proanthocyanidin-free hulls from field beans on digestion of nutrients and metabolisable energy in intact and caecotomised cockerels. *Anim. Feed Sci. Tech.* 34, 147–161.
- Lucas M.M., Stoddard F.L., Annicchiarico P., Frías J., Martínez-Villaluenga C., Sussmann D., Duranti M., Seger A., Zander P.M., Pueyo J.J., 2015. The future of lupin as a protein crop in Europe. *Front. Plant Sci.* 6, 705.
- Magrini M.-B., Anton M., Cholez C., Corre-Hellou G., Duc G., Jeuffroy M.-H., Meynard J.-M., Pelzer E., Voisin A.-S., Walrand S., 2016. Why are grain-legumes rarely present in cropping systems despite their environmental and nutritional benefits? Analyzing lock-in in the French agrifood system. *Ecol. Econ.* 126, 152–162.
- Martin N., 2014. What is the way forward for protein supply? The European perspective. OCL 21, D403.
- Martin N., 2015. Domestic soybean to compensate the European protein deficit: illusion or real market opportunity? OCL 22, D502.

- Maury P., Andrianasolo F.N., Alric F., Berger M., Beugniet G., Chambert C., Champolivier L., Doumenc A., Estragnat A., Gras A., Jeanson P., Jouffret P., Labalette F., Thomas R., Justes E., Debaeke P., 2015. Le semis très précoce : une stratégie agronomique pour améliorer les performances du soja en France ? OCL 22, D503.
- Miller P.R., McConkey B.G., Clayton G.W., Brandt S.A., Staricka J.A., Johnston A.M., Lafond G.P., Schatz B.G., Baltensperger D.D., Neill K.E., 2002. Pulse crop adaptation in the northern Great Plains. *Agron. J.* 94, 261–72.
- Mueller N.D., West P.C., Gerber J.S., MacDonald G.K., Polasky S., Foley J.A., 2014. A tradeoff frontier for global nitrogen use and cereal production. *Environ. Res. Lett.* 9, 54002.
- Multari S., Stewart D., Russell W.R., 2015. Potential of fava bean as future protein supply to partially replace meat intake in the human diet. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 14, 511–522.
- Peoples M.B., Brockwell J., Herridge D.F., Rochester I.J., Alves B.J.R., Urquiaga S., Boddey R.M., Dakora F.D., Bhattarai S., Maskey S.L., Sampet C., Rerkasem B., Khan D.F., Hauggaard-Nielsen H., Jensen E.S., 2009. The contributions of nitrogen-fixing crop legumes to the productivity of agricultural systems. *Symbiosis* 48, 1–17.
- Pinheiro J., Bates D., DebRoy S., Sarkar D., and R Development Core Team. 2013. R package “nlme”: linear and nonlinear mixed effects models. Version 3.1.111.
- Preissel S., Reckling M., Schläfke N., Zander P., 2015. Magnitude and farm-economic value of grain legume pre-crop benefits in Europe: A review. *Field Crops Research* 175, 64–79.
- Quinsac A., Labalette F., Carré P., Parachini E., Jouffret P., 2015. Simulation technico-économique d'une filière locale de valorisation du soja en alimentation animale dans le Sud-Ouest de la France. OCL 22, D506.
- Recknagel J., 2015. Le soja local en Allemagne, une demande soutenue, une offre qui s'étoffe. OCL 22, D508.
- Schneider A., et al. 2015. Les légumineuses pour des systèmes agricoles et alimentaires durables. Schneider A., et Huyghe C., coord. Editions Quæ, Versailles, 2015, 474 p
- Seymour M., Kirkegaard J.A., Peoples M.B., White P.F., French R.J., 2012. Break-crop benefits to wheat in western Australia – insights from over three decades of research. *Crop Pasture Sci.* 63, 1-16.
- Siddique K.H.M., Erskine W., Hobson K., Knights E.J., Leonforte A., Khan T.N., Paull J.G., Redden R., Materne M., 2013. Cool-season grain legume improvement in Australia – use of genetic resources. *Crop Pasture Sci.* 64, 347–360.
- Singh U., 1988. Antinutritional factors of chickpea and pigeonpea and their removal by processing. *Plant Foods Hum. Nutr.* 38, 251–261.
- Vaz Patto M.C., Rubiales D., 2014. Lathyrus diversity: available resources with relevance to crop improvement – *L. sativus* and *L. cicera* as case studies. *Ann. Bot.* 113, 895–908.
- Voisin A.-S., Guéguen J., Huyghe C., Jeuffroy M.-H., Magrini M.-B., Meynard J.-M., Mougél C., Pellerin S., Pelzer E., 2014. Legumes for feed, food, biomaterials and bioenergy in Europe: a review. *Agron. Sustain. Dev.* 34, 361–380.
- Yan Z.-Y., Spencer P.S., Li Z.-X., Liang Y.-M., Wang Y.-F., Wang C.-Y., Li F.-M., 2006. Lathyrus sativus (grass pea) and its neurotoxin ODAP. *Phytochemistry* 67, 107–121.

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0).



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>

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 », la date de sa publication, et son URL).