

Systèmes de culture métropolitains : fourniture de protéines et coût environnemental

Marie-Helene Jeuffroy, Pierre Cellier, Catherine Mignolet

▶ **To cite this version:**

Marie-Helene Jeuffroy, Pierre Cellier, Catherine Mignolet. Systèmes de culture métropolitains : fourniture de protéines et coût environnemental. "Déméter 2017 : Économie et stratégies agricoles", Club Déméter, 480 p., 2016. hal-02798290

HAL Id: hal-02798290
https://hal.inrae.fr/hal-02798290

Submitted on 5 Jun 2020

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 - ShareAlike 4.0 International License

Systèmes de culture métropolitains : fourniture de protéines et coût environnemental

par Madame Marie-Hélène Jeuffroy

UMR Agronomie,

INRA, AgroParisTech, Université Paris – Saclay

Thiverval – Grignon

Monsieur Pierre Cellier

UMR Ecosys

INRA, AgroParisTech, Université Paris – Saclay

Thiverval – Grignon

et Madame Catherine Mignolet

UR ASTER, INRA

Mirecourt

Liste des illustrations

Carte 1
France : évolution des surfaces en prairies artificielles entre 1970 et 2010

Carte 2
France : évolution des surfaces en blés entre 1970 et 2010

Carte 3
France : évolution des surfaces en colza entre 1970 et 2010

Graphique 1
France : évolution entre 1961 et 2014
de la production de protéines des grandes cultures et des fourrages et prairies

Graphique 2
France : évolution de la production de protéines des principales grandes cultures entre 1961 et 2014

Graphique 3
France : évolution des rendements des différentes grandes cultures entre 1961 et 2014

Graphique 4
France : évolution des différentes surfaces cultivées entre 1961 et 2014

Graphique 5
Proportion des triplets de cultures dans les terres labourables en France sur la période 2006 – 2010
et évolution de cette proportion entre les décennies 1980 et 1990 et les décennies 1990 et 2000

Graphique 6
Évolution de la teneur moyenne en protéines du blé français entre 1986 et 2011

Graphique 7
Évolution du rendement moyen du blé français entre 1986 et 2011

Graphique 8
France : évolution des émissions totales de protoxyde d'azote (N_2O)
des principales cultures et des prairies temporaires entre 1980 et 2014

Graphique 9
France : évolution des quantités de N_2O émises par unité de protéines
produites par les principales cultures et types de prairies de 1980 à 2014

Graphique 10
Trajectoires de nutrition azotée et conséquences sur le rendement et la teneur en protéines des grains

Graphique 11
Effet de la date du dernier apport d'engrais azoté
sur la teneur en protéines des grains de la variété oratorio en itinéraire technique extensif

Graphique 12
Comparaison de différentes performances
sur les parcelles cultivées en variété pure et celles d'associations variétales

Graphique 13
Évolution de la contribution du procédé haber – bosch et de ses analogues
à la production mondiale d'engrais azotés de synthèse

Graphique 14
Évolution de la production annuelle mondiale d'engrais azotés entre 1946 et 2013

Graphique 15
Coût énergétique
du plus efficace procédé de synthèse industrielle de l'ammoniac selon l'année, entre 1920 et 2000

Sommaire de l'article

1. Évolution historique de la production française de protéines

1.1. Un changement d'origine

1.2. Ce changement s'explique par une évolution des espèces cultivées

1.3. Des assolements qui se spécialisent et un recul des espèces végétales liées à la polyculture – élevage

1.4. Des successions de cultures qui se simplifient et se raccourcissent

1.5. Focus sur le blé : évolution de la fourniture de protéines en relation avec le système de culture

2. Impacts environnementaux

2.1. Émissions de protoxyde d'azote (N_2O) par culture à l'échelle de la France depuis 1980

2.2. Émissions de protoxyde d'azote (N_2O) par unité de protéines produites

3. Perspectives des systèmes de culture innovants

3.1. Introduire des légumineuses dans les systèmes comme précédents des blés et colza

3.2. Adapter la fertilisation azotée des cultures pour produire plus de protéines avec moins d'engrais azotés : l'exemple du blé tendre

3.3. Substituer la fertilisation minérale par des produits organiques

3.4. Privilégier les associations variétales

3.5. Cultiver des associations d'espèces

3.6. Associer des légumineuses compagnes aux cultures de vente

3.6.1. Le cas du blé

3.6.2. Le cas du colza

4. Conclusion

Annexe

Ammonitrate et histoire de la synthèse chimique de l'engrais azoté

Références bibliographiques

1. Évolution historique de la production française de protéines

1.1. Un changement d'origine

La production française totale de protéines a considérablement augmenté dans les cinquante dernières années. Mais ses sources ont été profondément modifiées :

- Dans les années quatre-vingt et quatre-vingt-dix, la quantité de protéines provenant des surfaces cultivées en prairies et des grandes cultures était proche, alors qu'aujourd'hui, l'écart est quasiment du simple au double (*Graphique 1*).
- La quantité issue des grandes cultures a plus que quadruplé entre 1960 et 2014. La plus grande fraction provient du blé, la culture dominante en termes de surfaces, et le reste de l'orge et du maïs (*Graphique 2*).
- La quantité de protéines issue de légumineuses (principalement du pois) a fortement augmenté durant les années quatre-vingt et quatre-vingt-dix, puis considérablement décru (*Graphique 2*).
- Ces évolutions sont, pour le blé, l'orge et le maïs, liées aux augmentations de rendement (*Graphique 3*) et, pour le pois, à la chute des surfaces (*Graphique 4*).

1.2. Ce changement s'explique par une évolution des espèces cultivées

Depuis les années soixante-dix, l'agriculture française connaît de profondes mutations, encadrées et pilotées par la Politique agricole européenne (PAC) et par les impératifs des marchés. Cette modernisation se traduit par des évolutions agronomiques et techniques sans précédent. Elle s'accompagne aussi de dynamiques spatiales qui ont créé, par effet d'homogénéisation des systèmes de production, les grandes régions agricoles que nous connaissons aujourd'hui.
L'une des tendances fortes de ces quarante dernières années est cette spécialisation des exploitations – les unes produisant des cultures sans élevage, les autres des animaux (presque) sans cultures – car elle a conduit à la spécialisation de régions entières, traditionnellement dédiées à une activité de polyculture – élevage. Celles dotées d'avantages agronomiques se sont consacrées aux grandes cultures et celles bénéficiant de situations commerciales et industrielles favorables ont concentré les activités d'élevage [1]. Autrement dit, la « *modernisation* » est donc majoritairement basée sur la spécialisation des territoires autour d'un nombre restreint de productions.

1.3. Des assolements qui se spécialisent et un recul des espèces végétales liées à la polyculture – élevage

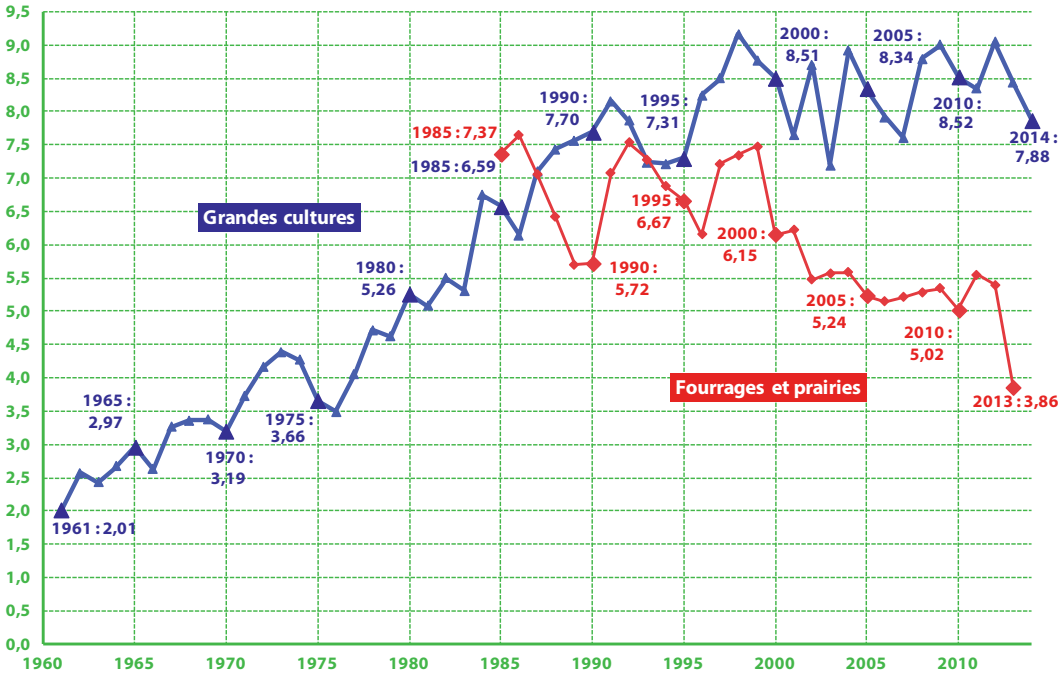
Ces dynamiques agricoles sont associées à d'importants changements d'usage des sols, en particulier une forte évolution des systèmes de culture.
Depuis les années soixante-dix, l'assolement français se caractérise par l'augmentation constante des surfaces en blé et le développement spectaculaire des surfaces en colza (*Graphique 4*), au détriment des prairies permanentes et des espèces végétales liées à la polyculture – élevage (luzerne, orge d'hiver). Dans de nombreuses régions d'élevage comme la Bretagne, la Normandie, les Pays de la Loire ou la Lorraine, la diminution des surfaces en herbe est partiellement compensée par la progression de celles de maïs fourrage, moyennant souvent des aménagements tels le drainage. Cette progression du maïs fourrage a été particulièrement marquée dans les années soixante-dix et quatre-vingt, en relation avec l'intensification de la production laitière et le développement des ateliers d'engraissement de jeunes bovins.
L'évolution de la localisation des surfaces en luzerne – qui constitue aujourd'hui la totalité des prairies artificielles – est emblématique du déclin des exploitations de polyculture – élevage [2] (*Carte 1*). En 1970, la luzerne est présente sur une large partie du territoire et, généralement, auto-consommée par le bétail dans les exploitations où elle est cultivée, avec des surfaces pouvant atteindre par endroits 10 à 15 % de la surface agricole utile (SAU). Quarante ans plus tard, en 2010, elle a quasiment disparu, hormis dans le sud-est et en Champagne crayeuse dont les sols calcaires à forte réserve hydrique favorisent une production élevée : d'où l'implantation d'usines de déshydratation produisant des bouchons, incorporés dans les aliments du bétail vendus aux éleveurs des régions spécialisées. Mais, même dans ces régions, la production décline depuis les années deux mille en raison de la hausse du prix de l'énergie, la baisse du soutien européen et la concurrence du tourteau de soja venu du continent américain.

1 - Mignolet et *al.*, 2012.
2 - Schott *et al.*, 2010.

Graphique 1

France : évolution entre 1961 et 2014 de la production de protéines des grandes cultures et des fourrages et prairies

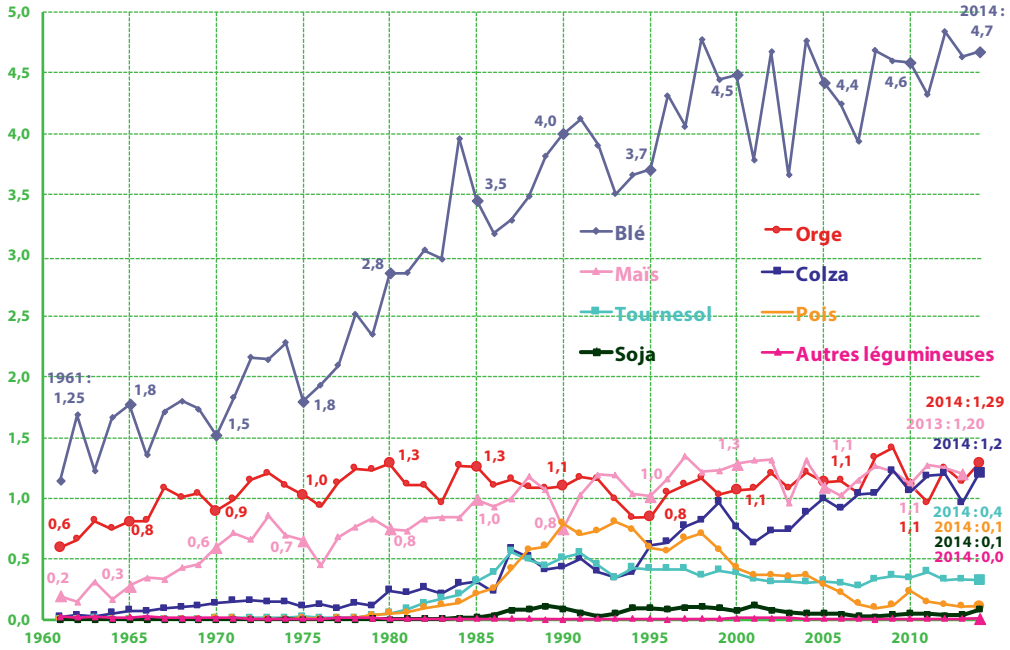
(millions de tonnes de protéines – Source : FaoStat)



Graphique 2

France : évolution de la production de protéines des principales grandes cultures entre 1961 et 2014

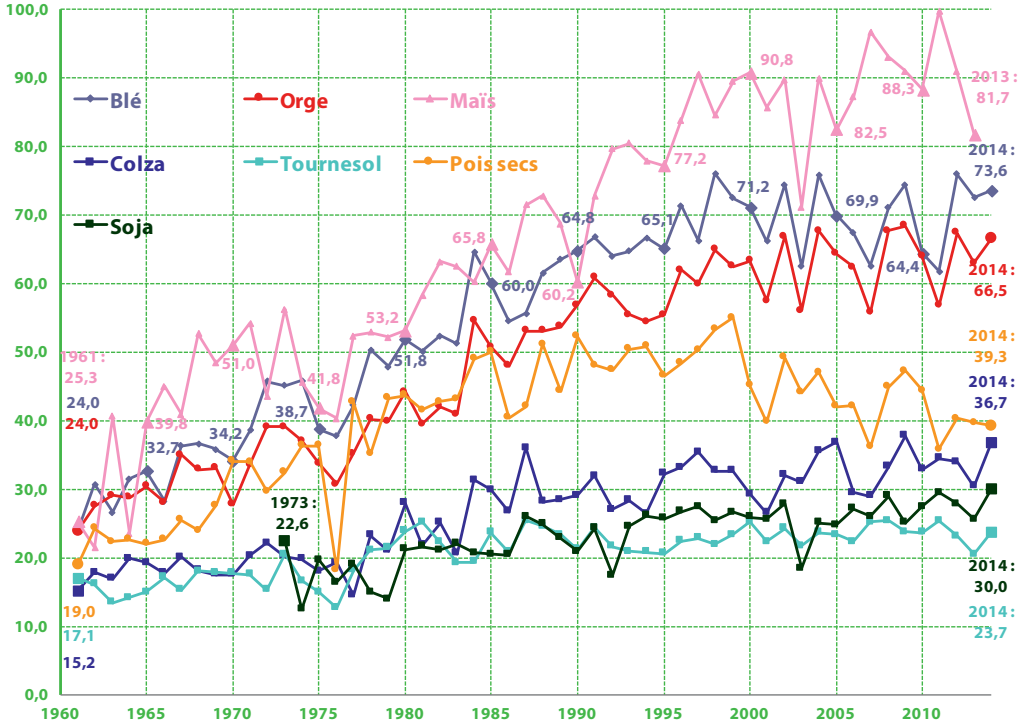
(millions de tonnes de protéines – Source : FaoStat)



Graphique 3

France : évolution des rendements des différentes grandes cultures entre 1961 et 2014

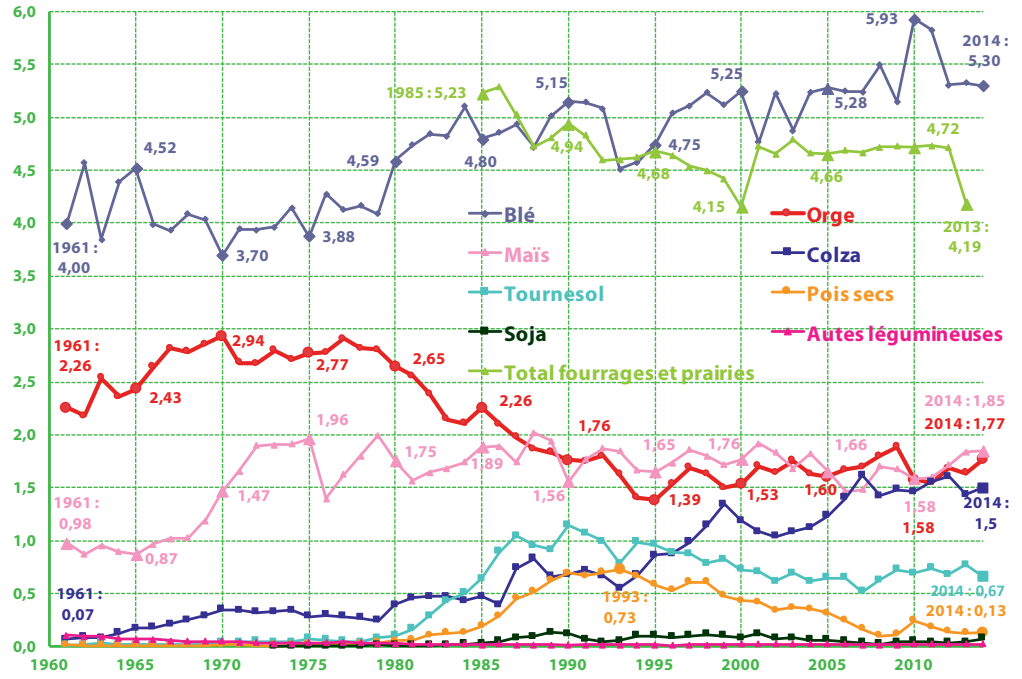
(en quintaux / hectare – Source : FaoStat)



Graphique 4

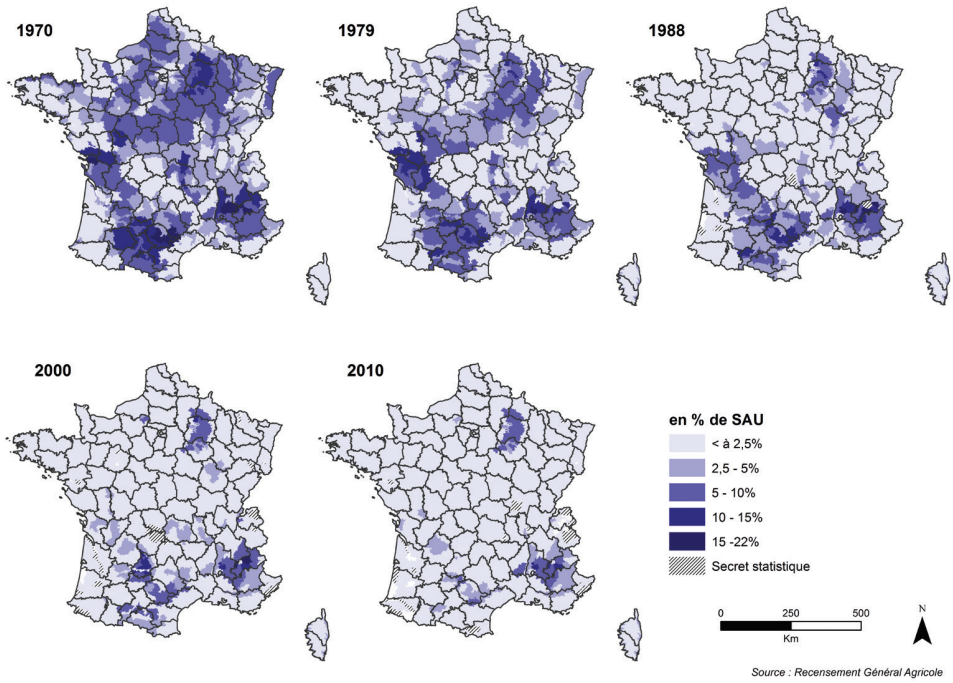
France : évolution des différentes surfaces cultivées entre 1961 et 2014

(en millions d'hectares – Source : FaoStat)



Carte 1

France : évolution des surfaces en prairies artificielles entre 1970 et 2010



Source : Recensement Général Agricole

À l'inverse, les surfaces en blé tendre ont progressé sur une large partie du territoire, en particulier dans toute la moitié nord, jusqu'à dépasser 50 % de la SAU en Beauce et dans certaines régions agricoles de l'Oise et de Seine-et-Marne (*Carte 2*).

Enfin, en relation avec la spécialisation des régions de culture, les surfaces en colza, en pois protéagineux et, dans une moindre mesure, en tournesol se sont développées de manière parfois spectaculaire à partir des années quatre-vingt, au détriment des céréales secondaires (orge, seigle, avoine), du maïs grain et de la luzerne. Le colza s'est d'abord étendu aux régions de l'est de la France où ses surfaces ont triplé en quarante ans, puis dans certaines régions céréalières du centre et de l'ouest (*Carte 3*). Dans les années deux mille, il a profité de la diminution des surfaces en pois protéagineux liée à l'irrégularité des rendements, à des problèmes parasitaires et à la diminution des aides communautaires après 1995 : il est devenu la principale culture tête de rotation dans de nombreuses régions françaises.

1.4. Des successions de cultures qui se simplifient et se raccourcissent

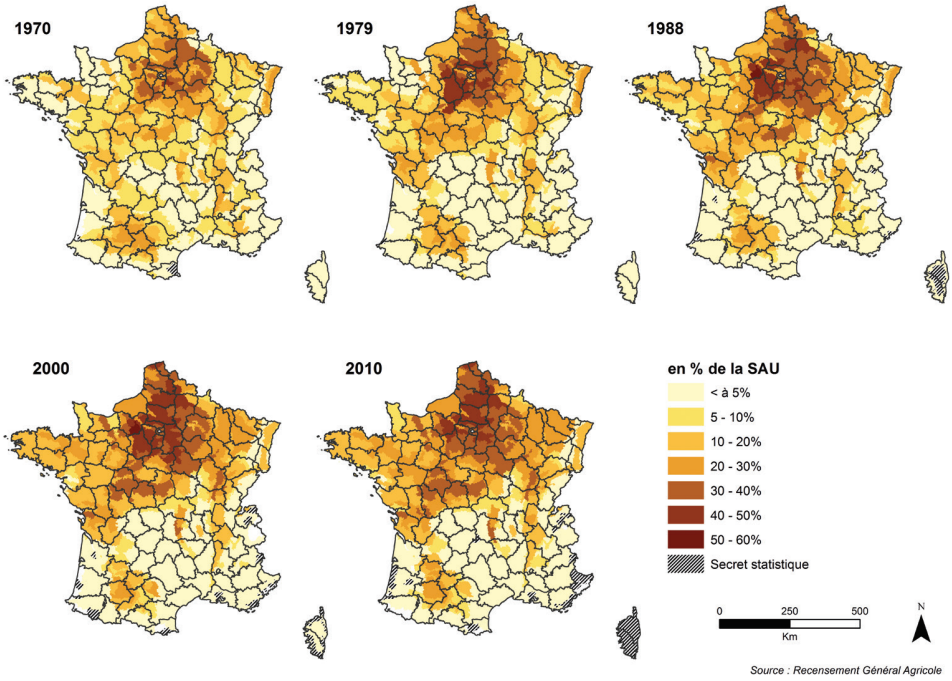
Parallèlement aux changements d'assolement, les successions de cultures se sont elles aussi modifiées, témoignant de la transformation des logiques agronomiques.

La tendance dominante est à la simplification en raison notamment de la réduction du nombre d'espèces cultivées [3]. Ainsi, comme le montre le *Graphique 5*, l'analyse [4] des suites de cultures pratiquées sur trois années consécutives (nommées *triplets de cultures*) montre que 31 triplets de cultures représentaient la moitié des terres labourables en France sur la période 1981 – 1986 et 34 sur la période 1992 – 1996. Mais il n'en fallait plus que 20 sur la période 2006 – 2010 [5]. Parallèlement, après avoir progressé dans les années quatre-vingt, les successions à base de pois ont fortement diminué et sont principalement remplacées par des successions à base de colza (colza – blé – orge,

3 - Mignolet *et al.*, 2007.
4 - Données obtenues à partir des enquêtes Teruti qui mesurent les évolutions de l'utilisation du territoire pour le ministère de l'Agriculture.
5 - Mignolet et Guichard, 2014.

Carte 2

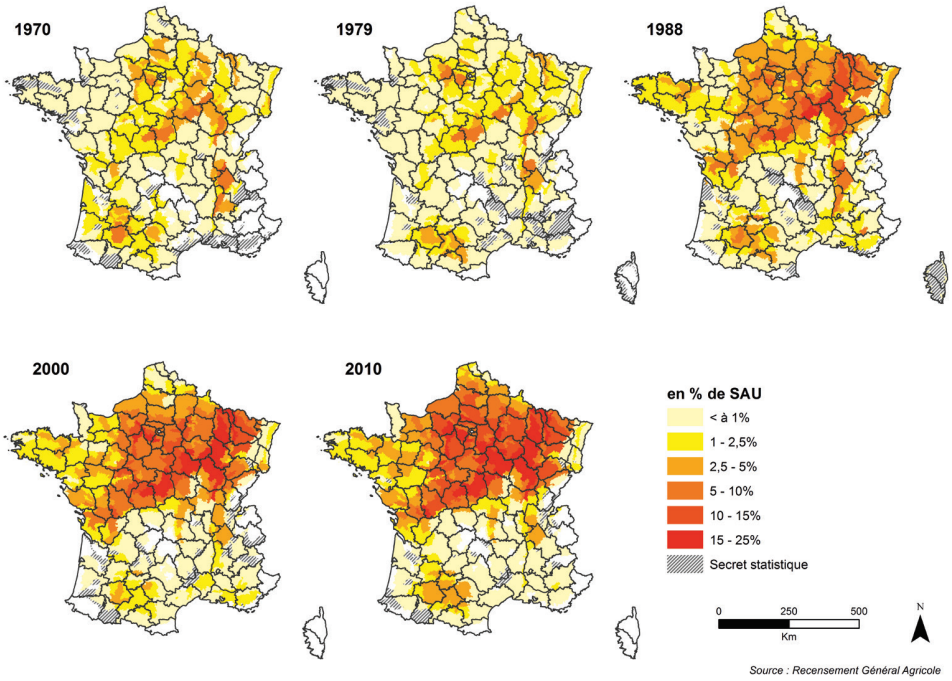
France : évolution des surfaces en blés entre 1970 et 2010



Source : Recensement Général Agricole

Carte 3

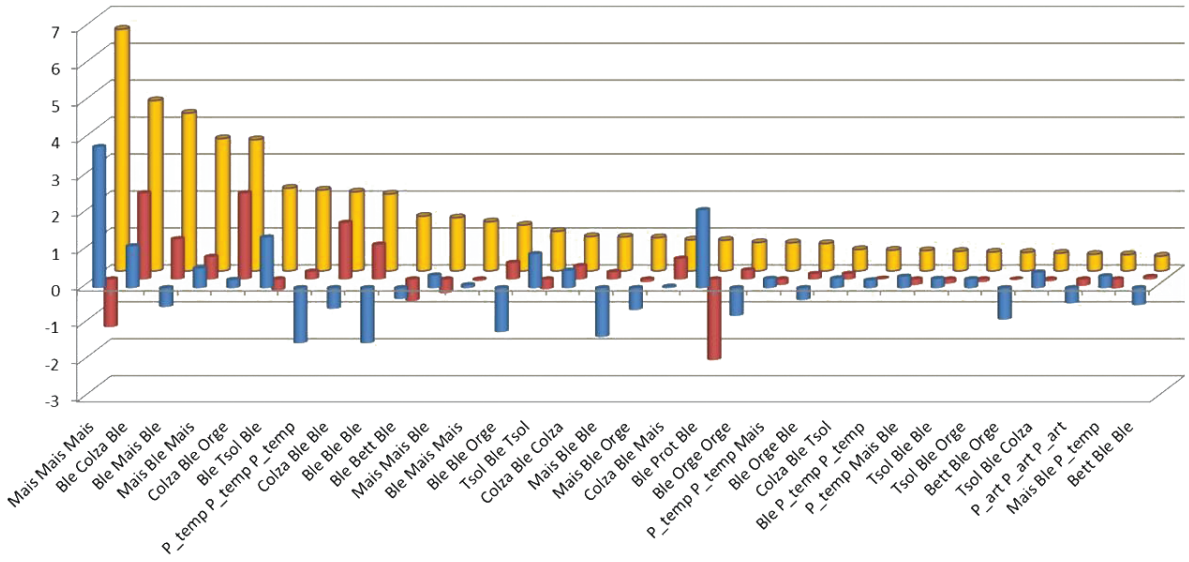
France : évolution des surfaces en colza entre 1970 et 2010



Source : Recensement Général Agricole

Graphique 5

Proportion des triplets de cultures dans les terres labourables en France sur la période 2006 – 2010 (en jaune) et évolution de cette proportion entre les décennies 1980 et 1990 (en bleu) et les décennies 1990 et 2000 (en rouge)
(Source : enquêtes Teruti)



blé – colza – blé et colza – blé – blé) et par des successions céréalières (blé – blé – blé et blé – blé – orge) en augmentation sur les années quatre-vingt-dix. De manière générale, on observe une progression des successions de cultures présentant un délai de retour court entre mêmes espèces (de type tournesol – blé – tournesol – blé, colza – blé – colza – blé ou maïs – blé – maïs – blé).

La simplification des successions culturales prend des formes différentes selon les régions [6]. À titre d'exemple et même si elle concerne quasiment toute la moitié nord de la France, la progression de la rotation colza – blé – orge est surtout marquée dans l'Est, en particulier sur les plateaux du Barrois et de la Bourgogne et dans le département de l'Yonne. De manière complémentaire, la rotation colza – blé – blé progresse essentiellement dans le Nord-Ouest, notamment les plaines de Beauce : dans le département de l'Eure, la fréquence des blés sur blés est ainsi passée de 9 % des surfaces labourables au début des années quatre-vingt-dix à plus de 20 % à la fin des années deux mille.
La spécialisation des assolements et la simplification des successions de cultures ont été rendues possibles grâce à la forte évolution des itinéraires techniques, en particulier l'augmentation constante de l'usage des intrants de synthèse (engrais azotés, produits phyto-pharmaceutiques). Dans les régions de grande culture, l'absence d'effluents d'élevage et la disparition des protéagineux ont entraîné un besoin accru d'engrais azoté. De surcroît, les rotations courtes, dominées par un petit nombre d'espèces dont la concentration s'accroît dans les territoires, sont dépendantes de l'usage des pesticides qui permettent de maîtriser les populations de parasites, ravageurs et adventices. Ainsi, plus que la fertilisation azotée minérale, les pesticides sont devenus les véritables pivots des systèmes de culture. L'ensemble de ces évolutions a eu des conséquences environnementales majeures.

1.5. Focus sur le blé : évolution de la fourniture de protéines en relation avec le système de culture

Pour certaines espèces, le débouché est davantage lié à la teneur en protéines des graines qu'à la quantité de protéines produites à l'hectare. C'est notamment le cas des blés. Entre 1985 et 1995, leur teneur moyenne en protéines a chuté en fonction de leurs

6 - Mignolet *et al.*, 2012 ; Xiao *et al.*, 2014 et 2015.

années d'inscription, passant de 12,8 % en 1985 à 10,9 % en 1993 [7] (*Graphique 6*). Cette évolution a été concomitante avec une forte augmentation de leur rendement moyen qui est passé d'environ 55 quintaux à 70 quintaux à l'hectare sur la période (*Graphique 7*).

La progression du rendement a été plus rapide que la chute de la teneur en protéines : d'où une augmentation moyenne de l'accumulation de protéines d'environ + 2 kg par hectare et par an. Cette évolution prouve que la teneur en protéines ne constituait pas un critère majeur pour l'inscription. La fertilisation azotée appliquée constitue un autre déterminant majeur de la teneur en protéines du blé. Or, entre 1994 et 2011, la dose moyenne d'engrais appliquée sur blé n'a quasiment pas varié passant de 153 kgN à l'hectare en 1994 à 163 en 2001, 157 en 2006 et 153 kg en 2011 [8]. Le rendement ayant faiblement évolué pendant cette période, la variation de la teneur en protéines des blés français est restée faible.

2. Impacts environnementaux

Les impacts environnementaux des systèmes de culture sont divers : émissions de gaz à effet de serre, de composés acidifiants ou eutrophisants, de produits phytosanitaires, impacts sur la biodiversité, … Mais il faut, dans la mesure du possible, les prendre globalement en compte pour pouvoir évaluer comparativement ces systèmes. De plus, étudier la fourniture de protéines au niveau des systèmes de cultures

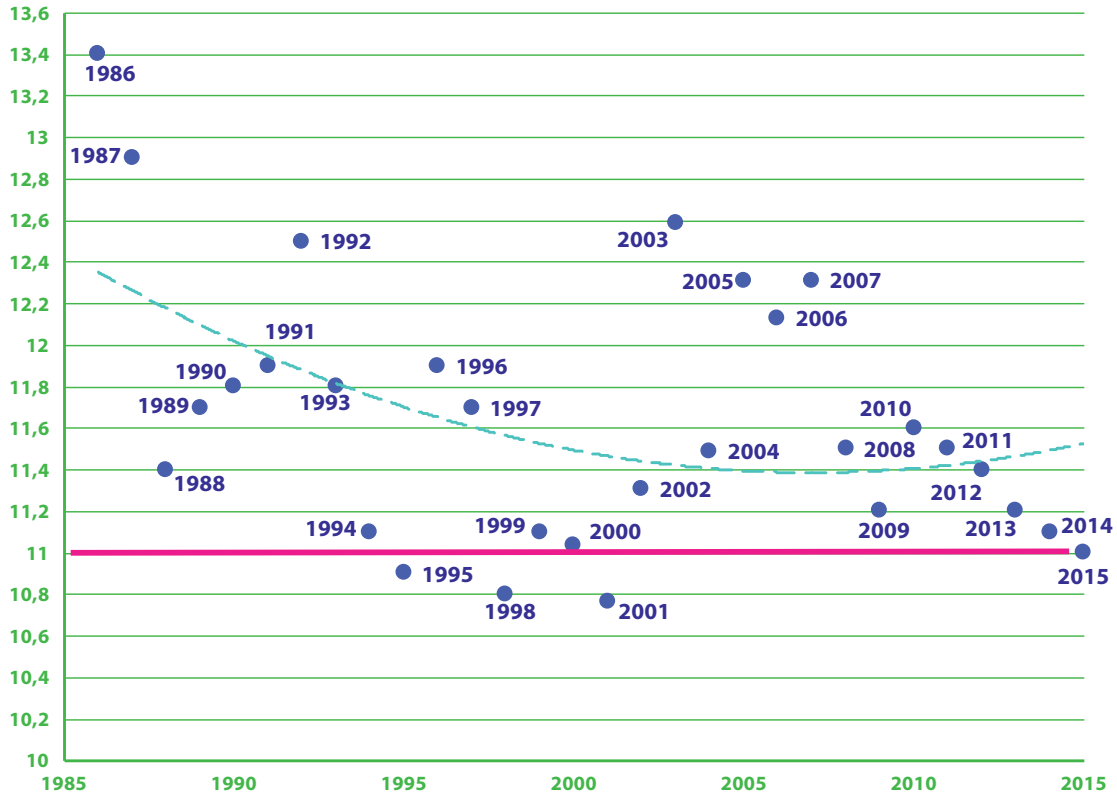
7 - Trottet et Doussinault, 2002.

8 - Données du Service de la statistique et de la prospective (SSP) du ministère de l'Agriculture.

Graphique 6

Évolution de la teneur moyenne en protéines du blé français entre 1986 et 2011

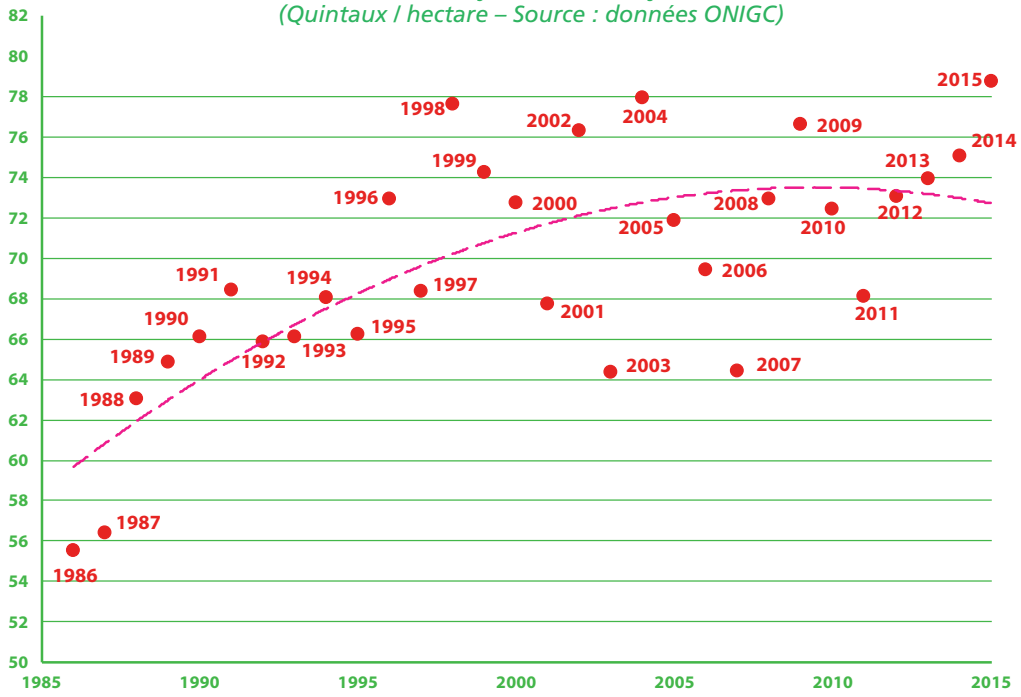
(en %) La ligne rouge horizontale à 11% de teneur en protéines correspond au seuil sous lequel se posent des problèmes de débouchés sur les marchés, notamment d'exportation (Source : données ONIGC)



Graphique 7

Évolution du rendement moyen du blé français entre 1986 et 2011

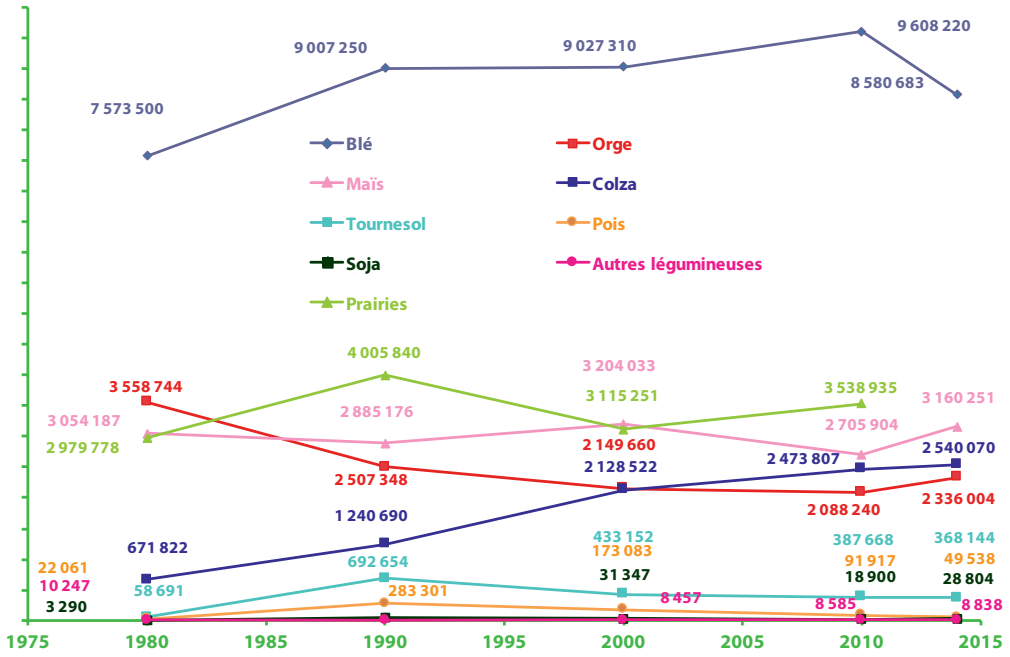
(Quintaux / hectare – Source : données ONIGC)



Graphique 8

France : évolution des émissions totales de N_2O de 1980 à 2014 des principales cultures et des prairies temporaires

(kilogrammes, chiffre global – Sources : Faostat pour les superficies de cultures, Agreste pour les apports d'azote sur chaque culture et IPPC (2006) pour le facteur d'émision de N_2O).



implique de comparer les émissions des différentes cultures fournissant des protéines afin de vérifier, par exemple, que l'augmentation des teneurs en protéines des produits récoltés ne se fait pas au détriment des émissions de gaz à effet de serre ou de composés eutrophisants par le biais de la fertilisation azotée, des opérations de travail du sol ou la protection phytosanitaire. Pour évaluer ces risques, nous allons mettre en parallèle l'évolution des ressources en protéines et les émissions de protoxyde d'azote (N_2O), gaz à effet de serre principalement produit par l'agriculture [9].

2.1. Émissions de N_2O par cultures à l'échelle de la France depuis 1980

Les émissions de N_2O par les différentes cultures de 1980 à 2010, présentées dans le *Graphique 8*, ont été estimées à partir des statistiques des surfaces cultivées de l'*Organisation des Nations unies pour l'agriculture et l'alimentation* (FAO) déjà présentées dans le *Graphique 4* et des fertilisations moyennes appliquées [10], en prenant en compte un facteur d'émission de 1 % et en considérant que la fixation symbiotique ne produisait pas de N_2O [11]. La contribution des résidus de culture n'a pas été prise ne compte.

En raison de l'importance de ses surfaces et des doses d'engrais minéraux utilisées, le blé domine largement les émissions. Il est suivi du maïs, de l'orge et du colza dont la contribution augmente rapidement, parallèlement au développement des cultures. À l'inverse, les légumineuses et le tournesol contribuent faiblement aux émissions du fait de leur faible niveau de fertilisation et de leurs surfaces inférieures. Les cultures fourragères et les prairies temporaires ont une contribution comparable à celle du maïs, malgré des surfaces plus de deux fois supérieures, en raison des niveaux de fertilisation minérale plus faibles et de la présence de légumineuses, même à des taux très variables dans ces couverts complexes [12].

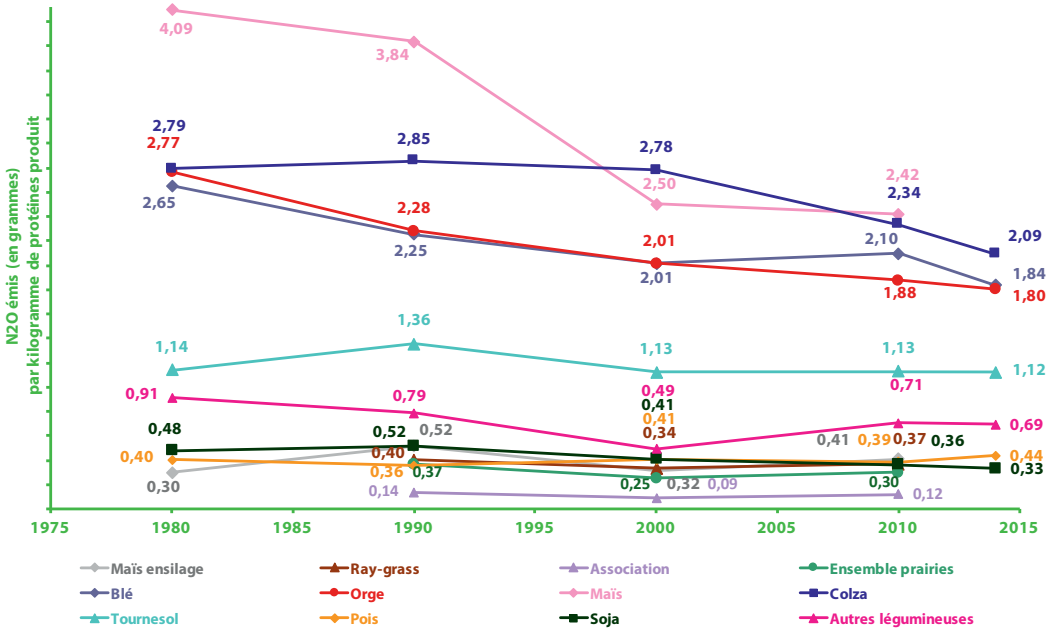
9 - Citepa, 2015.

10 - Agreste, 2000, 2014.
11 - IPCC, 2006.
12 - Schneider et Huyghe, 2015.

Graphique 9

France : évolution des quantités de N_2O émises par unité de protéines produites par les principales cultures et types de prairies de 1980 à 2014

(Sources : données du Graphisme 8 pour les émissions de N_2O et Faostat (cf. Graphique 2) pour les quantités de protéines produites)



2.2. Émissions de N_2O par unité de protéines produites

Les estimations de quantités de N_2O émises par unité de protéines produites par les différentes cultures montrent des rapports plus élevés pour les principales cultures (blé, orge, maïs et colza), mais aussi une tendance régulière à la décroissance (*Graphique 9*). Celle-ci s'explique par l'augmentation des rendements qui ne s'est pas accompagnée d'une augmentation de la fertilisation azotée, ainsi que, plus récemment – malgré la stagnation du rendement de ces cultures – par la diminution des apports d'engrais azotés.
Parmi les grandes cultures, le tournesol se distingue par des valeurs presque deux fois inférieures aux autres. Les légumineuses cultivées (pois, soja et autres) ont des valeurs environ quatre fois plus faibles que les céréales et le colza. Les cultures fourragères et les prairies présentent des valeurs faibles, souvent inférieures aux légumineuses, même lorsqu'elles sont fertilisées (maïs ensilage, prairies de graminées).
Ces résultats prouvent donc que « *l'efficacité environnementale* » de la production de protéines par les différentes cultures est très variable, avec un classement céréales / oléagineux < tournesol < légumineuses à graines < fourrages. Les différences diminuent au fil des années en raison d'une plus grande efficacité de l'azote minéral épandu par les cultures les plus intensives, même si la décroissance des valeurs observées pour les céréales et le colza semble marquer le pas. On peut noter également les bonnes performances générales des cultures fourragères.

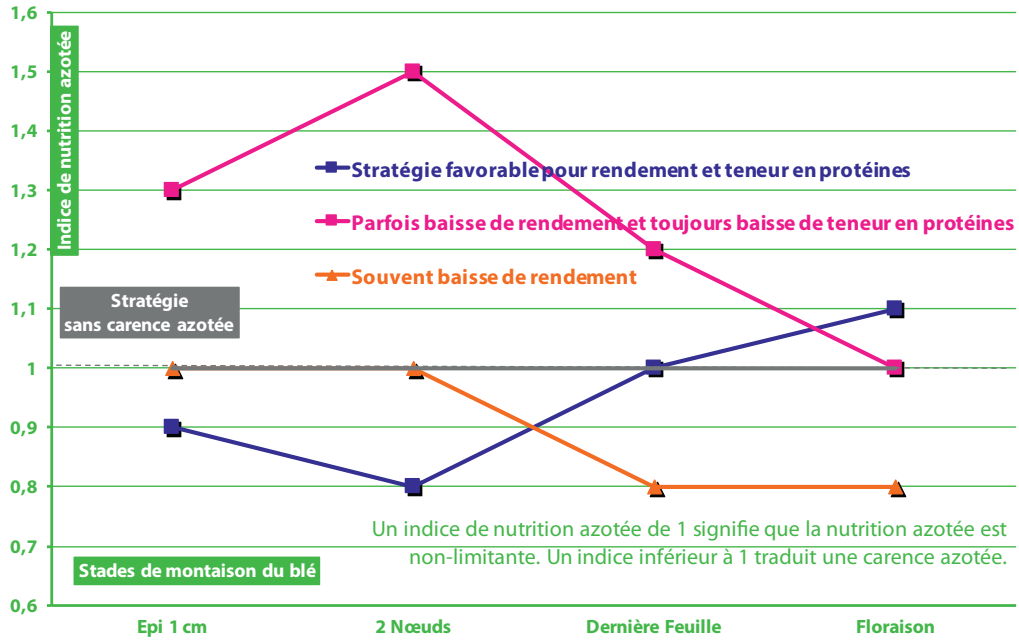
3. PERSPECTIVES DES SYSTÈMES DE CULTURE INNOVANTS

Un certain nombre de systèmes de culture innovants émergent pour répondre aux défis posés à l'agriculture en matière de protection de l'environnement et de mobilisation parcimonieuse des ressources non renouvelables. Leur fréquence reste cependant trop rare pour qu'ils soient facilement repérables dans les bases de données. Quel est leur effet sur la production de protéines ?

Graphique 10

Trajectoires de nutrition azotée et conséquences sur le rendement et la teneur en protéines des grains

(Indice de nutrition azotée (INN) en ordonnée : 1 signifie que la nutrition azotée est non-limitante ; un INN inférieur à 1 signifie une carence azotée)
(Source : d'après Jeuffroy et al., 2013)



3.1. Introduire des légumineuses dans les systèmes comme précédents des blés et colza

L'introduction de légumineuses comme précédents à blé ou à colza permet d'augmenter sensiblement le rendement de la culture suivante (en moyenne + 8 quintaux / ha sur le blé [13]) et de diminuer la quantité d'engrais azoté qui lui est appliqué (de moins 20 à moins 60 kg / ha [14]). Ainsi, même s'il est difficile d'observer des différences de teneur en protéines des grains récoltés, la production de protéines à l'hectare est accrue sur ces cultures, tout en réduisant la quantité d'engrais de synthèse utilisé.

3.2. Adapter la fertilisation azotée des cultures pour produire plus de protéines avec moins d'engrais azotés : l'exemple du blé tendre

La teneur en protéines est sensible, à la fois, à la nutrition azotée de la culture avant floraison et après ce stade. La stratégie de fertilisation peut donc être raisonnée de manière à optimiser les performances : rendement, teneur en protéines et pertes vers l'environnement.

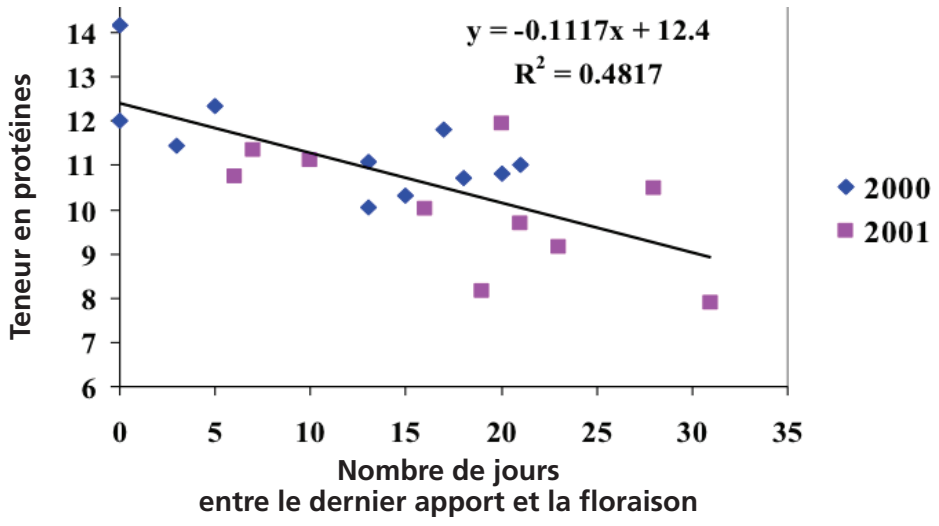
L'analyse des conséquences de périodes de carence azotée à différents moments du cycle a montré que le rendement et la teneur en protéines des grains étaient améliorés pour des cultures de blé ayant subi une carence précoce, suivie d'une période d'alimentation azotée optimale [15]. Ces connaissances conduisent à proposer une trajectoire optimale de nutrition azotée pour une culture de blé, favorable au rendement et à la teneur en protéines : celle-ci se caractérise par une période de carence « *utile* » jusqu'au stade « *2 nœuds* », puis une dynamique de croissance et d'absorption importante pendant le mois précédant la floraison (*Graphique 10*). La valorisation de l'engrais étant ainsi améliorée, le besoin d'azote par quintal de grains produits devient plus faible : on passe, par exemple, de 3 kg à 2,7 kg. Il est donc possible d'économiser de 20 à 30 unités apportées par hectare, sans affecter le rendement et en améliorant la teneur en protéines. Les stratégies de fertilisation azotée correspondantes comportent généralement la suppression du premier apport, le décalage des deuxième et troisième apports à des dates plus tardives, et / ou la modification de l'équilibre des doses entre le deuxième et le troisième.

13 - Schneider et *al.*, 2010.
14 - Jeuffroy et *al.*, 2015.
15 - Jeuffroy et al., 2013.

Graphique 11

Effet de la date du dernier apport d'engrais azoté sur la teneur en protéines des grains de la variété Oratorio en itinéraire technique extensif

(Source : données issues du réseau décrit par Loyce et al., 2012)



Construits par les agronomes afin de réduire significativement les impacts environnementaux de la production et répondre aux exigences réglementaires comme le plan Ecophyto, tout en maintenant la production à un niveau élevé, des itinéraires techniques à bas niveau d'intrants permettent des économies importantes d'intrants [16]. La teneur en protéines des grains est maintenue à un niveau satisfaisant en (1) raisonnant l'application du premier apport sur la base d'un indicateur visuel d'entrée en carence de la culture (la bande double densité) de manière à le supprimer ou le retarder partout où c'est possible et (2) en réalisant un dernier apport le plus près possible de la floraison. Il est en effet apparu que la teneur en protéines chute d'autant plus que le dernier apport est réalisé trop précocement par rapport à la floraison du blé (*Graphique 11*).

3.3. Substituer la fertilisation minérale par des produits organiques

Si la quantité d'azote à l'hectare n'est pas modifiée lors de cette substitution, il n'y a pas de modification de rendement, ni de teneur en protéines attendue. Cependant, les impacts environnementaux de ces pratiques sont sensiblement modifiés. Des chercheurs [17] ont démontré que cette technique pouvait permettre un potentiel d'atténuation unitaire des émissions de N_2O de 220 $kgCO_2e$ / ha / an, intégrant la baisse des émissions liée à l'application et à la fabrication des engrais.

3.4. Privilégier les associations variétales

La culture simultanée de plusieurs variétés dans un même champ de blé permet également d'augmenter la teneur en protéines des grains récoltés. Sur un réseau de dix-neuf parcelles conduites selon un itinéraire technique à bas niveau d'intrants réparti sur deux années, une augmentation moyenne de 0,54 point de protéines a été observée entre la récolte de l'association variétale et la moyenne des quatre variétés cultivées pures [18] (*Graphique 12*). De plus, cette pratique a permis une légère augmentation du rendement par rapport à la moyenne des rendements des mêmes variétés cultivées pures (+ 3,2 q / ha en moyenne). Ce résultat est obtenu grâce à plusieurs mécanismes :

- La réduction des maladies sur les plantes en association leur permet de maintenir un fonctionnement optimisé (notamment la photosynthèse) par rapport aux variétés pures, davantage malades.
- La réduction de maladies et, probablement, la complémentarité des systèmes racinaires des différentes variétés induisent une augmentation significative de la quantité d'azote absorbée par les plantes et de la quantité d'azote accumulée dans les grains : + 13 kg / ha en moyenne entre l'association variétale et la moyenne des quatre variétés pures [19].

Ces associations variétales permettent de réduire l'utilisation de pesticides sur blé dès lors que le choix des variétés permet de combiner des résistances complémentaires vis-à-vis de plusieurs pathogènes.

3.5. Cultiver des associations d'espèces

L'association de graminées et de légumineuses cultivées simultanément sur la même parcelle, comme un blé – pois, a également des effets positifs sur la teneur en protéines. Dans les systèmes d'agriculture biologique, où cette pratique est plus fréquente que dans les systèmes conventionnels, le gain de teneur en protéines est quasi systématique : en moyenne, + 1,3 point dans 58 situations couvrant 13 sites en France et au Danemark [20]. Dans la très grande majorité des cas, on observe aussi un gain moyen de rendement de + 6 quintaux à l'hectare. Les gains en protéines s'expliquent par deux phénomènes : d'une part, le rendement de la céréale est réduit (augmentation de la teneur en protéines grâce à la moindre dilution de la protéine) et, d'autre part, la céréale a accès à la majorité de l'azote minéral disponible dans le sol, la nutrition azotée de la légumineuse étant alors principalement basée sur la fixation symbiotique. La teneur en protéines augmente d'autant plus que l'écart entre le rendement de la céréale associée et de la céréale pure est grand [21].

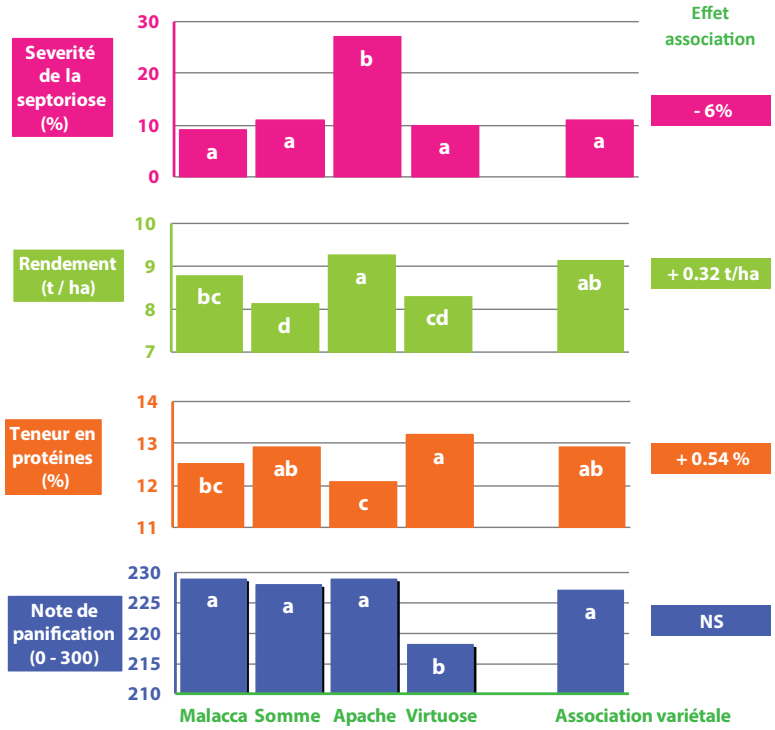
On retrouve de tels résultats dans les systèmes conventionnels, même s'ils sont moins systématiques. Le gain de protéines n'est, par exemple, pas systématique lorsque les associations, peu fertilisées pour maintenir un équilibre entre les deux espèces, sont comparées à des cultures de blé conduites tra-

16 - Meynard, 1985 ; Loyce et *al.*, 2012.
17 - Pellerin et *al.*, 2013.
18 - Belhaj Fraj, 2003 ; Pope et *al.*, 2004.
19 - Belhaj Fraj, 2003.
20 - Bedoussac et *al.*, 2015.
21 - Cohan et *al.*, 2013.

Graphique 12

Comparaison de performances sur les parcelles cultivées en variété pure et en associations variétales

L'effet association est calculé comme la différence entre la valeur de l'association et la moyenne des quatre variétés pures (Source : d'après Jeuffroy et al., 2010)



ditionnellement, c'est-à-dire de manière relativement intensive, avec un apport d'engrais azoté élevé [22].

De plus, cette pratique d'association céréale – légumineuse présente des avantages environnementaux marqués [23] car les deux espèces sont complémentaires dans l'exploration du sol : le système racinaire de la céréale grandissant plus rapidement, il explore le sol le premier et prélève les nitrates présents et oblige la légumineuse à se nourrir majoritairement à partir de la fixation symbiotique [24]. Cela permet de réduire très fortement la fertilisation azotée [25]. Par ailleurs, la complémentarité des systèmes racinaires des deux espèces favorise l'utilisation de l'azote du sol par la céréale. Pour ces raisons, le reliquat d'azote minéral dans le sol mesuré après récolte est très souvent, après une association, inférieur par rapport au pois cultivé en pur, réduisant ainsi les risques de lixiviation l'hiver suivant.

22 - Pelzer et *al.*, 2012.
23 - Pelzer et *al.*, 2012.
24 - Corre-Hellou et *al.*, 2007.
25 - Pelzer et *al.*, 2012.

3.6. Associer des légumineuses compagnes aux cultures de vente

3.6.1. Le cas du blé

Semer une légumineuse en même temps qu'une céréale d'automne, puis détruire la légumineuse au début du printemps (pour éviter une trop forte concurrence avec la céréale) permet d'accumuler de l'azote symbiotique dans le système (via la légumineuse) et de le restituer à la céréale lors de la décomposition de la légumineuse. Si la quantité d'azote accumulé par la légumineuse est assez élevée, on peut observer des conséquences positives sur la teneur en protéines de la céréale associée, allant jusqu'à des gains de 5 % [26]. 61% des quatorze essais conduits par Arvalis – Institut du Végétal entre 2008 et 2010 ont permis l'augmentation de teneur en protéines par rapport à un blé conduit seul. Néanmoins,

26 - Cohan et *al.*, 2012.

cet effet peut se faire au détriment du rendement (dans 27 % des cas) si la compétition entre les deux espèces n'est pas maîtrisée suffisamment tôt dans le cycle [27]. Dans 49 % des cas, aucun effet significatif n'a été observé, ni sur le rendement, ni sur la teneur en protéines des grains de blé.

En agriculture biologique, le choix d'un précédent cultural libérant davantage d'azote (une légumineuse) est déterminant des niveaux de protéines observées dans les parcelles [28]. De même, l'insertion d'une légumineuse fourragère comme plante de service, compagne de la céréale durant une partie de son cycle a des effets positifs sur la teneur en protéines de la céréale. Dans ces systèmes, la légumineuse fourragère compagne a plusieurs fonctions : elle est généralement semée au début de montaison du blé afin de se développer sans entrer en concurrence avec le blé jusqu'à sa récolte et de bien couvrir le sol durant toute la période d'inter-culture, en vue de maîtriser les mauvaises herbes et de fournir de l'azote à la culture suivante. Cette pratique n'est cependant pas sans risque pour la teneur en protéines : sur un réseau de huit parcelles réparties sur deux années successives où quatre espèces différentes de légumineuse compagne ont été testées, la teneur en protéines du blé associé a en effet significativement baissé par rapport à celle du blé seul, dans neuf cas sur trente-deux [29].

3.6.2. Le cas du colza

L'association du colza avec des légumineuses fourragères semées en même temps que lui, présentes pendant l'automne et disparaissant l'hiver à la faveur du gel, permet également une entrée d'azote biologique dans le système. Cette entrée se traduit, à la fin de la floraison, par 20 à 40 kgN.ha^{-1} d'azote accumulé en plus dans le colza associé par rapport au colza pur [30]. De plus, en utilisant un marquage ^{15}N, il a été montré que l'augmentation de l'azote accumulé était due non seulement à la minéralisation des résidus des légumineuses, mais aussi à l'augmentation de l'efficience d'utilisation de l'engrais azoté appliqué au printemps et de la minéralisation de la matière organique du sol [31].

Ce surplus de fourniture en azote au colza, issu de la fixation symbiotique des légumineuses associées, permet, soit de réduire la fertilisation azotée apportée au colza, pour une accumulation similaire d'azote par la culture (donc pour un même rendement et une même teneur en protéines des grains), soit d'accroître la quantité d'azote accumulée par le colza. Dans ce dernier cas, on observe parfois une augmentation du rendement, parfois une stabilité et, donc, généralement, une augmentation de la quantité de protéines produites par la culture, dans ses grains.

4. Conclusion

Le poids relatif de chaque espèce cultivée dans l'assolement français a une influence directe sur la quantité totale de protéines produites et, surtout, sur le coût environnemental de ces protéines. Introduire davantage de légumineuses, notamment en remplacement de céréales ou d'oléagineux, permettrait d'accroître la production de protéines tout en réduisant les impacts environnementaux de cette production.

Plusieurs facteurs agronomiques modifient la teneur et la quantité de protéines produites à l'hectare, sans que l'on puisse précisément chiffrer ni leur effet, ni leur évolution. Ainsi, le tassement des sols, en réduisant la disponibilité d'azote pour les plantes, contribue à réduire cette production de protéines. De même, le développement des pratiques de non-labour, en réduisant légèrement le rendement des cultures, peut conduire à une diminution des quantités de protéines produites.

Par ailleurs, la sélection, par son effet possible sur le niveau moyen de teneur en protéines des espèces, peut offrir un levier important, tout en sachant qu'il existe souvent un certain antagonisme entre rendement et teneur en protéines pour une gamme de variétés donnée.

27 - Cohan et *al.*, 2012.
28 - Casagrande et *al.*, 2009.
29 - Amossé et *al.*, 2013.
30 - Lorin et *al.*, 2016.
31 - Lorin et *al.*, 2016.

Annexe

Ammonitrate et histoire de la synthèse chimique de l'engrais azoté

par Monsieur Christian Huyghe

Directeur scientifique adjoint Agriculture – INRA

L'azote constituant un élément majeur de la fertilité des sols et de la production agricole, les humains ont toujours déployé une quête acharnée pour en disposer.

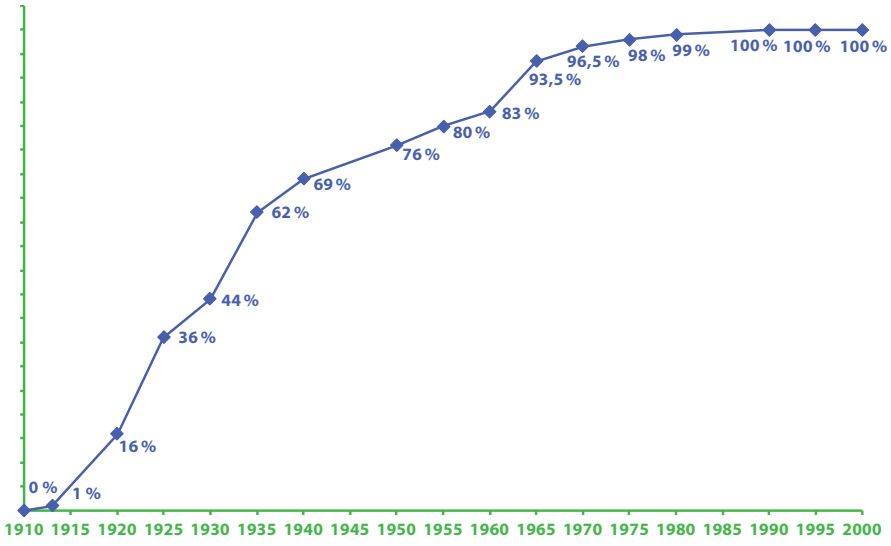
Les animaux, de par leurs capacités à consommer des fourrages et des aliments grossiers et à produire une litière à forte valeur fertilisante, étaient partie intégrante de ce cycle de fertilité. Mais ils n'assuraient que le recyclage (ou le bouclage du cycle). Une autre forme de déjections animales a longtemps été utilisée en agriculture. Il s'agit du guano qui offre de véritables ressources fossiles d'azote minéral. Il résulte de l'accumulation de fientes d'oiseaux marins dans des zones côtières sèches. Son exploitation a fortement augmenté au dix-neuvième siècle et au début du vingtième afin de répondre à la demande des agricultures européennes en plein développement : il constituait une véritable ressource stratégique.

Mais, durant des millénaires, la fixation symbiotique de l'azote par les légumineuses est restée la principale source de fertilité azotée. Grâce à la symbiose avec des bactéries se déroulant dans des organes spécialisés, localisés sur leurs racines, les légumineuses utilisent l'azote de l'air (N_2) et l'introduisent dans des molécules organiques.

La véritable révolution est celle résultant de la synthèse chimique qui a débouché sur la production d'engrais azotés de synthèse. L'ammoniac était connu et obtenu

Graphique 13

Évolution de la contribution du procédé Haber – Bosch et de ses analogues à la production mondiale d'engrais azoté de synthèse *(Sources : par Cantons-de-l'Est. Travail personnel, CC BY-SA 3.0 https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7719139)*



lors de la production de coke. Mais c'est le procédé Haber – Bosch qui a révolutionné la situation. Il doit son nom à ses deux inventeurs, les chimistes Fritz Haber et Carl Bosch. En 1909, Fritz Haber parvient à fixer, en laboratoire, l'azote atmosphérique pour produire de l'ammoniac. En 1913, l'exploitation industrielle de sa découverte est lancée par la compagnie BASF dont l'équipe, dirigée par Carl Bosch, est parvenue à résoudre la question de la gestion industrielle des très hautes pressions et celle de la sélection d'un catalyseur peu onéreux. L'ammoniac, à forte puissance explosive, présentait d'abord un réel intérêt militaire : en 1914, 8 700 tonnes sont produites sur le site industriel de BASF et la production s'intensifie dans le cadre d'un accord industriel entre l'Allemagne et l'industriel. Mais, dès la fin de la Première Guerre mondiale, il est utilisé à des fins agricoles.

Le procédé chimique Haber – Bosch sert à la synthèse de l'ammoniac (NH_3) par hydrogénation du diazote (N_2) gazeux atmosphérique par le dihydrogène (H_2) gazeux en présence d'un catalyseur, initialement à base de fer, et aujourd'hui du ruthénium sur lit de graphite. La réaction se produit à très hautes pressions (9 MPa) et très hautes températures (500 à 600°C) et elle utilise le gaz naturel comme source d'hydrogène et d'énergie.

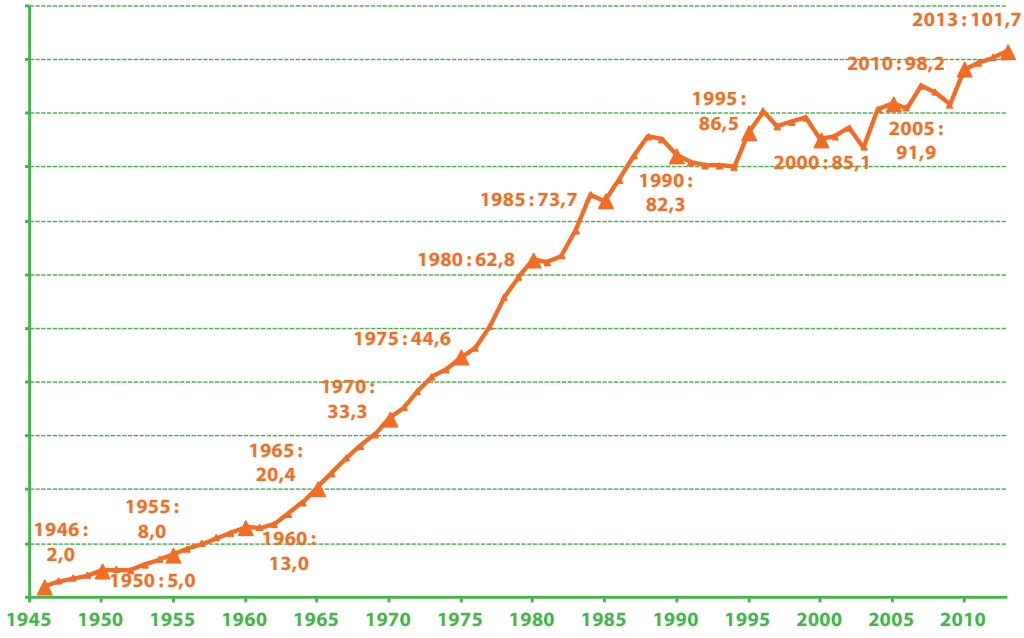
L'azote issu de la synthèse chimique s'est aujourd'hui généralisé au point d'en devenir la source unique, en dehors évidemment de la fixation symbiotique (*Graphique 13*). Et la production mondiale d'ammonitrate n'a cessé d'augmenter tout au long du vingtième siècle : elle a dépassé les 100 millions de tonnes en 2013 (*Graphique 14*).

Le coût énergétique de la synthèse a progressivement été divisé par quatre entre 1920 et 2000 (*Graphique 15*). Il a atteint une efficience énergétique proche de 0,95, celle-ci se calculant en rapportant le coût énergétique du procédé le plus efficace (25,5 giga-joules en 2000) au coût énergétique théoriquement le plus bas (20,9 GJ). Mais il faut tout de même encore 2 kg d'équivalent pétrole pour fixer un kilogramme d'azote sous forme d'ammonitrate. Réduire le coût énergétique de la synthèse constitue donc un défi majeur. Pourtant, la recherche a peu avancé pour remplacer le procédé Haber – Bosch. Seule une équipe japonaise a publié, en 2013 [32], un article présentant des résultats de synthèse obtenue à basse pression et basse température grâce à l'utilisation d'un nouveau catalyseur.

32 - Shima T., Hu S.W., Luo G., Kang X.H., Luo Y., Hou Z.M., 2013. Dinitrogen Cleavage and Hydrogenation by a Trinuclear Titanium Polyhydride Complex. *Science*, 340, 1549-1552.

Graphique 14

Évolution de la production annuelle mondiale d'engrais azotés entre 1946 et 2013 *(millions tonnes)*
(Sources : Ammoniakproduktion.svg: Orciderivative work: Cantons-de-l'Est (talk) - Ammoniakproduktion.svg, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7605426; FaoStat)



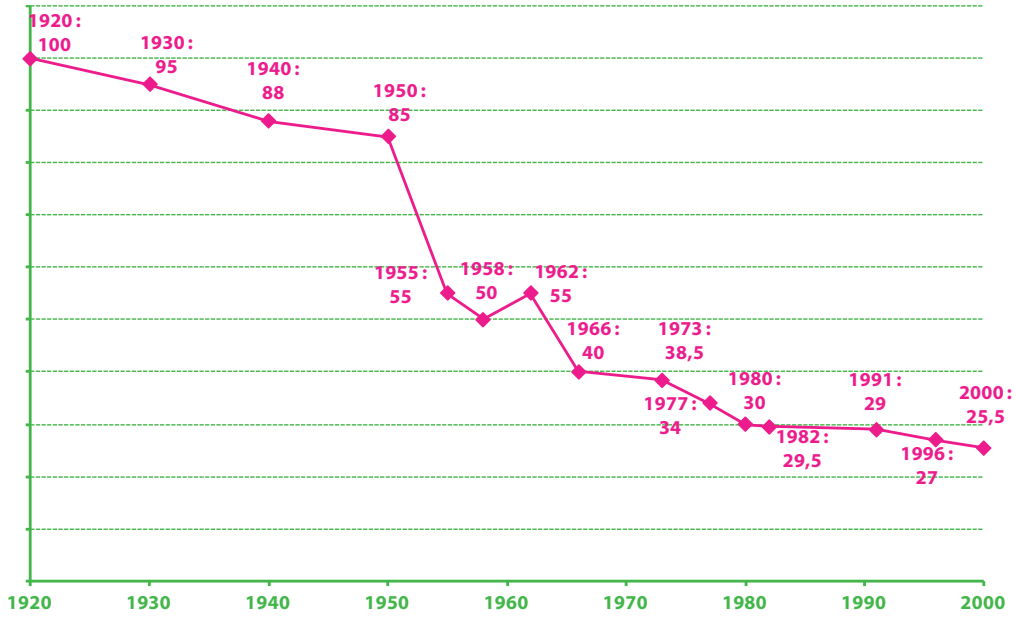
Graphique 15

Coût énergétique du plus efficace procédé de synthèse industrielle de l'ammoniac selon l'année, entre 1920 et 2000

Le coût énergétique est exprimé en giga-joules (GJ) par tonne d'ammoniac. Théoriquement, le coût le plus bas pour la réaction chimique $N_2(g) + 3\,H_2(g) \rightleftharpoons 2\,NH_3(g)$ est de 20,9 GJ par tonne d'ammoniac.

Sources : par Cantons-de-l'Est

Travail personnel, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=8796263



Références bibliographiques

- Amossé C., Jeuffroy M.H., David C., 2013. Relay intercropping of legume cover crops in orgnaic winter wheat: effects on performance and resource availability. Field Crops Research 145, 78-87.
- Bedoussac L., Journet E.P., Hauggaard-Nielsen H., Naudin C., Corre-Hellou G., Steen Jensen E., Prieur L., Justes E., 2015. Ecological principles underlying the increase of productivity achieved by cereal-grain legume intercrops in organic farming. A review. Agron. Sustain. Dev. 35, 911–935.
- Belhaj Fraj M., 2003. Évaluation de la stabilité et de la faisabilité des associations variétales de blé tendre d'hiver à destination meunière en conditions agricoles. Thèse de Doctorat, ENSA, Rennes, France.
- Casagrande M., David C., Valantin-Morison M., Jeuffroy M.H., 2009. Factors limiting the grain protein content of organic winter wheat in south-eastern France: a mixed-model approach. Agron Sustain Dev 29, 565-574.
- Cohan J.P., Corre-Hellou G., Naudin C., Bédoussac L., 2012. Plante partenaire : associer une légumineuse à un blé ne favorise au mieux que la protéine. Perspectives agricoles 391, 56-60.
- Cohan J.P., Corre-Héllou G., Naudin C., Hinsinger P., Jeuffroy M.H., Justes E., Bedoussac L., 2013. Association céréales – légumineuses récoltées en grain : de bonnes performances en fourniture d'azote limitante. Perspectives agricoles 404, 53-56.
- Corre-Hellou G., Brisson N., Launay M., Fustec J., Crozat Y., 2007. Effect of root depth penetration on soil nitrogen competitive interactions and dry matter production in pea–barley intercrops given different soil nitrogen supplies. Field Crops Research 103, 76–85.

- Jeuffroy M.H., Biarnès V., Cohan J.P., Corre-Hellou G., Gastal F., Jouffret P., Justes E., Landé N., Louarn G., Plantureux S., Schneider A., Thiébeau P., Valantin-Morison M., 2015. Performances agronomiques et gestion des légumineuses dans les systèmes de productions végétales. In « Les légumineuses pour des systèmes agricoles et alimentaires durables », A.Schneider et C.Huyghe eds. Quae, Paris.
- Jeuffroy M.H., Gate P., Machet J.M., Recous S., 2013. Gestion de l'azote en grandes cultures : les connaissances et outils disponibles permettent-ils de concilier exigences agronomiques et environnementales ? Cahiers Agricultures 22, 249-257.
- Jeuffroy M.H., Meynard J.M., de Vallavieille-Pope C., Belhaj Fraj M., Saulas P., 2010. Les associations de variétés de blé : performances et maîtrise des maladies. Le Sélectionneur Français 61, 75-84.
- Lorin M., Jeuffroy M.H., Butier A., Valantin-Morison M., 2016. Undersowing winter oilseed rape with a frost-sensitive legume living mulch: consequences for cash crop nitrogen nutrition. Field Crops Research, sous presse.
- Loyce C., Meynard J.M., Bouchard C., Rolland B., Lonnet P., Bataillon P., Bernicot M.H., Bonnefoy M., Charrier X., Debote B., Demarquet T., Duperrier B., Felix I., Heddadj D., Leblanc O., Leleu M., Mangin P., Méausoone M., Doussinault G., 2012. Growing winter wheat cultivars under different management intensities in France : a multicriteria assessment based on economic, energetic and environmental indicators. Field Crops Research 125, 167-178.
- Meynard J.M., 1985. Construction d'itinéraires techniques pour la conduite du blé d'hiver. Thèse de Docteur-Ingénieur, INAPG, Paris, France.
- Mignolet C., Guichard L., 2014. L'évolution des systèmes de culture en France depuis les années 1970. Revue de l'Académie d'Agriculture 4, 36-40.
- Mignolet C., Schott C., Benoît M., 2007. Spatial dynamics of farming practices in the Seine basin: Methods for agronomic approaches on a regional scale. Science of the Total Environment 375 (1-3 (n.sp.) Human activity and material fluxes in a regional river basin: the Seine River watershed - Seine Special Issue), 13-32.
- Mignolet C., Schott C., Benoît M., Meynard J.-M., 2012. Transformation des systèmes de production et des systèmes de culture du bassin de la Seine depuis les années 1970 : une spécialisation des territoires aux conséquences environnementales majeures. Innovations Agronomiques 22, 1-16.
- Pellerin S., Bamière L., Angers D., Béline F., Benoît M., Butault J.P., Chenu C., Colnenne-David C., De Cara S., Delame N., Doreau M., Dupraz P., Faverdin P., Garcia-Launay F., Hassouna M., Hénault C., Jeuffroy M.H., Klumpp K., Metay A., Moran D., Recous S., Samson E., Savini I., Pardon L., 2013, Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? Potentiel d'atténuation et coût de dix actions techniques. Synthèse du rapport d'étude, INRA (FRA), 92 p.
- Pelzer E., Bazot M., Makowski D., Corre-Hellou G., Naudin C., Al Rifaï M., Baranger E., Bedoussac L., Biarnès V., Boucheny P., Carrouée B., Dorvillez D., Foissy D., Gaillard B., Guichard L., Mansard M.C., Omon B., Prieur L., Yvergniaux M., Justes E., Jeuffroy M.H., 2012. Pea-wheat intercrops in low-input conditions combine high economic performances and low environmental impacts. Eur J Agr 40, 39-53.
- Pope de Vallavieille C., Mille B., Belhaj Fraj M., Meynard J.M., 2004. Intérêt des associations de variétés de blé pour diminuer les fongicides : conséquences sur la filière. Le Sélectionneur Français 54, 45-56.
- Schneider A., Flénet F., Dumans P., Bonnin E., de Chezelles E., Jeuffroy M.H., Hayer F., Nemecek T., Carrouée B., 2010. Diversifier les rotations céréalières notamment avec du pois et du colza – Données récentes d'expérimentations et d'études. OCL Oléagineux Corps Gras Lipides 17, 301-311.
- Schneider A., Huyghe C., 2015. Les légumineuses pour des systèmes agricoles et alimentaires durables. Quae Éditions, Versailles, 425 pages.
- Schott C., Mignolet C., Meynard J.M., 2010. Les oléoprotéagineux dans les systèmes de culture : évolution des assolements et des successions culturales depuis les années 1970 dans le bassin de la Seine. OCL Oléagineux Corps Gras Lipides 17, 276-291.
- Xiao Y., Mignolet C., Mari J.-F., Benoît M., 2014. Modeling the spatial distribution of crop sequences at a large regional scale using land-cover survey data: a case from France. Computers and Electronics in Agriculture 102, 51 – 63.
- Xiao Y., Mignolet C., Maris J.F, Benoît M., 2015. Characterizing historical (1992-2010) transitions between grassland and cropland in mainland France through mining land-cover survey data. Journal of Integrative Agriculture 14 (8), 1511-1523.

Besoins alimentaires en protéines et besoins spécifiques de certaines catégories de population

Des protéines pour nourrir les hommes ou nourrir les animaux

par Monsieur Jean-Michel Chardigny

Directeur de recherche

Département Alimentation humaine

Institut national de la recherche agronomique (INRA)

Centre Auvergne - Rhône - Alpes

Sommaire de l'article

1. Introduction

2. Les protéines ou comment nourrir la planète

3. Protéines végétales, composés associés et effets sur la santé

4. Qualité des différentes protéines

5. Le positionnement des protéines végétales

6. Les verrous à lever

Liste des illustrations

Tableau 1
Teneurs en acides aminés indispensables de diverses sources protéiques comparées à celle de la protéine de référence

Figure 1
Complémentarité nécessaire à l'échelle du repas, pas à celle de l'aliment : la synthèse de protéines corporelles requiert un bon équilibre entre l'ensemble des acides aminés

1. Introduction

En France, l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail [1] (Anses) recommande des apports protéiques journaliers de 0,83 gramme par kilogramme de poids corporel pour la population adulte [2] et les sources protéiques doivent être de « *bonne qualité* ». Même si la définition de la « *qualité* » reste vague, l'objectif est de couvrir les besoins en acides aminés indispensables : isoleucine, leucine, lysine, méthionine, phénylalanine, thréonine, tryptophane et valine.

Le *Tableau 1* donne les teneurs en acides aminés indispensables de plusieurs sources animales et végétales. Associer différentes sources permet de couvrir l'ensemble des besoins lorsqu'une source seule est déficiente : par exemple, les céréales, généralement déficientes en lysine et riches en acides aminés soufrés (méthionine) avec les légumineuses, pauvres en méthionine et riches en lysine. La synthèse de protéines corporelles requiert en effet un bon équilibre entre l'ensemble des acides aminés (*Figure 1*). Or, certains peuvent être synthétisés par l'organisme, mais d'autres (dits indispensables) non et doivent être apportés par l'alimentation. En l'absence de stockage, la régularité des apports doit se faire à l'échelle du repas, contrairement aux lipides et glucides qui ont la capacité à être stockés dans l'organisme.

La notion de bonne qualité renvoie à la recommandation d'un apport représenté pour moitié par des protéines animales et pour moitié par des protéines végétales. La consommation spontanée actuelle est plutôt riche en protéines animales (deux tiers des apports) et laisse donc une place importante au développement d'une offre de produits à base de protéines végétales. Cette situation diffère bien évidemment selon les pays, le Produit intérieur brut (PIB), etc.

Toutes ces recommandations doivent être majorées pour les populations vieillissantes. En effet, avec l'âge, l'équilibre entre la synthèse protéique (maintien de la masse musculaire) et la dégradation protéique devient plus difficile à maintenir [3]. Vieillir est associé à une perte de masse musculaire (ou sarcopénie). De plus, la synthèse protéique requiert un taux d'acides aminés circulant plus élevé (ou résistance

1 - L'Anses a remplacé l'Afssa, l'Agence française de sécurité sanitaire des aliments, en 2010.

2 - Apport en protéines : consommation, qualité, besoins et recommandations, AFSSA, 2007.

3 - *Walrand S*, Boirie Y. Optimizing protein intake in aging. Curr Opin Clin Nutr Metab Care. 2005 8(1):89-94.

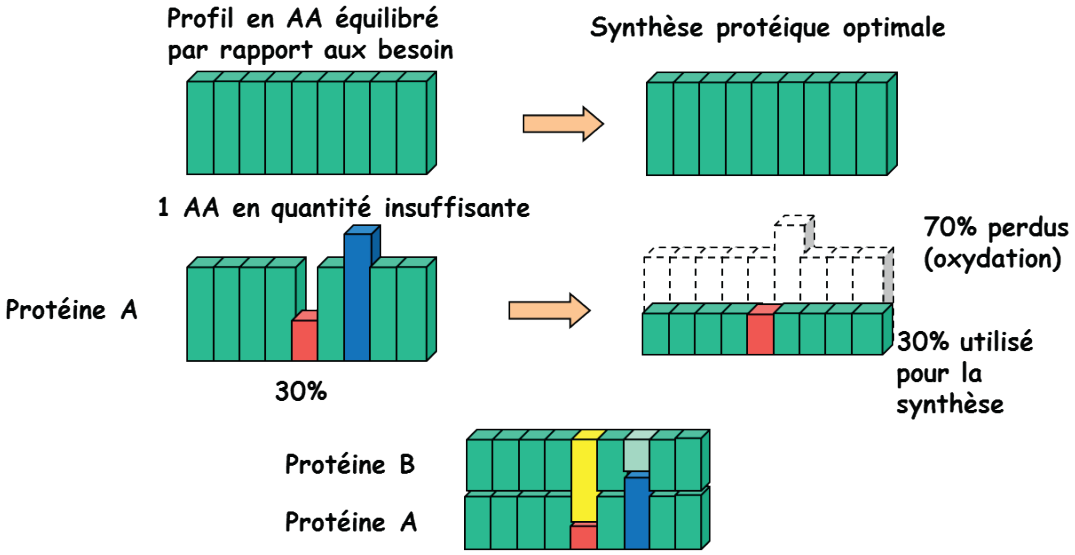
Tableau 1

Teneurs en acides aminés indispensables de diverses sources protéiques comparées à celle de la protéine de référence (en grammes pour 100 grammes de protéines)
Organisation des Nations unies pour l'agriculture et l'alimentation (FAO) / Organisation mondiale de la santé (OMS)

	Isoleucine	Leucine	Lysine	Méthionine + Cystéine	Phénylalanine	Thréonine	Tryptophane	Valine
Protéine de référence	4,2	4,8	4,2	4,2	2,8	2,8	1,4	4,2
Œuf	6,9	9,0	7,2	5,8	5,9	5,0	2,4	7,4
Viande	7,7	6,3	8,1	3,3	4,9	4,6	1,3	5,8
Soja	5,6	7,6	6,3	3,6	5,4	3,9	1,2	5,4
Pois chiche	4,7	7,8	7,4	3,3	6,0	3,9	0,8	5,2
Blé tendre	3,9	6,5	2,7	3,8	4,4	3,0	1,1	4,5
Luzerne	4,7	8,7	6,3	3,3	4,9	4,7	1,9	6,0
Spiruline	5,6	8,7	4,7	3,2	4,5	5,1	1,5	6,5

Adapté de multiples sources

Figure 1
Complémentarité nécessaire à l'échelle du repas, pas à celle de l'aliment
La synthèse de protéines corporelles requiert un bon équilibre entre l'ensemble des acides aminés
(Source : d'après D. Rémond)



anabolique). Par conséquent, les apports quotidiens recommandés sont accrus à environ 1 gramme par kilogramme de poids corporel par jour, en favorisant les protéines dites « *rapides* » : c'est-à-dire celles rapidement absorbées et augmentant rapidement l'amino-acidémie. Les besoins sont également accrus chez les sportifs et toutes les personnes à activité physique intense, par exemple dans le cadre d'activités professionnelles.

2. LES PROTÉINES OU COMMENT NOURRIR LA PLANÈTE

Selon l'*Organisation des Nations unies pour l'agriculture et l'alimentation* (FAO), un septième de la population mondiale souffre de la faim et 1 milliard de personnes a des apports protéiques insuffisants. Plusieurs études prospectives [4] prédisent une tension majeure sur les sources de protéines dans les prochaines décennies, alors que l'huile de palme devrait permettre de couvrir les besoins quantitatifs en lipides.

Parallèlement, les apports en protéines animales sont élevés dans les pays industrialisés – 65 à 70 % de l'apport protéique total – et se développent dans les pays émergents, en lien avec l'augmentation du PIB. Or, la production de protéines animales nécessite davantage d'eau et d'énergie. Il est donc important de rééquilibrer les apports entre protéines animales et végétales – ou autres alternatives – dans des systèmes alimentaires durables, permettant l'accès à des protéines de qualité à la population mondiale.

Les sources de protéines végétales sont principalement les légumes secs (haricot, pois chiche, lentille, …) et les produits céréaliers (pain, biscuits, riz, …). Elles sont aussi apportées par les produits préparés à partir de soja, dans des plats traiteurs ou dans certaines préparations diététiques et aliments spécialisés (sportifs, seniors, …). Les protéines végétales sont alors incorporées dans la formulation des aliments en tant que matières protéiques végétales (MPV). Ces MPV sont des fractions riches en protéines, obtenues par fractionnement de matières premières comme les grains de céréales ou les graines de légumineuses et d'oléagineux, mais également les tubercules (pomme de terre, …) ou les feuilles (protéines foliaires de la

4 - Esnouf, C., Russel, M. et Bricas, N. (Coords.), 2011. Pour une alimentation durable. Réflexion stratégique duALIne, Paris, Éditions Quae, 288 p. – Alimentation & Climat *Impacts de l'alimentation sur le climat : prospective monde à 2030 et identification des enjeux. BIPE 2015* – Terres Inovia, en cours.

luzerne). Les principales MPV sont issues du soja et du blé (gluten). Le pois occupe une part de marché beaucoup plus modeste. Le lupin et la pomme de terre constituent des sources émergentes [5]. Des recherches sont également engagées afin de mieux valoriser des sources comme le colza ou le tournesol, avec préservation de la fraction protéique durant le procédé d'extraction de l'huile.

3. Protéines végétales, composés associés et effets sur la santé

Comme nous l'avons vu, les sources de protéines végétales pour l'alimentation humaine sont multiples. Les légumineuses et les céréales sont les plus importantes. Mais d'autres restent peu exploitées. C'est le cas des fractions protéiques d'oléagineux comme le tournesol et le colza. Leurs tourteaux sont certes valorisés en alimentation animale, mais une valeur ajoutée plus importante pourrait sans doute émerger pour une partie des volumes produits (approche de *cascading*).

Globalement, les sources de protéines végétales sont vectrices de vitamines hydrosolubles et de fibres. Ce dernier point constitue un aspect très positif car les apports alimentaires actuels sont largement en deçà des recommandations (25 à 30 grammes par jour).

Pour l'alimentation humaine, on peut souligner les limites dues aux apports potentiels en phyto-estrogènes. Il s'agit d'un groupe de composés non stéroïdaux, produits naturellement par les plantes et qui, du fait de la similarité de leur structure moléculaire avec l'estradiol [6] ont la capacité de provoquer des effets œstrogéniques ou anti-œstrogéniques. Ils sont donc considérés comme des perturbateurs endocriniens. De ce fait, l'AFSSA, dans un rapport de mars 2005 [7], recommandait d'étiqueter ainsi les aliments à base de soja (tonyu, miso, tofu, yaourts et desserts au soja) : « *Contient Xmg d'isoflavones (famille des phyto-estrogènes). À consommer avec modération (limiter la consommation quotidienne à 1 mg / kg poids corporel). Déconseillé aux enfants de moins de 3 ans* ». De plus, l'arrêté du 24 juin 2014 établissant la liste des plantes (autres que les champignons) autorisées dans les compléments alimentaires, ainsi que leurs conditions d'emploi, indique pour le soja : « *La portion journalière recommandée ne doit pas conduire à une ingestion d'isoflavones supérieure à 1 mg / kg de poids corporel (exprimés comme aglycone du composant principal). L'étiquetage doit comporter un avertissement déconseillant l'usage chez les femmes ayant des antécédents personnels ou familiaux de cancer du sein* ».

Pour la luzerne, l'étiquetage doit comporter un avertissement « *déconseillant l'usage chez les femmes ayant des antécédents personnels ou familiaux de cancer du sein* », en raison des teneurs en coumestrol, coumarines, alcaloïdes pyrrolidiniques.

4. Qualité des différentes protéines

La qualité nutritionnelle des protéines alimentaires peut se définir par leur capacité à couvrir les besoins en acides aminés indispensables pour assurer la croissance et l'entretien des tissus. La méthode de référence pour évaluer leur qualité était le PDCAAS (*protein digestibility corrected amino acid score*) [8] qui correspond à la digestibilité de la protéine multipliée par l'indice chimique. Mais, en 2013, la FAO a proposé un nouvel indice, le DIAAS (*digestible indispensable amino acid score*) qui tient compte non seulement de la composition des protéines en acides aminés indispensables, mais aussi de leur biodisponibilité (digestibilité dans l'intestin grêle) [9].

Ces indices restent cependant insuffisants pour répondre aux besoins de sujets spécifiques telles les personnes âgées. Alors que leur pourcentage s'accroît au sein de la population, leurs besoins protéiques sont particulièrement importants en termes quantitatifs comme qualitatifs et ce d'autant qu'on estime à environ 30 % la prévalence d'apports protéiques insuffisants – sans parler de l'aspect qualitatif.

Un autre critère qualitatif est la capacité à libérer des peptides ayant des activités biologiques intéressantes pour la santé. Des di- ou tri-peptides du lait ont ainsi été décrits comme ayant des propriétés anti-hypertensives, immuno-modulatrices, satiétogènes, etc. Mais, si les peptides bio-actifs du lait ou des produits carnés sont bien identifiés, la présence de peptides bio-actifs issus des protéines végétales reste un champ à étudier.

5 - Guéguen J, Walrand S, Bourgeois O, Les protéines végétales : contexte et potentiels en alimentation humaine, Cah Nut Diet 2016, sous presse.
6 - 17β-estradiol.
7 - Sécurité et bénéfices des phyto-estrogènes apportés par l'alimentation – Recommandations, AFSSA & AFSSAPS, 2005.
8 - FAO/WHO [1990]. Expert consultation on protein quality evaluation. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
9 - Research approaches and methods for evaluating the protein quality of human foods, FAO, 2014.

5. Le positionnement des protéines végétales [10]

Les protéines animales (viande, lait, poisson, ovo-produits) sont souvent considérées comme des références en termes de qualité nutritionnelle, mais les ressources disponibles pour les produire ne sont pas illimitées. Les protéines de lactosérum constituent cependant un « *modèle* » pour l'alimentation protéique des sujets âgés. Si des sources alternatives multiples et diverses (insectes, champignons, algues, …) sont envisagées ou envisageables, les protéines végétales constituent néanmoins, à plus court terme, l'opportunité la plus réaliste d'un élargissement de l'offre, en complément aux protéines animales. Elles sont en effet, moins coûteuses à produire. Pour autant, elles se heurtent à de nombreux verrous tant en termes de disponibilité que de technologie et d'acceptabilité par le consommateur.

Le soja est le plus utilisé parmi les sources végétales et légumineuses. Il est bien équilibré en acides aminés indispensables et largement disponible sous différentes formes (boissons, desserts, produits texturés en gamme traiteur, …). Pour d'autres végétaux (blé, colza, tournesol, etc.), la fraction protéique est un co-produit de l'amidonnerie ou de l'huilerie et elle est principalement valorisée en nutrition animale. Les tonnages disponibles sont importants. Les valoriser en alimentation humaine constitue un défi en raison de leur valeur nutritionnelle limitée par une composition en acides aminés souvent déséquilibrée, d'une plus faible digestibilité et de leur risque potentiel d'allergénicité. Autrement dit, des verrous subsistent malgré des potentiels réels.

On distingue globalement trois types de matières protéiques végétales (MPV), suivant leurs teneurs en protéines : les farines dont les teneurs en protéines sont comprises entre 50 et 65 %, les concentrats (entre 65 et 90 %) et les isolats (supérieure à 90 %). Les technologies d'enrichissement sont adaptées aux matières premières selon leur structure (graines, feuilles, tubercules) et les propriétés physico-chimiques des protéines. Globalement, on distingue les technologies par « *voie sèche* » (par exemple, la meunerie) et les technologies par « *voie humide* » qui font notamment appel aux propriétés de solubilité différentielles des protéines.

Les MPV sont incorporées dans les formules comme ingrédients nutritionnels afin d'augmenter la teneur en protéines du produit fini et / ou comme ingrédients fonctionnels, en exploitant leurs propriétés émulsifiantes, moussantes ou gélifiantes. Elles constituent ainsi des aides technologiques pour formuler des aliments ou améliorer leur texture et leur stabilité physique. Les protéines végétales et animales ont en effet, souvent, un rôle fonctionnel pour conférer à l'aliment sa texture et ses propriétés organoleptiques. Ainsi, dans le pain et les pâtes, la qualité dépend étroitement des propriétés viscoélastiques des protéines du blé (gluten). L'utilisation des MPV est un levier récent pour développer une offre d'aliments prêts à cuisiner. Les besoins de formulation du secteur agro-alimentaire ont en effet généré une demande croissante pour ces ingrédients fonctionnels, capables de former et stabiliser des systèmes complexes et multiphasiques grâce à leurs propriétés texturantes, gélifiantes, émulsifiantes et moussantes.

Pour intensifier ces applications, des efforts de recherche sont possibles tant au niveau de la génétique que des technologies, afin d'améliorer la fonctionnalité des MPV, en particulier des isolats et concentrats. Hormis le blé, la génétique s'est peu intéressée à la relation entre la composition protéique, le polymorphisme des protéines et leur fonctionnalité technologique pour les utilisations en alimentation humaine. La sélection représente donc un levier important pour autant que les besoins de l'industrie de première et deuxième transformations soient clairement définis en termes de propriétés fonctionnelles comme de maîtrise de composés indésirables ou générateurs de « *mauvais goûts* ». De même, des innovations sont possibles dans le domaine des procédés de fabrication : soit pour enrichir les MPV en protéines fonctionnelles par des technologies de fractionnement, soit pour mieux maîtriser l'impact des traitements sur la conformation des protéines. Enfin, des travaux récents ont montré que des interactions entre les protéines végétales et d'autres biopolymères, protéines ou polysaccharides peuvent engendrer des améliorations de propriétés fonctionnelles [11].

Si les protéagineux représentent une source intéressante de protéines (pois, 24 %, féverole, 30 % et lupin, 36 %), ils restent peu utilisés et souffrent d'une image et de perceptions organoleptiques peu favorables. Pourtant, en utilisant la complémentarité

10 - Guéguen J, Walrand S, Bourgeois O, Les protéines végétales : contexte et potentiels en alimentation humaine, Cah Nut Diet 2016, sous presse.

11 - Tous ces domaines d'innovations sont privilégiés dans l'étude du CVT Allenvi (*http://www.cvt-allenvi.fr/*).

en termes de composition en acides aminés entre sources protéiques végétales (céréales / légumineuses), il sera possible de développer des analogues de viande de qualités nutritionnelle et organoleptique optimisées. En attendant, il existe des exemples d'innovations technologiques à partir de lupin, de pois et de feuilles de luzerne. Parmi les produits disponibles sur le marché, on peut notamment citer :

- *Lup'Ingrédients*, du groupe coopératif Terrena, propose une gamme de produits riches en protéines de lupin fonctionnelles, sous forme de poudre atomisée, dotée d'un fort pouvoir émulsifiant, d'une bonne solubilité et d'un goût neutre : pépites, flocons, farines, extrait protéique. L'extrait protéique *Protilup 450* a été conçu pour améliorer le profil nutritionnel et organoleptique des aliments. Parmi les applications proposées, se trouvent les produits sans gluten (panification, cakes, biscuits, biscottes, pâtes, ...), des produits carnés (« *saucisson* », ...), des compléments alimentaires et des produits hyper-protéinés.
- Les protéines de pois *Nutralys*® sont extraites par le groupe Roquette de pois sec jaune travaillé par voie humide. Ce procédé assure l'obtention d'isolats titrant 85 à 90 % de protéines. Parmi les applications proposées, Roquette revendique des propriétés fonctionnelles (viandes, poissons) et nutritionnelles (enrichissement en protéines de tous types d'aliments).
- La *Luzixine*, développée par *Luzerne-RD*, est un extrait foliaire concentrant l'ensemble des nutriments de la luzerne. Celle-ci offre en effet la particularité d'être très riche en protéines, mais aussi en fer et en calcium. La luzixine, dont la teneur en protéines atteint 50 %, est autorisée par l'*Autorité européenne de sécurité des aliments* (AESA ou, en anglais, EFSA) en complément alimentaire, avec une limite fixée à 10 grammes par jour.

6. Les verrous à lever

Il reste un ensemble de verrous à lever pour intensifier la consommation de protéines végétales.

Sous forme de légumes secs, elles sont mal perçues et souffrent d'une image désuète et d'un positionnement dans la pyramide alimentaire, en France, au sein des féculents. Les légumes secs ne sont pas identifiés comme des vecteurs de protéines, ces derniers restant associés à la trilogie « *viandes, œufs, poissons* » des manuels scolaires. La situation en Amérique du Nord, en particulier au Canada, est différente puisque les légumes secs y sont classés dans les sources de protéines.

Sous forme d'ingrédients – malgré les réussites mentionnées plus haut – il reste des défis à la fois en termes technologiques (solubilité, propriétés moussantes ou émulsifiantes, etc.) et de qualité sensorielle des produits finis (goût « *vert* » par exemple). Parmi les composés générateurs de ces « *off-flavors* », on peut citer les lipoxygénases ou les saponines. Des améliorations peuvent être apportées tant par la génétique que par des procédés et des formulations, peut-être même en combinant tous ces leviers.

En conclusion, les protéines végétales offrent à coup sûr une opportunité pour répondre aux besoins mondiaux en protéines – en complément ou en association avec d'autres sources traditionnelles (produits animaux) ou nouvelles (algues, insectes, …). Néanmoins, des efforts de recherche importants restent nécessaires pour faciliter leur utilisation tant dans les préparations ménagères que dans l'industrie agro-alimentaire. Les protéines animales gardent toute leur place dans les apports alimentaires, mais leur production est à privilégier à partir de biomasse non consommable par l'homme comme les prairies pour l'alimentation des ruminants.