

## Action 2

# Accroître la part de légumineuses en grande culture et dans les prairies temporaires pour réduire les émissions de N<sub>2</sub>O

### Auteurs

Marie-Hélène Jeuffroy (INRA-EA)

Laure Bamière (INRA-SAE2)

### Appui scientifique interne

Caroline Colnenne-David (INRA-EA)

Catherine Hénault (INRA-EA)

Katja Klumpp (INRA-EFPA)

Sylvie Recous (INRA-EA)

### Extraction et traitement de données

Nathalie Delame (INRA-SAE2)

Jean-Baptiste Duclos (INRA-SAE2)

Christine Le Bas (INRA-EA)

### Relecteurs scientifiques externes

Philippe Debaeke (INRA-SPAD)

Jacques Wery (INRA-EA)

### Relecteurs techniques externes

Francis Flénet (CETIOM)

François Laurent (Arvalis)

Antoine Poupart (InVivo)

## 1. Introduction : cadrage et description succincte de l'action

L'action décrite concerne l'introduction et le maintien de légumineuses dans les surfaces cultivées, soit en tant que grandes cultures (introduction de légumineuses à graines en remplacement d'autres grandes cultures actuellement cultivées), soit en tant que composantes dans les prairies temporaires. Ces changements d'assolement ou de composition du couvert végétal cultivé induisent également des modifications dans les techniques appliquées, non seulement pour la culture introduite, mais pour les autres cultures de la rotation (en particulier la fertilisation azotée).

Le principal gaz visé par cette action est le protoxyde d'azote ( $N_2O$ ). Il est produit dans les sols, *via* les microorganismes, par des phénomènes de dénitrification (réduction du nitrate  $NO_3^-$  en diazote  $N_2$ ) et de nitrification (transformation de l'ammoniac  $NH_4^+$  en nitrate). Son émission est largement liée à la pratique de la fertilisation azotée : toute culture permettant de réduire les quantités d'engrais azoté apportées contribue donc *a priori* à la réduction des émissions de ce gaz. Les légumineuses à graines ou fourragères, capables de fixer l'azote atmosphérique, font partie de ces cultures candidates.

Cette action a également un effet de réduction des émissions induites de  $CO_2$  liées à la fabrication et au transport des engrais azotés, et aux variations de pratiques agricoles induites par les changements d'usage des sols (réduction du nombre de passages d'engins et réduction du labour, donc réduction du carburant utilisé).

L'objectif de cette action est d'estimer la réduction des émissions de  $N_2O$  et de  $CO_2$  associées (1) à une augmentation des surfaces cultivées en légumineuses à graines, ou (2) à une augmentation de la proportion de légumineuses cultivées dans les prairies temporaires, et à une adaptation conjointe de la fertilisation azotée appliquée, à la fois sur ces cultures et sur les cultures suivantes.

Si un accroissement des surfaces en prairies temporaires composées de légumineuses permettrait (i) des réductions drastiques d'émissions de GES, et (ii) une contribution forte au développement d'une agriculture française agro-écologique, nous n'examinerons pas cette hypothèse, car ce changement conduirait à une modification considérable des systèmes d'élevage (notamment de l'alimentation des animaux), qui est en dehors du cadre de l'étude.

## 2. Description de l'action

Il s'agit d'introduire davantage de légumineuses dans les systèmes de culture français.

Nous proposons d'instruire, dans une première sous-action, l'introduction de légumineuses à graines dans les grandes cultures, en remplacement d'autres grandes cultures ; les assolements, les successions de cultures et les itinéraires techniques appliqués (y compris sur les cultures suivant une culture de légumineuse à graines) s'en trouveront donc modifiés. Dans une seconde sous-action, nous examinerons le cas de l'introduction et du maintien d'une proportion élevée de légumineuses dans les prairies temporaires assolées, en remplacement de prairies composées uniquement de graminées prairiales.

Dans le cas du remplacement de prairies de graminées par des prairies de légumineuses (pures ou associées), il faudrait également tenir compte des effets sur la variation de la composition de l'alimentation des animaux (ruminants) et des effets induits sur les émissions de méthane. Nous ne chiffrerons pas ces effets.

### 2.a. Mécanismes en jeu et émissions de GES associées

Dans le cadre des actions instruites ici, plusieurs mécanismes peuvent être à l'origine d'une réduction des émissions de  $N_2O$  et de  $CO_2$ . Nous décrivons ces mécanismes, à partir des connaissances disponibles dans la bibliographie, en les séparant en effets directs (sur l'exploitation) et indirects (sur les espaces physiquement liés à l'exploitation) perceptibles à l'échelle de l'exploitation agricole, et les émissions induites en amont/aval de l'exploitation agricole (liées aux achats d'intrants).

#### Effets directs à l'échelle de l'exploitation

- Diminution des émissions de  $N_2O$  liées à la fertilisation azotée (absente sur légumineuses à graines, réduite sur les cultures suivantes et sur prairies d'association avec légumineuses). En grandes cultures, les émissions de  $N_2O$  sont très largement issues des processus de nitrification et dénitrification, eux-mêmes sous l'influence de la fertilisation azotée appliquée (IPCC, 2001 ; Mosier et al., 1998). L'application d'azote sous forme d'engrais organiques ou minéraux est reconnue comme la source majeure d'émissions de  $N_2O$  liées aux activités anthropiques (Davidson, 2009 ; Snyder et al., 2009). D'autres effets sont attendus, liés aux variations d'usages de produits phytosanitaires, sans effet significatif sur le

bilan C des sols, et aux variations de surfaces labourées, ces effets étant directement corrélés à la variation de la composition de l'assolement à l'échelle de la France ;

- Diminution des émissions de CO<sub>2</sub> liées à l'utilisation de carburant lors des passages pour l'épandage d'engrais ou l'application de produits phytosanitaires ;
- Diminution des émissions de CO<sub>2</sub> liées à l'utilisation de carburant lors du labour : les cultures suivant les légumineuses sont plus souvent implantées sans labour (cf. résultats de l'enquête "Pratiques culturales" 2006), car les légumineuses laissent peu de résidus au sol, facilitant ainsi la préparation du sol (Munier-Jolain & Carrouée, 2003). De ce fait, la réduction des émissions issues de la variation du travail du sol, liée au changement d'espèces cultivées, sera également prise en compte ;
- Augmentation des émissions de N<sub>2</sub>O liées à la composition des résidus des cultures (variable selon les espèces cultivées), et à la fixation symbiotique ; ces deux effets sont controversés dans la littérature et conduiront à plusieurs hypothèses de calcul.

#### **Effets indirects, liés aux émissions dans les espaces physiquement liés à l'exploitation :**

- Diminution des émissions de N<sub>2</sub>O hors parcelle liées à la fertilisation azotée (lixiviation et volatilisation d'ammoniac).

#### **Effets en amont de l'activité agricole :**

- Emissions de CO<sub>2</sub> liées à la consommation de l'énergie nécessaire à la fabrication et au transport des engrais minéraux azotés économisés et des produits phytosanitaires appliqués sur les cultures, et émissions de N<sub>2</sub>O lors de la fabrication des formes nitriques d'engrais minéraux azotés ;
- Emissions de CO<sub>2</sub> liées à l'extraction, au raffinage et au transport des carburants pour les passages liés aux apports d'engrais et de produits phytosanitaires, et au labour (la surface labourée en France va être modifiée suite à la modification des assolements, si on ne change pas la proportion de labour appliquée sur chaque type de culture).

Enfin, on peut citer un dernier mécanisme en jeu : les cultures de légumineuses peuvent, dans certaines conditions, constituer des puits de N<sub>2</sub>O. C'est, par exemple, le cas du soja inoculé avec la souche MSDJG49, homologuée en France : des expérimentations montrent qu'on peut alors observer une consommation de N<sub>2</sub>O de l'ordre de 75 g de N-N<sub>2</sub>O par ha pendant le cycle cultural (Hénault & Revellin, 2011). Cet effet n'étant pas démontré pour l'ensemble des légumineuses à graines cultivables en France (notamment le pois) et pour l'ensemble des conditions de culture, il ne sera pas pris en compte dans cette action.

## **2.b. Sous-actions et éventuelles options techniques instruites dans la fiche**

Deux sous-actions sont donc envisagées pour cette action :

- Introduction de légumineuses à graines en grandes cultures, en remplacement d'autres grandes cultures. Comme il est particulièrement difficile d'anticiper les substitutions de cultures qui seraient réalisées lors de l'introduction de légumineuses à graines, plusieurs hypothèses seront explorées. Une seule hypothèse (celle qui nous semble la plus réaliste) sera détaillée dans ce rapport, et les résultats des autres hypothèses seront indiqués de manière globale.
- Introduction d'une plus forte proportion de légumineuses en prairies temporaires assolées, et maintien de cette légumineuse pendant la durée de vie de la prairie, en adaptant la fertilisation azotée appliquée, sans changer la surface totale en prairies temporaires.

## **2.c. Rapports et expertises majeurs ayant déjà examiné/évalué l'action**

Plusieurs études et expertises (listées ci-dessous) ont déjà analysé l'influence des légumineuses dans le potentiel d'atténuation des émissions de GES. Leurs résultats principaux sont résumés dans le Tableau 1. En revanche, l'étude canadienne (GHG Abatement Cost Curve for the Agriculture Sector: Potential to Reduce Emissions, 2010) n'identifie pas les légumineuses comme une action intéressante. L'étude de Flynn et al. (2007) identifie ce changement technique, mais sans quantifier les résultats attendus.

1. 12 propositions pour lutter contre le changement climatique dans le secteur de l'agriculture – Solagro – 2003
2. La relance des légumineuses dans le cadre d'un plan protéines : quels bénéfices environnementaux ? – Commissariat Général du Développement Durable (CGDD) N°15 – 2009
3. Greenhouse gas mitigation potential of agricultural land management in the United States – Technical working group on Agricultural Greenhouse Gases (T-AGG) – Duke University - 2012

4. Rapport de Nature Québec (Agriculture et Climat / Vers des fermes zéro carbone) – Des pratiques agricoles ciblées pour la lutte aux changements climatiques
5. Méthodologie Projets Domestiques : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/INVIVO-Méthodologie-avril%202011.pdf>
6. Dominic Moran, Michael MacLeod, Eileen Wall, Vera Eory, Guillaume Pajot, Robin Matthews, Alistair McVittie, Andrew Barnes, Bob Rees, Andrew Moxey, Adrian Williams, Pete Smith. 2008. UK Marginal Abatement Cost Curves for the Agriculture and Land Use, Land-Use Change and Forestry Sectors out to 2022, with Qualitative Analysis of Options to 2050.
7. Flynn H., Smith P., Bindi M., Trombi G., Oudendag D., Rousseva S., 2007. Policy incentives for climate change mitigation agricultural techniques

**Tableau 1.** Principaux résultats d'études antérieures visant à quantifier l'influence des légumineuses dans le potentiel d'atténuation des émissions de GES

Références	(1) Solagro, 2003		(2) CGDD, 2009	(3) T-AGG, 2012	(6) Moran et al., 2008
Pays	France		France	USA	UK
Sous-action concernée	Développement de prairies temporaires mixtes (composition: 60% de graminées, 40% de légumineuses)	Développement des cultures de protéagineux	Grandes cultures (diversification des rotations, pas uniquement avec des légumineuses)	Prairies (utilisation de la fixation chez le trèfle) et grandes cultures (introduction de légumineuses à graines)	Prairies temporaires avec légumineuses et légumineuses en grandes cultures
Baseline	2010	2010	2012	2004	2006
Assiette maximale	1,1 Mha	3 Mha	46 Mha	6,4 Mha (trèfle) 5,8 Mha (légumineuses à graines)	Grandes cultures: 377 000 ha Prairies temporaires: 136 835 ha
Potentiel d'atténuation	1,2 TgCO <sub>2</sub> e	7,4 TgCO <sub>2</sub> e	9,2 TgCO <sub>2</sub> e	6,4 TgCO <sub>2</sub> e (trèfle) 2,9 TgCO <sub>2</sub> e (lég. à graines)	1,8 TgCO <sub>2</sub> e
Atténuation unitaire (kgCO <sub>2</sub> e/ha)	1091	2467	200	762	3600
Coût global	0	0	Non renseigné	16 à 43 £/MgCO <sub>2</sub> e (trèfle) 37 à 49 £/MgCO <sub>2</sub> e (lég. à gr)	74 €/ha de légumineuses suppl.
Coût public	< 5 €/MgCO <sub>2</sub> e	< 5 €/MgCO <sub>2</sub> e	Non renseigné	Non renseigné	Non renseigné

### 3. Etat des connaissances sur les phénomènes/mécanismes sous-jacents et leur quantification

La différence d'émissions entre les légumineuses (ou les prairies temporaires d'associations contenant plus de 20% de légumineuses) et les autres grandes cultures (ou les prairies temporaires contenant moins de 20% de légumineuses) peut provenir de différents mécanismes :

#### La fixation symbiotique

Jusqu'en 2006, les calculs d'émissions à partir de la méthode officielle du GIEC considéraient la fixation symbiotique comme une source potentielle d'émissions de N<sub>2</sub>O au même titre que la fertilisation azotée appliquée sur les cultures. Rochette et Janzen (2005), dans une synthèse sur les émissions sous légumineuses, ont montré que celles-ci étaient beaucoup plus faibles que sous cultures fertilisées. Récemment, Jensen et al. (2012) ont réalisé une synthèse des résultats d'émissions mesurées expérimentalement sur légumineuses et sur d'autres cultures. La variabilité des résultats observés sur légumineuses est très grande : 0,03 à 7,09 kgN<sub>2</sub>O-N/ha selon les études. Mais la gamme observée sur cultures fertilisées est encore plus large : 0,09 kgN<sub>2</sub>O-N/ha à 18,16 kgN<sub>2</sub>O-N/ha. La moyenne des mesures pour toutes légumineuses confondues est de 1,29 kgN<sub>2</sub>O-N/ha, tandis que la moyenne des systèmes fertilisés est de 3,22 kgN<sub>2</sub>O-N/ha. Ces auteurs confirment donc la forte réduction des émissions en présence de légumineuses. Enfin, une récente étude, réalisée à Grignon (Jeuffroy et al., 2013), a permis de comparer, dans les mêmes conditions de culture, les émissions de N<sub>2</sub>O sous pois, sous blé non fertilisé, et sous blé et colza fertilisés. Les mesures, répétées pendant 3 années successives, ont montré que les émissions sous pois étaient réduites de 75-80% par rapport à un blé ou un colza fertilisés, et très proches des émissions observées sous ces mêmes cultures non fertilisées. On peut donc considérer que la fixation symbiotique n'induit pas d'émissions supplémentaires par rapport à une culture non fixatrice non fertilisée.

## L'absence ou la diminution de fertilisation (et donc absence d'émissions liées à l'application d'engrais)

Si la bibliographie s'accorde sur le fait que, dans une situation culturale donnée, les émissions de N<sub>2</sub>O sont supérieures en cas de fertilisation azotée, la variabilité des émissions est également largement liée à d'autres facteurs, dont les conditions pédoclimatiques. De fait, la relation entre les émissions et la fertilisation azotée, pour une large base de données, est très faible (Philibert et al., 2012). Sur la base de 20 expérimentations, Bouwman (1996) a estimé, en moyenne, à 1,25% la fraction de l'azote apporté sous forme d'engrais, perdue sous forme de N<sub>2</sub>O. Ce facteur d'émission a alors été adopté par l'IPCC (1999) dans la méthode *Tier 1* et reprise par le CITEPA. L'analyse d'une plus large base de données a ensuite conduit l'IPCC à adopter un facteur d'émission de 1% (IPCC, 2006). L'étude récente de Philibert et al. (2012) met en cause cette simplification et propose de réduire l'incertitude liée à l'usage de ce facteur d'émission constant en utilisant un modèle exponentiel. Celui-ci conduit à un facteur d'émission plus faible pour des doses de fertilisation inférieures à 160 uN/ha, et plus élevé au-dessus de cette dose. L'effet de la fertilisation azotée étant analysé dans une autre action de cette étude (Action 1), nous proposons d'utiliser le facteur d'émission actuellement utilisé par le CITEPA. Avec cette méthode, la réduction des émissions directes de N<sub>2</sub>O est directement proportionnelle à la réduction de la fertilisation azotée appliquée sur les cultures. Chaque unité d'engrais épandu est responsable d'émissions de N<sub>2</sub>O sur la base d'un coefficient d'émissions directes de 1%, défini par le GIEC (IPCC, 2006). La réduction des émissions indirectes de N<sub>2</sub>O s'appuie elle-aussi sur la réduction de la fertilisation azotée, selon le même principe mais avec des coefficients d'émissions (définis eux aussi par le GIEC : IPCC, 2006) différents selon le phénomène considéré (dépôt d'ammoniac ou lixiviation).

## La décomposition des résidus, généralement plus riches en N que les résidus des autres cultures

Les émissions de N<sub>2</sub>O liées à la décomposition des résidus de légumineuses sont difficilement chiffrables : selon les expérimentations, elles varient grandement, principalement en lien avec les conditions pédoclimatiques lors de la décomposition (Jensen et al., 2012), et avec les modalités d'enfouissement des résidus (Goglio, 2013). La quantité d'azote minéral mesuré dans le sol après une culture de pois est souvent supérieure à celle observée après une culture de céréale ou de colza (Thomsen et al., 2001 ; Hauggaard-Nielsen et al., 2009 ; Carrouée et al., 2006 ; Fuhrer, 2004 ; Jensen et al., 2004 ; Jeuffroy et al., 2013). De plus, les résidus de légumineuses ont des biomasses faibles, mais des teneurs en N élevées (Hauggaard-Nielsen et al., 2003 ; Rochette et Janzen, 2005 ; Jeuffroy et al., 2013), favorables à une décomposition rapide de cette matière organique. Ces deux résultats suggèrent une possible augmentation des émissions de N<sub>2</sub>O, en lien avec la disponibilité d'N minéral plus élevée dans le sol derrière une culture de légumineuses. Les rares études existantes indiquent globalement une absence de surplus d'émissions dû aux légumineuses (fixation et résidus), les résidus ne représentant pas des quantités d'N importantes, susceptibles d'émettre des quantités importantes de N<sub>2</sub>O (Lemke et al., 2007). Une synthèse des données existantes d'émissions comparées entre légumineuses et espèces non fixatrices est fournie dans le Tableau 2, confirmant les plus faibles émissions observées sous légumineuses en moyenne. Nous considérerons donc 2 hypothèses : celle correspondant au calcul actuel du CITEPA (suivant les recommandations *Tier 1* de IPCC 1996), tenant compte d'émissions liées à la fixation chez les légumineuses comme source d'émissions supplémentaires de N<sub>2</sub>O, et une seconde hypothèse, basée sur les résultats expérimentaux récents et le nouveau paramétrage du GIEC, ne considérant aucune émission supplémentaire liée à la fixation des légumineuses. Pour les résidus, nous adopterons la méthode de calcul actuelle, qui est basée sur un facteur d'émission identique aux autres grandes cultures et une estimation de la quantité d'azote fournie par les résidus de culture.

**Tableau 2.** Résultats disponibles sur la comparaison des émissions entre légumineuses et autres cultures fertilisées

Source	Résultats d'émissions directes
Rochette et Janzen, 2005	Légumineuses annuelles : 1 kgN <sub>2</sub> O-N/ha/an
Parkin & Jaspar, 2006	Soja : 2,7 kgN <sub>2</sub> O-N/ha/an Maïs : 10,2 kgN <sub>2</sub> O-N/ha/an
Hunter et al., 2007	Blé derrière blé : 0,300 kgN <sub>2</sub> O-N/ha/an Blé derrière pois : 0,500 kgN <sub>2</sub> O-N/ha/an Pois : 0,080 kgN <sub>2</sub> O-N/ha/an Pas d'effet spécifique des résidus de pois
Jensen et al., 2012	Moyenne toutes légumineuses : 1,29 kgN <sub>2</sub> O-N/ha (gamme de 0,03 à 7,09 kgN <sub>2</sub> O-N/ha) Moyenne cultures fertilisées : 3,22 kgN <sub>2</sub> O-N/ha (gamme de 0,09 à 18,16 kgN <sub>2</sub> O-N/ha)
Jeuffroy et al., 2013	Pois : 0,14 kgN <sub>2</sub> O-N/ha/an Colza : 0,46 kgN <sub>2</sub> O-N /ha/an Blé : 0,40 kgN <sub>2</sub> O-N /ha/an
Zhong et al., 2011	Pois et lentille : 0,60 à 2,88 (expé 1) et 0,46 à 1,36 (expé 2) Blé : 3,85 (expé 1) et 1,18 (expé 2)

### La différence d'application de produits phytosanitaires

La quantité de produits phytosanitaires appliqués n'est pas identique entre cultures. D'après l'enquête "Pratiques culturales" 2006, le nombre de doses homologuées (IFT) appliquées, en France, sur protéagineux est intermédiaire (5,56 en moyenne) entre celui appliqué sur blé et orge (4,65 et 4,1 respectivement en moyenne) et celui appliqué sur colza (6,67 en moyenne). De plus, d'après de récents travaux basés sur la description d'itinéraires techniques optimisés d'un blé selon son précédent (Schneider et al., 2010), on peut estimer en moyenne 1 point d'IFT de moins sur blé/pois et blé/colza par rapport à blé/blé. N'ayant aucune référence sur colza, nous n'avons pas différencié l'IFT selon son précédent (pois ou céréale à paille). De ce fait, une variation de la surface de chaque culture induit une variation dans les émissions de CO<sub>2</sub> amont induites par cette variation d'usage de produits phytosanitaires, à l'échelle de la France. Par ailleurs, les produits utilisés ne sont pas les mêmes, ce qui devrait conduire à des variations d'émissions supplémentaires. La connaissance des produits réellement utilisés en France sur chaque culture est très difficile, et les émissions correspondant à ces variations de produit étant faibles, nous ne considérerons pas cette source supplémentaire.

### La différence de proportion de chaque culture labourée dans la SAU française

Dans les systèmes de culture actuels français, le labour est réalisé de manière privilégiée derrière/devant certaines cultures. Ainsi, un blé suivant un pois est moins souvent labouré qu'un blé suivant un autre blé, car les résidus de pois sont très faibles en quantité, et favorisent la réalisation d'un semis direct (Munier-Jolain et Carrouée, 2003). L'introduction d'un pois dans l'assolement permet donc de réduire la surface totale labourée. La proportion de chaque culture qui est précédée par un labour n'étant pas identique selon les cultures et les précédents, une variation de la surface de chaque culture dans l'assolement de la France induit une variation dans les émissions de CO<sub>2</sub> induites, à l'échelle de la France, dont nous tiendrons compte dans nos estimations.

## 4. Degré et mode de prise en compte des principaux postes d'émissions concernés par l'action dans le cadre de l'inventaire national 2010 et perspectives d'évolution

Dans un premier temps, les calculs d'émissions ont été réalisés en considérant les hypothèses et paramètres de calcul utilisés par le CITEPA pour l'inventaire national 2010 (suivant les recommandations *Tier 1* de IPCC 1996). Nous avons donc considéré que la fixation symbiotique de l'azote générerait autant de N<sub>2</sub>O en proportion que l'apport d'engrais azoté, hypothèse qui avait été retenue par l'IPCC en 1997. Plus récemment, suite à la remise en cause de cette hypothèse par plusieurs études, l'IPCC (2006) a entériné cette évolution des connaissances et préconise de ne pas prendre en compte la fixation symbiotique de l'azote pour le calcul des émissions de N<sub>2</sub>O. Cette recommandation paraît acceptable et sera suivie, mais n'est pas encore appliquée dans les calculs officiels (CITEPA). Elle correspond donc à notre méthode de calcul "expert".

Les émissions liées à la variation de quantité d'engrais azoté apporté ont été estimées à partir des références mobilisées dans les calculs du CITEPA pour 2010 (CITEPA, 2012). Ces références ayant évolué (notamment les facteurs d'émission considérés), on propose un second calcul prenant en compte les nouveaux paramètres (méthode de calcul "expert").

De même, les variations d'émissions liées aux variations d'usage des produits phytosanitaires, d'engrais azotés, et de labour sont estimées à partir des références du CITEPA (2012).

Le Pouvoir de Réchauffement Global (PRG) utilisé dans nos calculs correspond aux lignes directrices pour l'établissement des inventaires nationaux révisées en 1996, et il est imposé par le CITEPA. La révision de 2007, fixant le PRG du N<sub>2</sub>O à 298, n'est pas encore incorporée aux inventaires nationaux, mais sera considérée dans notre mode de calcul "expert".

## 5. Calcul du potentiel d'atténuation et du coût de chaque sous-action

### 5.1. Potentiel d'atténuation et du coût de la sous-action 1 Légumineuses à graines

#### 5.1.a. Potentiel d'atténuation unitaire

Du fait que l'introduction de surfaces en légumineuses à graines induit une diminution de surface d'autres cultures, et des conséquences induites sur les pratiques appliquées à ces cultures, nous ne calculerons pas, en premier lieu, le potentiel d'atténuation unitaire, mais d'emblée le potentiel d'atténuation pour l'ensemble de la surface France. Le potentiel d'atténuation unitaire, ramené à l'hectare de légumineuse introduite, sera néanmoins estimé dans une seconde étape.

##### ● Inventaire des effets sur les émissions

#### Effets directs sur les émissions de GES

• La diminution d'émissions directes de N<sub>2</sub>O dues à la réduction de la fertilisation azotée ( $\Delta Ed_{fertN}$ ) est estimée en fonction des apports d'engrais appliqués, en utilisant le facteur d'émissions proposé dans le Tier 1 (1,25% ; facteur révisé à 1% en 2006, utilisé dans la méthode "expert"). Il apparaît sous la forme :

$$\Delta Ed_{fertN} = QN \times Ped \times FE \times FCN-N_2O \times PRG$$

avec QN : la quantité d'engrais minéral azoté non épandue (Mg d'azote)

Ped : la proportion d'émissions directes (0,90 pour le calcul "CITEPA" ; 1 pour le calcul "expert")

FE : le facteur d'émissions (0,0125 pour le calcul "CITEPA" ; 0,01 dans le calcul "expert")

FCN-N<sub>2</sub>O : le facteur de conversion (1,57). La masse atomique de l'azote étant de 14 g/mol et celle de l'oxygène étant de 16 g/mol, le facteur de conversion de l'azote en N<sub>2</sub>O est de :  $[(14 \times 2 + 16) / (2 \times 14)] = 44 / 28 = 1,57$

PRG : le Pouvoir de Réchauffement Global (310 dans CITEPA 2012 ; 298 dans les références IPCC 2006 et donc le calcul "expert").

• La diminution des émissions directes liées aux variations de nombres de passages pour l'épandage d'engrais ou de produits phytosanitaires ( $\Delta Ed_{pass}$ ), est calculée en tenant compte de la consommation de carburant utilisée pour chaque passage (0,7 l de diesel /ha ; barème entraide région Ile-de-France 2010), et des valeurs de référence pour les émissions directes (2,649 kgCO<sub>2</sub>e /litre de diesel) du carburant consommé pour l'apport d'engrais, et appliquées à la variation de surface épandue (SE en ha) :

$$\Delta Ed_{pass} = SE \times 0,7 \times 2,649$$

• La variation d'émissions directes liées à la variation de surface labourée ( $\Delta Ed_{labour}$ ) est estimée en fonction de la consommation de carburant utilisée pour le labour (13,4 l/ha ; barème entraide région Centre – Ile-de-France 2010), et des valeurs de référence pour les émissions directes (2,649 kgCO<sub>2</sub>e /litre de diesel) liées au labour, et appliquées à la variation de surface labourée (SL en ha) :

$$\Delta Ed_{labour} = SL \times 13,4 \times 2,649$$

• Les émissions directes liées à la fixation symbiotique des légumineuses ( $\Delta Ed_{fix}$ ) sont estimées à partir du facteur d'émission actuel (CITEPA 2012) de 1,25% (ou 0% dans le calcul "expert"), affectée à la quantité d'N fixée (QNfix, en kg/ha), estimée selon le paramétrage du CITEPA :

$$\Delta Ed_{fix} = QN_{fix} \times FE \times FCN-N_2O \times PRG$$

avec  $QN_{fix} = (RDT \times (1 - H\%g) / HI) \times \%N_{tot} \times 1000$

RDT : rendement moyen de la culture en France (exprimé aux normes de commercialisation en Mg/ha)

H%g : humidité des graines à la récolte : 0,14 (protéagineux), 0,15 (blé tendre et orge), 0,09 (colza)

HI : Harvest Index (indice de récolte) de la MS aérienne = 0,58 (protéagineux), 0,49 (blé tendre), 0,51 (orge), 0,43 (colza)

%N<sub>tot</sub> : teneur en N de la MS totale = 0,03 (protéagineux)

• Les émissions directes liées à la composition des résidus ( $\Delta Ed_{res}$ ) sont estimées à partir du facteur d'émissions (1,25%, CITEPA 2012, quelle que soit l'origine des résidus), et de la quantité d'N contenue dans les résidus (QNres), calculée selon la méthode et les paramètres CITEPA :

$$\Delta Ed_{res} = QN_{res} \times FE \times FCN-N_2O \times PRG$$

avec  $QN_{res} = MS_{res} \times \%N_{res} \times (1 - FRAC_{burned} \times CombFactor - FRAC_{removed}) \times 1000$

MS<sub>res</sub> : matière sèche des résidus aériens (Mg/ha)

%N<sub>res</sub> : teneur en N de la MS des résidus = 0,0135 (protéagineux), 0,0064 (blé tendre), 0,0063 (orge), 0,0070 (colza)

FRAC<sub>burned</sub> : fraction des résidus brûlés = 0,0037 (protéagineux), 0,0044 (blé tendre), 0,0114 (orge), 0,0029 (colza)

CombFactor : Facteur de combustion (proportion de la biomasse aérienne détruite par le brûlage) = 0,80 (toutes cultures)  
 FRACremoved : fraction des résidus exportés = 0,0883 (protéagineux), 0,4082 (blé tendre), 0,4183 (orge), 0,0364 (colza)  
 et MSres = RDT x (1-H%g) x (1-HI)/HI/10

### Effets indirects sur les émissions de GES

• La diminution d'émissions indirectes de N<sub>2</sub>O ( $\Delta E_{i\_fertN}$ ) est elle aussi un facteur pris en compte dans les calculs d'émissions. Les facteurs d'émissions liés au dépôt d'ammoniac et à la lixiviation sont, comme pour les émissions directes, fixés et le flux dépend de la quantité d'azote épandue. La formule (CITEPA 2012) se présente sous la forme :

$$\Delta E_{i\_fertN} = QN \times FE_{lix} \times F_{lix} \times FCN-N_2O \times PRG + QN \times FE_{vol} \times F_{vol} \times FCN-N_2O \times PRG$$

avec FE<sub>lix</sub> et FE<sub>vol</sub> les facteurs d'émission en fonction du phénomène (lixiviation = 0,025 ou volatilisation = 0,01) et F<sub>lix/vol</sub> le facteur de perte par lixiviation (= 0,30) ou volatilisation (= 0,10 pour les engrais minéraux et 0,20 pour les engrais organiques). Dans le nouveau paramétrage IPCC 2006, les coefficients sont respectivement 0,0075, 0,01, 0,30, 0,10.

### Effets amont

• La diminution des émissions de CO<sub>2</sub>, en amont de l'exploitation, dues au transport et à la fabrication des engrais ( $\Delta E_{a\_fertN}$ ) est prise en compte de la façon suivante. Selon les références Dia'terre® v1.33 (qui s'appuie sur Ges'tim), le transport et la fabrication d'un kilogramme d'azote minéral sont à l'origine de l'émission de 5,305 kgCO<sub>2e</sub>. En 2010, selon le rapport d'activité de l'UNIFA, seulement 35% des engrais minéraux ont été fabriqués en France. D'où la réduction d'émission suivante, liée à la variation d'engrais N utilisé (QN) :

$$\Delta E_{a\_fertN} = QN \times 5,305 \text{ kgCO}_2e \quad (35\% \text{ de cette atténuation étant réalisée en France})$$

• La diminution des émissions amont, liées aux variations de nombres de passages pour l'épandage d'engrais ou de produits phytosanitaires ( $\Delta E_{a\_pass}$ ), est calculée en tenant compte de la consommation de carburant utilisée pour chaque passage (0,7 l de diesel /ha, barème entraide région Centre – Ile-de-France 2010), et des valeurs de référence pour les émissions amont (0,563 kgCO<sub>2e</sub> /litre de diesel) du carburant consommé pour l'apport d'engrais, et appliquées à la variation de surface épandue (SE en ha) :

$$\Delta E_{a\_pass} = SE \times 0,7 \times 0,563$$

• La variation d'émissions amont liées à la variation de surface labourée ( $\Delta E_{a\_labour}$ ) est estimée en fonction de la consommation de carburant utilisée pour le labour (13,4 l/ha, barème entraide région Centre – Ile-de-France 2010), et des valeurs de référence pour les émissions amont (0,563 kgCO<sub>2e</sub> /litre de diesel) liées au labour, et appliquées à la variation de surface labourée (SL en ha) :

$$\Delta E_{a\_labour} = SL \times 13,4 \times 0,563$$

• Les émissions amont liées aux changements d'usages des produits phytosanitaires ( $\Delta E_{a\_phy}$ ) sont estimées en fonction des quantités de matières actives utilisées (MA) par type de produit (F : fongicides, H : herbicides ; I : insecticides ; R : régulateur de croissance, exprimées en kg de MA) et des facteurs d'émissions de référence :

$$\Delta E_{a\_phy} = (MA_H \times FE_H) + (MA_F \times FE_F) + (MA_I \times FE_I) + (MA_R \times FE_R)$$

avec : FE<sub>H</sub> = 8,985 kgCO<sub>2e</sub> /kg de MA  
 FE<sub>F</sub> = 6,009 kgCO<sub>2e</sub> /kg de MA  
 FE<sub>I</sub> = 25,134 kgCO<sub>2e</sub> /kg de MA  
 FE<sub>R</sub> = 8,478 kgCO<sub>2e</sub> /kg de MA

*Rq : La nature précise des produits, ainsi que les quantités de matières actives, appliqués sur chaque culture n'étant pas disponibles, nous avons réalisé une estimation à partir des nombres moyens de produits appliqués par culture (enquête "Pratiques culturales" 2006).*

*En 2010, la quantité totale de matières actives vendues est de 48 200 tonnes (UIPP), donc la quantité de matières actives appliquée par ha de SAU moyenne en France est de 2,20 kg MA./ha de SAU. La consommation de produits phytosanitaires en France est répartie comme suit : 25,60% sur blé tendre, 8,40% sur orge, 9% sur colza et 2% sur protéagineux en 2010.*

*En appliquant ces valeurs au nombre moyen de chaque type de produit appliqué sur chaque type de culture, on peut alors estimer la quantité de matière active épandue par type de produit (F, H, I, R) sur chaque culture (blé tendre, orge, colza, protéagineux).*

### • Quantification de l'atténuation

Comme indiqué plus haut, les calculs ont été réalisés directement à l'échelle globale (et non à l'échelle de l'hectare de légumineuses supplémentaire introduit), car l'introduction de légumineuses modifie les surfaces dans les autres grandes cultures, et donc modifie les émissions liées à ces changements d'assolement à l'échelle de la France.

Pour estimer ce changement d'assolement, et les conséquences induites, on a considéré plusieurs hypothèses :

**H1** : on introduit au maximum une légumineuse à graines 1 fois tous les 6 ans dans la rotation, suivant les recommandations techniques pour limiter le risque de bioagresseur tellurique (*Aphanomyces euteiches*, au cas où la légumineuse est un pois) et pour maintenir une diversité dans les cultures de la succession ; en conséquence, sur les sols éligibles, la proportion de légumineuses à graines dans l'assolement est de 16,7%.

**H2** : étant donné la forte sensibilité d'un grand nombre d'espèces de légumineuses à graines aux stress abiotiques, nous avons exclu de la surface cultivable, les sols à trop faible Réserve Utile (RU <80 mm). De plus, étant donné la difficulté à cultiver du pois, légumineuse privilégiée jusqu'à maintenant dans les assolements français, sur des sols à cailloux, nous avons également exclu les sols comprenant des éléments grossiers. En se fondant sur la base Corine Land Cover, et en croisant ces deux critères, nous avons estimé la proportion de la surface en grande culture en France, éligible pour cultiver des légumineuses à graines, à 61%, ce qui représente sans doute une hypothèse basse. Cependant, il faut noter que la diversité disponible des espèces de légumineuses pourrait permettre de cultiver ces espèces sur les sols exclus. Nous avons donc appliqué la proportion proposée ci-dessus à la surface des grandes cultures de France, dans notre calcul de base, et évoqué d'autres hypothèses pour le calcul des fourchettes hautes et basses.

**H3** : l'introduction d'une légumineuse à graines se fait au détriment du blé tendre (1/6 de la surface en légumineuses), de l'orge (2/3) et du colza (1/6), l'orge étant moins rentable que le blé et le colza (d'autres hypothèses ont cependant été testées et les résultats seront présentés).

**H4** : la réduction des surfaces en colza correspond à des surfaces actuelles de colza en précédent céréales à paille (100%) ; la réduction des surfaces en blé correspond à des surfaces actuelles de blé en précédent céréales à paille (100%). Les autres précédents étant plus intéressants économiquement, ils sont considérés comme privilégiés dans le choix des successions. La réduction des surfaces en orge correspond à des surfaces d'orge en précédent céréales à paille (100%).

**H5** : l'introduction d'une légumineuse à graines introduit de fait un précédent favorable pour les autres cultures de l'assolement. On considère que 5/6 des légumineuses sont suivies d'un blé et 1/6 des légumineuses sont suivies d'un colza, cette innovation étant apparue très intéressante sur le plan économique et environnemental (Schneider et al., 2010), mais étant encore rarement mise en œuvre.

**H6** : la dose d'engrais N appliquée sur un blé de pois ou un colza de pois est réduite par rapport aux mêmes cultures suivant une céréale. Les reliquats d'azote dans le sol après culture étant plus élevés, et les résidus des légumineuses étant riches en azote et conduisant à une minéralisation nette plus élevée pour la culture suivante, cela permet de réduire la fertilisation azotée sur celle-ci. Nous avons estimé cet écart pour le colza et le blé. D'après des travaux récents, l'écart de fertilisation sur un colza en fonction du précédent peut être estimé à 50 uN/ha (Schneider et al., 2010). Sur un blé, l'écart réel de fertilisation appliqué en France est de 15 uN/ha (données enquête "Pratiques culturales" 2006). Cette valeur est cependant sous-estimée par rapport à l'effet précédent des légumineuses, et aux recommandations des outils de raisonnement de la fertilisation qui montrent, dans un département français, un gain recommandé de fertilisation de plus de 40 unités, alors que l'économie appliquée par les agriculteurs n'est que de 20 uN/ha (Schneider et al., 2010). En moyenne, nous avons donc considéré que l'effet précédent d'une légumineuse sur la culture suivante (quelle que soit sa nature) était une réduction de la fertilisation azotée moyenne de **33 uN/ha**. On appliquera cette réduction à toute légumineuse à graines.

**H7** : aucun engrais N n'est appliqué sur les cultures de légumineuses à graines.

Ces hypothèses permettent de calculer les variations de surface des différentes cultures, suite à l'introduction des légumineuses, par rapport aux surfaces 2010 :

Protéagineux : 397 109 ha → 1 274 923 ha

Blé tendre de blé : 836 902 ha (2010) → 0 ha

Blé tendre de maïs et autres céréales : 1 575 345 ha → 1 534 434 ha

Blé tendre de pois, colza et autres : 2 510 707 ha → 3 242 218 ha

Soit total blé tendre : 4 922 954 ha → 4 776 652 ha (-3%)

Orge : 1 572 775 ha → 987 566 ha (-12%)

Colza et navette sur céréale à paille : 1 463 804 ha → 1 171 199 ha

Colza et navette sur pois : 0 → 146 302 ha

Soit total colza : 1 463 804 ha → 1 317 502 ha (-3%)

En partant des surfaces cultivées de chaque culture (blé tendre, orge, colza, légumineuses à graines) en 2010 (SAA 2010) et des doses moyennes d'engrais azoté appliquées sur ces cultures (EPC 2006), on peut alors estimer la quantité d'engrais N globalement économisée par l'introduction de légumineuses à graines dans les assolements et rotations (QN) à l'échelle de la France.

QN = -155 641 MgN

Avec les éléments de calculs décrits plus hauts, nous pouvons donc calculer les atténuations d'émissions suivantes (on notera d'un signe + les économies d'émissions, et d'un signe – les accroissements d'émissions) :

- Atténuations d'émissions directes de N<sub>2</sub>O dues à la réduction de la fertilisation azotée :

$$\Delta Ed_{\text{fertiN}} = 852\,967 \text{ MgCO}_2\text{e/an} \quad (728\,844 \text{ MgCO}_2\text{e/an avec le calcul "expert"})$$

- Atténuations d'émissions directes et amont liées aux variations de nombres de passages pour l'épandage d'engrais ou de phytos :

Avec une estimation de réduction de la surface totale recevant une application de produit phytosanitaire de :

$$SE = -2\,282\,316 \text{ ha (engrais)} + 13\,167 \text{ ha (produits phytosanitaires)} = -2\,269\,149 \text{ ha}$$

$$\Delta Ed_{\text{pass}} = 4\,208 \text{ MgCO}_2\text{e/an} \quad (\text{idem pour calcul "expert"})$$

$$\Delta Ea_{\text{pass}} = 894 \text{ MgCO}_2\text{e/an} \quad (\text{idem pour calcul "expert"})$$

- Atténuations d'émissions directes et amont liées à la variation de surface labourée (SL) :

La réduction de surface labourée est estimée à SL = -396 187 ha

$$\Delta Ed_{\text{labour}} = 14\,063 \text{ MgCO}_2\text{e/an}$$

$$\Delta Ea_{\text{labour}} = 2\,989 \text{ MgCO}_2\text{e/an}$$

- Atténuations d'émissions indirectes de N<sub>2</sub>O liées au dépôt d'ammoniac et à la lixiviation:

$$\Delta Ei_{\text{fertiN}} = 644\,464 \text{ MgCO}_2\text{e/an} \quad (236\,874 \text{ MgCO}_2\text{e/an avec le calcul "expert"})$$

- Emissions directes liées à la fixation symbiotique des légumineuses et à la composition des résidus de culture (on a une augmentation des émissions) :

L'estimation de variation de quantité d'N fixée s'élève à QNfix = 160 095 Mg

$$\Delta Ed_{\text{fix}} = -974\,865 \text{ MgCO}_2\text{e/an} \quad (0 \text{ MgCO}_2\text{e/an avec le nouveau paramétrage})$$

L'estimation de surplus d'N contenu dans les résidus s'élève à QNres = 11 555 Mg

$$\Delta Ed_{\text{res}} = -70\,364 \text{ MgCO}_2\text{e/an} \quad (-67\,640 \text{ MgCO}_2\text{e/an avec le calcul "expert"})$$

- Emissions amont liées aux changements d'usages des phytos :

$$\Delta Ea_{\text{phy}} = 1\,846 \text{ MgCO}_2\text{e/an}$$

- Emissions de CO<sub>2</sub>, en amont de l'exploitation, dues au moindre transport et fabrication des engrais :

$$\Delta Ea_{\text{fertiN}} = 825\,674 \text{ tCO}_2\text{e/an} \quad (35\% \text{ de cet abattement s'applique à la France})$$

#### • Conclusion : potentiel d'atténuation unitaire de la sous-action

L'atténuation globale (réduction des émissions directes et indirectes) liée à l'introduction de légumineuses à graines est de : 470 473 MgCO<sub>2</sub>e/an (913 348 MgCO<sub>2</sub>e/an avec le calcul "expert") pour les surfaces en grandes cultures concernées, soit 536 kgCO<sub>2</sub>e/an/ha de légumineuses implanté (1 044 kgCO<sub>2</sub>e/an/ha de légumineuses implanté avec le calcul "expert").

L'atténuation supplémentaire induite en amont de l'exploitation est de 831 403 MgCO<sub>2</sub>e/an (valeur identique avec le calcul "expert"), soit 947 kgCO<sub>2</sub>e/an/ha de légumineuses implanté.

L'atténuation totale, y compris amont, est donc de 1 301 877 MgCO<sub>2</sub>e/an (1 747 752 MgCO<sub>2</sub>e/an avec le calcul "expert"), et l'atténuation unitaire totale de 1 483 kgCO<sub>2</sub>e/an/ha de légumineuses implanté (1 991 kgCO<sub>2</sub>e/an/ha de légumineuses implanté avec le calcul "expert").

Si on prend l'hypothèse H2 que l'introduction des légumineuses à graines se fait au détriment des surfaces en orge (2/3) et colza (1/3), car les surfaces en colza risquent de diminuer (suite à l'arrêt possible du soutien des prix aux biocarburants), alors l'atténuation totale serait de 1 244 455 MgCO<sub>2</sub>e/an (1 704 515 MgCO<sub>2</sub>e/an avec le calcul "expert") pour les surfaces en grandes cultures concernées, soit 1 418 kgCO<sub>2</sub>e/an/ha de légumineuses implanté (1 942 kgCO<sub>2</sub>e/an/ha de légumineuses implanté avec le calcul "expert").

Si on prend l'hypothèse H3 que l'introduction du pois se fait au détriment uniquement des surfaces en orge, car le blé et le colza, cultures les plus rentables, maintiennent leurs surfaces, alors l'atténuation globale est de 1 077 697 MgCO<sub>2</sub>e/an (1 572 743 MgCO<sub>2</sub>e/an avec le calcul "expert") pour les surfaces en grandes cultures concernées, soit 1 228 kgCO<sub>2</sub>e/an/ha de légumineuses implanté (1 792 kg CO<sub>2</sub>e/an/ha de légumineuses implanté avec le calcul "expert").

## 5.1.b. Ligne de base et conditions de développement de l'action

### ● Situation actuelle

En 2010, les surfaces en légumineuses à graines s'élevaient à 397 109 ha environ, sur un total de grandes cultures (céréales, riz, pommes de terre, protéagineux, oléagineux, légumes secs, plantes textiles) de 12 515 194 ha (données SAA 2010). Ces surfaces ont beaucoup varié dans le passé : très faibles au début des années 1970, elles ont atteint un pic en 1993, dépassant 720 000 ha, puis ont rechuté, pour passer par un minimum en 2009 où elles avoisinaient les 203 000 ha. Les rendements sont très variables, avec plusieurs valeurs moyennes françaises basses dans les dix dernières années, liées à des stress hydriques et thermiques de fin de cycle. En 2012, les rendements sont à nouveau très faibles en légumineuses. On peut donc penser que les surfaces risquent encore de chuter, car de nombreux facteurs (agronomiques, climatiques, techniques, économiques, sociaux) convergent pour limiter l'intérêt de ces cultures chez les agriculteurs et les collecteurs. Les facteurs les plus connus sont : la forte sensibilité de la culture aux stress thermiques et hydriques de fin de cycle, ainsi qu'au tassement du sol, des difficultés liées à la récolte, une marge brute annuelle qui est largement inférieure à celle d'autres cultures (blé et colza notamment). Une analyse complète de ces facteurs multiples, et caractéristiques d'un verrouillage du système socio-technique, a été proposée récemment par Meynard et al. (2013). Les légumineuses à graines ont fait l'objet de soutiens publics en 2010, ce qui avait permis une légère augmentation de la surface (passant de 203 000 ha en 2009 à 397 000 ha en 2010, puis revenant à 278 000 ha en 2011 ; données Agreste).

### ● Conditions nécessaires à la mise en place de l'action (critères de détermination de l'assiette maximale technique)

La culture de légumineuses ne peut se faire sur tous les types de sols (la récolte des pois nécessitant de raser le sol avec la barre de coupe de la moissonneuse, la culture sur sols caillouteux est fortement déconseillée). Cependant, dans ces types de sols, la culture de la féverole est possible. De plus, certaines espèces de légumineuses (pois de printemps par exemple) sont très sensibles aux stress hydriques et thermiques (fortes températures) de fin de cycle (printemps - début d'été), conduisant à des rendements jugés trop faibles et trop variables par les producteurs. Leur culture dans les zones à fin de printemps chaud ou à réserve utile en eau trop faible est donc déconseillée également. En ôtant ces deux types de sols, et en se basant sur un calcul à l'échelle moyenne de la France, seuls 61% de la surface en grandes cultures en France pourrait accueillir des légumineuses (données Corine Land Cover).

Chez le pois, un délai de retour trop fréquent accroît les risques d'infestation par une maladie racinaire (*Aphanomyces euteiches*) qui, si elle infeste une parcelle, empêche définitivement de cultiver du pois sur cette parcelle, car aucune méthode de lutte curative n'existe. Certaines légumineuses, comme la féverole, ne sont pas sensibles à ce champignon (Moussart et al., 2008). De plus, les pois d'hiver semblent nettement moins sensibles que les pois de printemps. Nous avons donc retenu un délai de retour maximal de 1 an sur 6 pour les légumineuses à graines, dans le but de maintenir une diversité des cultures dans la succession.

Au niveau technique, la culture d'une légumineuse ne requiert pas de spécificité : pas de matériel spécifique nécessaire par rapport aux grandes cultures, techniques appliquées assez similaires à celles appliquées sur grandes cultures classiques. Devant la variabilité des rendements, certains agriculteurs parlent tout de même du besoin d'une certaine "technicité", supérieure par rapport à la conduite d'un blé. En effet, un mauvais positionnement du semis, d'un fongicide, d'un insecticide, d'une irrigation, peut faire considérablement chuter le rendement. Mais les variations du rendement sont parfois inexplicables par les producteurs, ce qui peut expliquer leur réaction sur le besoin de technicité.

Comme l'ont montré Meynard et al. (2013), une des raisons expliquant le faible développement des légumineuses est la faible disponibilité de références techniques sur ces cultures. L'acquisition de telles références, et un certain apprentissage, aussi bien de la part des agriculteurs que des techniciens les conseillant, serait aujourd'hui nécessaire pour redévelopper ces cultures.

En conclusion, les conditions techniques utilisées pour estimer la surface maximale en légumineuses à graines sont :

- Retour des légumineuses sur une même parcelle tous les 6 ans maximum ;
- Pas d'implantation sur sols à réserve hydrique inférieure à 80 mm, car les légumineuses sont, d'une manière générale, sensibles au stress hydrique ;
- Pas d'implantation sur des sols trop caillouteux (classe : sans éléments grossiers).

### ● Assiette maximale technique (AMT)

Pour les grandes cultures, nous avons appliqué une proportion de 16,7% (correspondant au retour d'une légumineuse 1 an sur 6) sur 61% de la surface en grandes cultures (correspondant à l'exclusion des sols avec faible RU ou avec éléments grossiers). En ôtant les surfaces déjà cultivées en légumineuses à graines en 2010 (397 109 ha), le calcul donne un développement supplémentaire de **877 814 ha** pour les légumineuses à graines, ce qui correspondrait à une surface totale de 1 274 923 ha (i.e. l'AMT).

- Scénario de diffusion (% de l'AMT atteint en 2030 et cinétique)

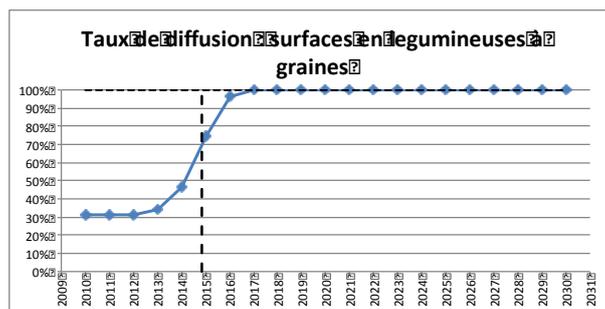
Dans toutes les études publiées (cf. Tableau 1), aucune cinétique d'évolution n'a été fixée ; toutes ont supposé que l'assiette maximale était atteinte au bout de 20 ans sans préciser de quelle manière elle le serait.

La cinétique d'évolution étant fixée identique pour toutes les actions (courbe sigmoïde), nous avons estimé les paramètres de la façon suivante. Nous avons considéré :

- que le taux de diffusion de l'action atteindrait 100% au maximum,
- et que, si une réglementation était imposée, alors le taux de diffusion augmenterait rapidement, pour atteindre son maximum dès l'année 2017.

La courbe retenue a donc l'allure représentée sur la Figure 1.

Figure 1. Evolution du taux de diffusion des surfaces en légumineuses à graines



### 5.1.c. Potentiel d'atténuation à l'échelle du territoire français

- Potentiel d'atténuation de l'année 2030 en appliquant la sous-action sur l'AMT (et, s'il est différent de l'AMT, le % de l'AMT atteint en 2030)

Avec ces hypothèses, l'augmentation de 877 814 ha de légumineuses à graines conduit à une économie d'engrais utilisé de 155 641 MgN. Ces valeurs sont cohérentes avec les estimations réalisées antérieurement (CGDD, 2009 : +514 000 ha de légumineuses implique -90 000 tonnes d'azote minéral).

En appliquant les modifications induites, l'atténuation potentielle en 2030 (émissions directes + amont liées à l'exploitation agricole) à l'échelle du territoire français est de **1 301 877 MgCO<sub>2</sub>e** (calcul "CITEPA") et de **1,746 TgCO<sub>2</sub>e** (calcul "expert").

Avec les deux autres hypothèses de substitution des protéagineux, H2 (pas de modification de la surface en blé tendre, substitution orge (2/3) et colza (1/3)) et H3 (substitution uniquement de l'orge), les valeurs sont estimées respectivement à **1,705 TgCO<sub>2</sub>e** (calcul "CITEPA") et à **1.573 TgCO<sub>2</sub>e** (calcul "expert").

- Potentiel d'atténuation cumulé sur la période 2010-2030 en appliquant le scénario de diffusion

En appliquant le scénario de diffusion proposé ci-dessus, l'atténuation cumulée sur la période 2010-2030 pour la sous-action "Légumineuses à graines" est de **20,98 TgCO<sub>2</sub>e** (méthode "CITEPA") et **28,2 TgCO<sub>2</sub>e** (calcul "expert").

Avec les deux autres hypothèses de substitution des protéagineux, H2 (pas de modification de la surface en blé tendre, substitution orge (2/3) et colza (1/3)) et H3 (substitution uniquement de l'orge), les valeurs sont estimées respectivement à **27,5 TgCO<sub>2</sub>e** (méthode "CITEPA") et à **25,3 TgCO<sub>2</sub>e** (calcul "expert").

### 5.1.d. Coûts et bénéfices induits par la sous-action

- Inventaire des modifications induites par la sous-action

Les coûts et bénéfices induits par cette sous-action sont de plusieurs natures :

- les marges par culture n'étant pas similaires, une modification des proportions de chaque espèce cultivée dans l'assolement français se traduit par des variations de marge moyenne à l'échelle de la France ;
- de même, l'introduction de légumineuses à graines permet de modifier les marges des cultures suivantes, grâce à la prise en compte des effets 'précédent' des légumineuses. Cette modification a été prise en compte dans l'estimation de la marge moyenne française ;

- nous avons estimé le gain induit par la réduction des passages pour application d'engrais azoté sur les surfaces cultivées en légumineuses à graines (pour les cultures suivantes, nous avons considéré que, même si la dose d'engrais N est réduite, le nombre de passages reste inchangé) ;
- le nombre de passages pour application de produits phytosanitaires n'étant pas similaire entre cultures, nous avons également estimé le gain ou la perte induite par l'introduction de surfaces de légumineuses à graines, qui n'est pas intégré dans les calculs de marge brute ;
- enfin, le semis direct étant favorisé derrière légumineuse à graines, nous avons estimé le gain induit, au niveau de la surface labourée à l'échelle de la France, par l'introduction de légumineuses à graines.

#### ● Estimations des coûts/bénéfices

##### **Marges brutes par culture tenant compte de leur précédent**

Nous avons utilisé les marges estimées à partir du RICA 2010 (908 €/ha pour le blé tendre ; 490 €/ha pour l'orge ; 259 €/ha pour les protéagineux ; 663 €/ha pour le colza). Par ailleurs, nous avons estimé la variation de ces marges liée au précédent cultural (prise en compte de l'effet sur le rendement et la réduction d'intrants sur la culture suivante), à partir de données récentes correspondant à 4 régions françaises (Bourgogne, Moselle, Beauce irriguée et Thymerais ; Schneider et al., 2010). Les estimations de ces ratios de marges s'élèvent à :

- marge de Blé en précédent Pois / marge de Blé en précédent Blé = 1,23 à 1,57, moyenne 1,36 ;
- marge de Colza en précédent Pois / marge de Colza en précédent Blé = 1,11 à 1,26, moyenne 1,17.

En appliquant les ratios estimés dans cette étude sur les marges du RICA et en tenant compte des surfaces occupées par chaque espèce selon son précédent, la marge d'un blé/blé peut alors être estimée à 768 €/ha, alors que la marge d'un blé/protéagineux ou blé/colza est estimée à 1042 €/ha. De même pour le colza, la marge passe de 663 €/ha à 774 €/ha quand on passe d'un précédent céréale à paille à un précédent protéagineux.

A partir de ces valeurs, nous avons estimé la perte de marge brute à l'échelle française à -52 319 786 €, ce qui représente un coût de 60 € par hectare de légumineuse supplémentaire introduite en moyenne, et un coût de 4,40 € par ha de SCOP française.

Avec les deux autres hypothèses de substitution des protéagineux, H2 (pas de modification de la surface en blé tendre, substitution orge (2/3) et colza (1/3)) et H3 (substitution uniquement de l'orge), les valeurs sont estimées respectivement à -36 907 058 € (coût pour H2) et +13 713 538 € (gain pour H3).

Ces effets 'précédent', pris en compte dans les ratios, ne tiennent pas compte de la variation des passages d'engrais et de produits phytosanitaires et de la variation des surfaces labourées, qui ont été estimés par ailleurs.

##### **Réduction des passages d'engrais et de produits phytosanitaires**

En appliquant le nombre moyen de passages pour application d'engrais et de produits phytosanitaires par culture (données enquête "Pratiques culturales" 2006) à la variation des surfaces de chaque culture induite par l'introduction de légumineuses à graines, nous estimons la variation de surface avec épandage d'engrais à -2 282 316 ha, et la variation de surface avec épandage de phytosanitaires à +13 167 ha. Avec les deux autres hypothèses, ces surfaces sont respectivement de -2 194 535 ha et -207 749 ha (H2) et de -2 194 535 ha et +541 319 ha (H3).

A partir de ces surfaces, et en considérant le coût d'un passage à 6,43 €/ha (barème entraide région Centre – Ile-de-France 2010), nous estimons le coût à -14 555 865 € (soit un bénéfice net pour H1), ou -15 995 143 € (H2) et -9 201 098 € (H3).

##### **Réduction des surfaces labourées**

En appliquant les proportions de surfaces labourées de chaque culture selon le précédent, on peut estimer une réduction globale de surface labourée en France, liée à l'introduction des légumineuses dans l'assolement de la France, à -396 187 ha (H1), -711 175 ha (H2) et -767 648 ha (H3).

En considérant un coût de labour de 52,43 €/ha (barème entraide région Centre – Ile-de-France 2010), les coûts induits à l'échelle de la France sont donc respectivement de -20 772 065 € (H1), -37 286 931 € (H2) et -40 247 794 € (H3), soit un bénéfice net dans tous les cas.

##### **Bilan des bénéfices/coûts**

L'ensemble des gains/coûts liés à l'introduction de légumineuses à l'échelle de la France (variation de marge, de coût de passage et de coût de labour) représente donc un coût global de 16 991 856 € (soit 19,36 €/ha de légumineuse supplémentaire introduite) dans le cas de H1, un coût global de 16 375 015 € (soit 18,65 €/ha de légumineuse supplémentaire introduite : gain) pour H2, et un coût global de 63 162 430 € (soit 71,95 €/ha de légumineuse supplémentaire introduite : gain) pour H3.

- **Autres coûts (coûts de transaction privés, publics)**

L'insertion de légumineuses dans les systèmes de culture français est aujourd'hui faible. Cette faiblesse est en partie liée à une comparaison systématique des marges brutes par culture, très défavorable aux légumineuses, sans tenir compte de leur effet précédent, alors que la prise en compte de ce dernier fait clairement apparaître une quasi similitude des marges à l'échelle de la succession, et des impacts environnementaux meilleurs, pour des systèmes avec légumineuses, par rapport à des systèmes sans légumineuses (Schneider et al., 2010 ; Nemecek et al., 2008).

Cependant, cette différence de marge n'explique pas en totalité la faiblesse observée. Plusieurs autres obstacles peuvent être évoqués, même si l'estimation des coûts induits est délicate.

D'une part, la collecte de légumineuses impose aux organismes de collecte une organisation et une logistique spécifique lors de la récolte (cellules de stockage supplémentaires nécessaires, à une période où plusieurs espèces sont récoltées et livrées simultanément dans les silos), et des coûts de stockage plus élevés que pour les autres cultures dominantes, du fait des faibles volumes collectés (rapport Projet domestique). Ensuite, la réduction des surfaces a contribué à un désinvestissement du conseil agricole dans le suivi technique de ces cultures (Meynard et al., 2013) : la relance de ces cultures nécessiterait donc une mise à jour des connaissances sur le suivi technique de ces cultures, afin d'optimiser le conseil agricole (les enquêtes de pratiques culturales montrent de grandes variations dans les techniques appliquées, et laissent penser qu'une marge importante est possible dans l'optimisation des itinéraires techniques sur les légumineuses à graines). La même remarque s'applique à la conduite des cultures suivant les légumineuses : les itinéraires techniques conseillés aujourd'hui sont peu adaptés à la nature du précédent cultural, alors que les experts mentionnent des économies significatives dans l'usage des intrants derrière légumineuse (Carrouée et al., 2012). On peut donc estimer qu'un coût lié à la formation des conseillers et des agriculteurs devra être estimé pour atteindre l'objectif visé pour cette sous-action.

Si l'atteinte des surfaces estimées ne peut s'envisager que grâce à une réglementation publique (règle de BCAE dans la réglementation PAC, par exemple), le coût de sa mise en place et de son suivi devra être estimé.

- **Conclusions : coût unitaire de la sous-action, coût annuel pour l'AMT (ou le % atteint) en 2030 et coût cumulé sur la période 2010-2030**

Sans estimer les coûts de transaction publics, le **coût unitaire** de cette sous-action (par ha de légumineuse à graines supplémentaire) est de : 19,36 €/ha (H1), -18,65 €/ha (H2 : gain unitaire) et -71,95 €/ha (H3 : gain unitaire).

Pour l'assiette maximale atteinte en 2030, le **coût total** est de 16 991 856 € (H1), -16 375 015 € (H2 ; gain économique) et -63 162 430 € (H3 ; gain économique).

Enfin, le **coût cumulé** sur la période 2010-2030 est de 273,8 M€ (H1), -264 M€ (H2 ; gain économique) et -1 018 M€ (H3 ; gain économique).

### **5.1.e. Synthèse : récapitulatif de l'atténuation escomptée, du coût, et du coût de la tonne de CO<sub>2</sub>e évité**

L'atténuation unitaire a été estimée à 536 kgCO<sub>2</sub>e/ha de légumineuse introduite/an (1 044 kgCO<sub>2</sub>e/ha/an avec le calcul "expert") pour les émissions directes et indirectes liées à l'exploitation agricole, et à 947 kgCO<sub>2</sub>e/ha/an d'émissions induites en amont (idem calcul "expert"). Cela conduit à une atténuation unitaire totale de **1 483 kgCO<sub>2</sub>e/ha** de légumineuse introduite/an (**1 991 kgCO<sub>2</sub>e/ha/an** avec le calcul "expert").

En appliquant cette atténuation sur l'assiette maximale technique, l'atténuation annuelle est de 470 500 MgCO<sub>2</sub>e/an (916 300 MgCO<sub>2</sub>e/an avec le calcul "expert") pour les émissions directes et indirectes liées à l'exploitation agricole et 831 400 MgCO<sub>2</sub>e/an d'émissions induites en amont. Cela conduit à une atténuation annuelle totale de **1,3 TgCO<sub>2</sub>e/ha** de légumineuse introduite/an (**1,7 TgCO<sub>2</sub>e/ha/an** avec le calcul "expert").

L'atténuation totale cumulée sur la période 2010-2030 est estimée à **21 TgCO<sub>2</sub>e** (méthode "CITEPA") et **28,2 TgCO<sub>2</sub>e** (calcul "expert").

Compte tenu de la plus faible marge brute sur la culture de légumineuse, du gain de marge brute sur les cultures suivantes, des gains liés à la réduction du nombre de passages pour application d'engrais et de produits phytosanitaires, et du gain lié à la réduction de surface labourée, le **coût total annuel** de l'introduction de légumineuses à graines s'élève à **17,0 M€** et **19,36 €/ha** de légumineuse introduite.

Le **coût de la tonne de CO<sub>2</sub>e évité** peut donc être estimé à **18,60 €/MgCO<sub>2</sub>e** (gain de 18,25 €/MgCO<sub>2</sub>e pour l'hypothèse 2 de substitution ; gain de 77,02 €/MgCO<sub>2</sub>e pour l'hypothèse 3 de substitution), hors émissions induites, avec la méthode "expert". Avec la méthode de l'inventaire 2010, le coût de la tonne de CO<sub>2</sub>e évité est de 36,12 €/MgCO<sub>2</sub>e (gain de 37,45 €/MgCO<sub>2</sub>e pour l'hypothèse 2 ; gain de 194,31 €/MgCO<sub>2</sub>e pour l'hypothèse 3 de substitution).

## 5.2. Potentiel d'atténuation et du coût de la sous-action 2 Prairies temporaires avec légumineuses

La sous-action 2 consiste à introduire une plus forte proportion de légumineuses en prairies temporaires assolées, et à maintenir cette proportion de légumineuse pendant la durée de vie de la prairie, en adaptant la fertilisation azotée appliquée. Cette sous-action ne modifie pas les surfaces actuelles de prairies temporaires et ne vise pas à modifier leur durée de vie, mais uniquement à modifier la pratique de fertilisation azotée appliquée à ces prairies, condition nécessaire à un maintien des légumineuses. Compte tenu de l'évolution de la composition de légumineuses dans les prairies, dont la proportion diminue au cours du temps, on considèrera que l'effet précédent de la prairie ne sera pas modifié par rapport à une prairie de graminées pures.

### 5.2.a. Potentiel d'atténuation unitaire

#### • Inventaire des effets sur les émissions

##### Effets directs sur les émissions de GES :

- Effets directs liés à la réduction de l'utilisation d'engrais azotés au champ avec effet sur les mécanismes de nitrification et dénitrification (cf. ci-dessus) ;
- Effets directs liés à la réduction de la surface avec un passage pour épandage d'engrais N.

##### Effets indirects sur les émissions de GES :

- Effets indirects liés à la réduction de la fertilisation azotée avec diminution des phénomènes de dépôt ammoniacal et de lixiviation.

##### Effets amont :

- Emissions amont liées à la réduction de consommation en énergie fossile utilisée pour le transport et la fabrication des engrais.

#### • Quantification de l'atténuation potentielle

D'après les données de l'enquête "Pratiques culturales" 2006, les quantités d'engrais azoté appliquées sur les prairies temporaires en France varient selon leur composition (Tableau 3). En moyenne, les prairies temporaires composées de moins de 20% de légumineuses reçoivent 66 uNmin/ha, alors que les prairies composées de plus de 40% de légumineuses reçoivent 31 uNmin/ha, la quantité d'Norg variant beaucoup moins entre types de prairies. Pour maintenir une proportion élevée de légumineuses pendant une grande partie de la durée de vie de la prairie, il apparaît nécessaire de semer uniquement des prairies composées de plus de 40% de légumineuses et de réduire la fertilisation azotée appliquée pour maintenir cette proportion le plus longtemps possible. Cela implique donc d'appliquer, en moyenne, **31 uNmin/ha/an** d'engrais azoté sur tout hectare de prairie temporaire. Cette réduction nous semble être un minimum. En effet, le GNIS et l'Institut de l'Elevage recommandent même de supprimer tout apport d'engrais minéral sur les associations de graminées-légumineuses, afin que le taux de présence de la légumineuse se maintienne au cours du temps. Cette sous-action consiste donc à économiser 35 uNmin/ha pour 65,85% des prairies temporaires actuelles composées de moins de 20% de légumineuses, et 14 uNmin/ha pour 23,95% des prairies actuelles (composées de 20 à 40% de légumineuses). Les prairies à très forte dominance de légumineuses (type luzerne pour la déshydratation) étant comptabilisées dans le dernier type (>40% de légumineuses), la pratique de fertilisation azotée appliquée ne sera pas modifiée.

**Tableau 3.** Pratiques de fertilisation azotée et rendement des prairies temporaires en France (résultats de l'enquête "Pratiques culturales" 2006)

	Taux de couverture de la parcelle occupée par des légumineuses			ensemble
	< 20%	20 à 40 %	> 40%	
Superficie totale (ha)	1 594 623	579 965	247 141	2 421 729
Surface en %	65,85%	23,95%	10,21%	100%
Rendement moyen (q/ha)	74,5	73,9	76,2	74,6
Dose moyenne Nmin (u/ha)	66	45	31	58
Dose moyenne Norg (u/ha)	48	45	36	46

Pour calculer la réduction des émissions due à cette réduction d'apport d'engrais, nous avons utilisé les formules et les facteurs fixés par l'IPCC (mêmes équations que celles utilisées pour les légumineuses à graines) :

- Réduction des émissions directes N<sub>2</sub>O liées à l'utilisation d'engrais :

$$\Delta E_{d\_fertiN} = QN \times Ped \times FE \times FCN-N_2O \times PRG$$

avec QN : la quantité d'engrais minéral azoté non épandue (uN/ha),  
 Ped : la proportion d'émissions directes (0,90 pour le calcul "CITEPA" ; 1 pour le calcul "expert"),  
 FE : le facteur d'émissions (0,0125% pour le calcul "CITEPA" ; 0,01 dans le calcul "expert"),  
 FCN-N<sub>2</sub>O : le facteur de conversion (1,57). La masse atomique de l'azote étant de 14 g/mol et celle de l'oxygène de 16 g/mol, le facteur de conversion de l'azote en N<sub>2</sub>O est de :  $[(14 \times 2 + 16) / (2 \times 14)] = 44 / 28 = 1,57$ .  
 PRG : le Pouvoir de Réchauffement Global (310 dans le calcul "CITEPA" ; 298 dans le calcul "expert").

Soit une réduction unitaire de 192 kgCO<sub>2</sub>e/ha/an (147 kgCO<sub>2</sub>e/ha/an avec le calcul "expert") pour les prairies <20% de légumineuses, et de 77 kgCO<sub>2</sub>e/ha/an (59 kgCO<sub>2</sub>e/ha/an avec le calcul "expert") pour les prairies ayant entre 20% et 40% de légumineuses

- Emissions directes liées aux variations de nombres de passages pour l'épandage d'engrais (SE : réduction de la surface épandue) :

$$\Delta E_{d\_pass} = SE \times 0,7 \times 2,649 = 1,85 \text{ kgCO}_2\text{e/ha/an}$$

On fait l'hypothèse que le nombre de passages d'engrais sera uniquement réduit pour les prairies ayant moins de 20% de légumineuses actuellement, étant donné la réduction de dose espérée.

Soit une réduction unitaire de 1,85 kgCO<sub>2</sub>e/ha/an (idem avec le calcul "expert") pour les prairies <20% de légumineuses.

- Réduction des émissions Indirectes liées au dépôt d'ammoniac et à la lixiviation :

$$\Delta E_{i\_fertiN} = QN \times FE_{lix} \times F_{lix} \times FCN-N_2O \times PRG + QN \times FE_{vol} \times F_{vol} \times FCN-N_2O \times PRG$$

avec FE<sub>lix</sub> et FE<sub>vol</sub> les facteurs d'émission en fonction du phénomène (lixiviation = 0,025 ou volatilisation = 0,01) et F<sub>lix/vol</sub> le facteur de perte par lixiviation (= 0,30) ou volatilisation (= 0,10 pour les engrais minéraux et 0,20 pour les engrais organiques). Dans le calcul "expert", les coefficients sont respectivement 0,0075, 0,01, 0,30, 0,10.

Soit une réduction unitaire de 145 kgCO<sub>2</sub>e/ha/an (53 kgCO<sub>2</sub>e/ha/an avec le calcul "expert") pour les prairies <20% de légumineuses, et de 58 kgCO<sub>2</sub>e/ha/an (21 kgCO<sub>2</sub>e/ha/an avec le calcul "expert") pour les prairies ayant entre 20% et 40% de légumineuses.

- Réduction d'émissions amont de CO<sub>2</sub> due à la moindre consommation d'énergie fossile :

$$\Delta E_{a\_fertiN} = QN \times 5,305 \text{ kgCO}_2\text{e} \quad (35\% \text{ de cette atténuation étant réalisée en France})$$

Soit une réduction unitaire de 186 kgCO<sub>2</sub>e/ha/an (valeurs inchangées avec le calcul "expert") pour les prairies <20% de légumineuses, et de 74 kgCO<sub>2</sub>e/ha/an (valeurs inchangées avec le calcul "expert") pour les prairies ayant entre 20% et 40% de légumineuses.

- **Conclusion : potentiel d'atténuation unitaire de la sous-action**

Le potentiel d'atténuation unitaire de l'ensemble de la sous-action est donc de :

**Emissions directes et indirectes** : 284 kgCO<sub>2</sub>e/ha/an (170 kgCO<sub>2</sub>e/ha/an avec le calcul "expert") pour l'ensemble des prairies <40% de légumineuses.

**Emissions amont** : 156 kgCO<sub>2</sub>e/ha/an (156 kgCO<sub>2</sub>e/ha/an avec le calcul "expert") pour l'ensemble des prairies <40% de légumineuses.

**Total des émissions** : 440 kgCO<sub>2</sub>e/ha/an (326 kgCO<sub>2</sub>e/ha/an avec le calcul "expert") pour l'ensemble des prairies <40% de légumineuses.

## 5.2.b. Ligne de base et conditions de développement de l'action

- **Situation actuelle**

Les surfaces actuelles en prairies temporaires d'association (composition supérieure à 20% de légumineuses) s'élèvent à 1 073 695 ha (dont 84 586 ha de luzerne pour la déshydratation) sur un total de 3 143 134 ha de prairies temporaires (données SAA 2010). Nous considérons que, pour la période d'estimation du potentiel d'atténuation (2010-2030), cette surface ne variera pas.

- **Conditions nécessaires à la mise en place de l'action (critères de détermination de l'assiette maximale technique)**

L'action consistant à réduire la fertilisation azotée de prairies existantes, aucune condition technique n'apparaît nécessaire à sa réalisation.

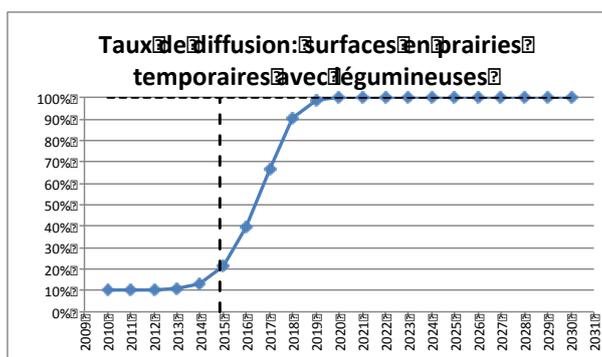
- Assiette maximale technique (AMT)

Pour les prairies, nous avons choisi comme assiette maximale technique la totalité de la surface actuelle en prairies temporaires, soit **3,1 Mha**. Nous faisons l'hypothèse que la totalité des prairies temporaires à l'échelle de la France pourrait être cultivée en association avec plus de 40% en légumineuses (au moins lors de l'implantation, cette proportion étant susceptible de diminuer au cours de la durée de vie de la prairie). Cependant, une partie de cette surface est déjà implantée avec une forte proportion de légumineuses (>40%), ce qui fait que le développement supplémentaire correspondrait à près de **2,8 Mha**.

- Scénario de diffusion (% de l'AMT atteint en 2030 et cinétique)

Pour les légumineuses dans les prairies temporaires, nous avons considéré que la sous-action serait plus lente à se mettre en place que la sous-action 1 "Légumineuses à graines", du fait du renouvellement plus lent des prairies (les prairies de moins de 5 ans ne seront pas retournées avant leur durée d'exploitation maximale). La courbe d'évolution prévisionnelle a donc une allure différente (Figure 2).

Figure 2. Evolution du taux de diffusion des surfaces en prairies avec légumineuses



### 5.2.c. Potentiel d'atténuation à l'échelle du territoire français

- Potentiel d'atténuation de l'année 2030 en appliquant la sous-action sur l'AMT (et, s'il est différent de l'AMT, le % de l'AMT atteint en 2030)

Avec ces hypothèses, l'augmentation de 2 822 534 ha de prairies temporaires avec légumineuses (à un taux supérieur à 40%) conduit à une économie d'engrais utilisé de 82 980 MgN (réduction de 35 uN/ha pour les prairies de moins de 20% de légumineuses ; réduction de 14 uN/ha pour les prairies de 20% à 40% de légumineuses).

Le potentiel d'atténuation à l'échelle de la France, en 2030, est donc de :

**Emissions directes et indirectes** : 801 800 MgCO<sub>2e</sub>/an (479 500 MgCO<sub>2e</sub>/an avec le calcul "expert") pour l'ensemble des prairies concernées.

**Emissions amont** : 441 026 MgCO<sub>2e</sub>/an (idem avec le calcul "expert") pour l'ensemble des prairies concernées.

**Total des émissions** : 1,24 TgCO<sub>2e</sub>/an (0,92 TgCO<sub>2e</sub>/an avec le calcul "expert") pour l'ensemble des prairies concernées.

- Potentiel d'atténuation cumulé sur la période 2010-2030 en appliquant le scénario de diffusion

En appliquant le scénario de diffusion proposé ci-dessus, l'atténuation (émissions directes + indirectes + amont) cumulée sur la période 2010-2030 pour la sous-action "Prairies temporaires" est de **18,0 TgCO<sub>2e</sub>** (calcul "CITEPA") et **13,3 TgCO<sub>2e</sub>** (calcul "expert").

## 5.2.d. Coûts et bénéfices induits par la sous-action

### • Inventaire des modifications induites par la sous-action

D'après l'enquête "Pratiques culturales" 2006, le rendement moyen d'une prairie ne dépend pas de sa composition en légumineuses (Tableau 3). En considérant donc que le rendement de la prairie n'est pas modifié par sa composition, et qu'une composition riche en légumineuses ne peut être atteinte qu'en réduisant la fertilisation azotée, on peut estimer un **bénéfice** de cette sous-action, lié à l'économie d'engrais utilisé et à la réduction d'un passage pour l'apport d'engrais sur les prairies ayant moins de 20% de légumineuses.

### • Estimations des coûts/bénéfices

Les hypothèses énoncées ci-dessus conduisent à une estimation du volume d'engrais minéral appliqué de 82 980 MgNmin/an. En supposant un coût unitaire de 0,911 €/Mg, le bénéfice lié à l'économie d'engrais est, à l'échelle annuelle et française, de 75,6 M€, soit un gain unitaire de 26,8 €/ha de prairie concernée par l'action.

Sur les 2,07 Mha de légumineuses composées de moins de 20% de légumineuses, on peut considérer que la réduction de 35 uN/ha va conduire à une économie d'un apport d'azote en moyenne. Avec un coût par passage estimé à 6,43 €/ha (barème entraide région Centre – Ile-de-France 2010), le bénéfice à l'échelle française est alors de 13,3 M€.

Le **coût** total de l'action peut donc être estimé à **-88,9 M€** (gain).

### • Autres coûts (coûts de transaction privés, publics)

Cette action nécessite, là aussi, un apprentissage de la part des agriculteurs pour maîtriser la composition de la prairie et sa stabilisation dans le temps, et l'acquisition de compétences de la part des conseillers. La suppression d'un apport d'N étant proposée, on devrait attendre également un gain en temps de travail, non chiffré actuellement dans le coût unitaire. Cependant, la composition plus variable du fourrage récolté induira certainement un raisonnement plus fin des compléments alimentaires à fournir aux animaux. Nous n'avons pas chiffré l'achat de semences pour le mélange, car nous avons considéré que les plantes de légumineuses remplaceraient une partie des plantes de graminées, et donc que la variation du coût était négligeable.

### • Conclusions : coût unitaire de la sous-action, coût annuel pour l'AMT (ou le % atteint) en 2030 et coût cumulé sur la période 2010-2030

Le coût unitaire, en 2030, est donc de - 31,5 €/ha de prairies concernée (gain de 88,9 M€ / 2,8Mha concernés).

Le coût annuel en 2030 est de - 88,9 M€ (gain).

Le coût cumulé sur la période 2010-2030 est de - 1 288,9 M€ (bénéfice).

## 5.2.e. Synthèse : récapitulatif de l'atténuation escomptée, du coût, et du coût de la tonne de CO<sub>2</sub>e évité

En regroupant les prairies concernées (avec plus de 20% de légumineuses, et avec 20% à 40% de légumineuses), l'**atténuation unitaire** peut être estimée à 284 kgCO<sub>2</sub>e/ha/an (170 kgCO<sub>2</sub>e/ha/an avec le calcul "expert") pour les émissions directes et indirectes liées à l'exploitation agricole, et à 156 kgCO<sub>2</sub>e/ha/an d'émissions induites en amont, soit au total, **440 kgCO<sub>2</sub>e/ha/an (326 kgCO<sub>2</sub>e/ha/an avec le calcul "expert")**.

En appliquant cette atténuation sur l'assiette maximale technique, l'**atténuation annuelle** est de 0,8 TgCO<sub>2</sub>e/an (0,48 TgCO<sub>2</sub>e/an avec le calcul "expert") pour les émissions directes et indirectes liées à l'exploitation agricole, et de 0,44 TgCO<sub>2</sub>e/an pour les émissions induites en amont, donc au total **1,24 TgCO<sub>2</sub>e/an (0,92 TgCO<sub>2</sub>e/an avec le calcul "expert")**.

L'**atténuation cumulée** sur la période 2010-2030 est estimée à 11,6 TgCO<sub>2</sub>e (méthode "CITEPA") et 6,9 TgCO<sub>2</sub>e (calcul "expert") pour les émissions directes et indirectes et à 6,4 TgCO<sub>2</sub>e (méthode "CITEPA" et calcul "expert") pour les émissions amont.

Le **bénéfice unitaire** de cette sous-action est de **31,5 €/ha** de prairie concernée. Le bénéfice total est estimé à 88,9 M€.

Le **bénéfice de la tonne de CO<sub>2</sub> évité** est de **-185 €/MgCO<sub>2</sub>e** (méthode "expert").

## 6. Synthèse : potentiel d'atténuation et coût annuels et cumulés pour l'ensemble de l'action

Le Tableau 4 reprend l'ensemble des estimations détaillées ci-dessus.

**Tableau 4.** Récapitulatif des estimations d'atténuation d'émissions et de coûts pour les deux sous-actions envisagées, et leur cumul

			<b>Sous-action 1 :</b> Légumineuses à graines	<b>Sous-action 2 :</b> Prairies temporaires avec légumineuses	<b>Total des 2 sous-actions</b>
<b>Assiette Technique Maximale (ha)</b>			1 274 900 ha (dont 397 100 ha déjà réalisés)	3 143 100 ha (dont 320 600 ha déjà réalisés)	4 418 000 ha (dont 717 700 ha déjà réalisés)
<b>Potentiel d'atténuation (MgCO<sub>2</sub>e/an)</b>	Em. directes et indirectes :	"CITEPA" "expert"	470 500 916 300	801 800 479 500	1 272 300 1 395 800
	Emissions amont		831 400	441 000	1 272 400
	<b>Total :</b>	"CITEPA" "expert"	<b>1 747 700</b>	<b>920 500</b>	<b>2 668 200</b>
<b>Atténuation cumulée (MgCO<sub>2</sub>e)</b>	Em. directes et indirectes :	"CITEPA" "expert"	7 583 300 14 770 000	11 623 800 6 952 000	19 207 100 21 722 000
	Emissions amont		13 400 900	6 393 700	19 794 600
	<b>Total :</b>	"CITEPA" "expert"	<b>28 170 900</b>	<b>13 345 800</b>	<b>41 516 700</b>
<b>Coûts annuels (€/an)</b>			<b>16 991 900</b>	<b>- 88 903 600</b>	<b>- 71 911 700</b>
<b>Coûts cumulés (€)</b>			<b>273 880 800</b>	<b>- 1 288 872 800</b>	<b>- 1 014 992 000</b>
<b>Coût unitaire (€/ha de légumineuses introduites)</b>			<b>19,36</b>	<b>- 31,50</b>	<b>-274,30</b>
<b>Coût d'atténuation (€/MgCO<sub>2</sub>e)</b>			<b>18,54</b>	<b>- 185</b>	<b>- 52</b>

## 7. Discussion

L'estimation d'accroissement des surfaces en légumineuses à graines (4,5% des terres arables) proposée dans cette étude peut apparaître élevée compte tenu de la faible propension des agriculteurs français vis-à-vis de cette culture. Cependant, elle est faible par rapport au taux de présence des légumineuses au sein des terres arables de certains pays tiers (13% au Canada, 32% aux Etats-Unis). Elle ne semble donc pas trop ambitieuse. De même, un fort accroissement des surfaces en prairies temporaires aurait pu apparaître comme une option intéressante et efficace pour l'objectif de réduction des GES en France, mais elle sortait du cadre de l'étude, car elle induisait des changements trop importants sur les systèmes agricoles français.

En comparaison des autres études synthétisées dans le Tableau 1, les atténuations unitaires que nous avons calculées sont dans la gamme basse des estimations des autres études pour ce qui concerne les prairies et dans la gamme moyenne pour les légumineuses à graines.

Bien que les atténuations d'émissions soient élevées pour ces deux sous-actions, et que le bilan économique soit positif, les agriculteurs ne mettent pas en application ces techniques. Une récente étude (Meynard et al., 2013), centrée sur les freins et leviers à la diversification des cultures, a montré la multitude des freins expliquant la faible surface en légumineuses à graines aujourd'hui en France, et les liens étroits qu'ils avaient entre eux, conduisant à un véritable verrouillage du système socio-technique actuel limitant l'évolution de ces surfaces. Ces causes ont d'ailleurs été rapportées et partagées lors du colloque organisé par le GIS-BV, l'UNIP-PROLEA et le GIS GCHP2E "Comment relancer la production et l'utilisation de protéines végétales françaises à partir de protéagineux et de soja ?".

Même si, dans les détails, les raisons sont certainement différentes, l'existence d'un système verrouillé autour d'un système dominant, basé sur une alimentation animale composée de tourteaux de soja importés, se retrouve pour expliquer les relativement faibles surfaces en prairies.

Cette analyse montre également que les leviers pour favoriser l'évolution souhaitée devront être simultanément de plusieurs natures, ce qui rend plus complexe et plus difficile cette évolution. C'est pourquoi il paraît clair que l'évolution des surfaces de grandes cultures et de prairies temporaires vers plus de légumineuses nécessite des incitations publiques significatives, stables et pérennes.

## 7.a. Sensibilité des résultats

### Pour la sous-action "Légumineuses à graines"

Comme nous l'avons montré en explorant trois hypothèses différentes de substitution des légumineuses à graines (H1 = remplacement des surfaces en blé pour 1/6, en colza pour 1/6 et en orge pour 2/3 ; H2 = colza 1/3 et orge 2/3 ; H3 = orge 100%), les résultats sont très sensibles à ces hypothèses. Or il est particulièrement difficile d'anticiper les substitutions de cultures et il est probable que, si les surfaces de légumineuses à graines se développaient à hauteur de ce qui est imaginé ici, les réductions de surfaces des autres cultures ne correspondraient à aucune de ces trois hypothèses, les ajustements se faisant également en fonction des caractéristiques du marché des autres cultures potentiellement substituables. Néanmoins, ces hypothèses permettent d'estimer des fourchettes très larges d'atténuation et de coût (Tableau 5).

**Tableau 5.** Récapitulatif des estimations d'atténuation d'émissions et de coûts pour la sous-action "Légumineuses à graines", en fonction de l'hypothèse de substitution envisagée

			H1 : substitution des surfaces en blé pour 1/6, en colza pour 1/6 et en orge pour 2/3	H2 : substitution des surfaces en blé pour 0, en colza pour 1/3 et en orge pour 2/3	H3 : substitution des surfaces en orge pour 100%
<b>Potentiel d'atténuation</b> (MgCO <sub>2e</sub> /an)	Em. directes et indirectes :	"CITEPA" "expert"	470 500 913 600	437 200 897 300	325 100 820 100
	Emissions amont		825 700	799 400	745 100
	<b>Total :</b>	"CITEPA" "expert"	<b>1 296 000</b> <b>1 739 300</b>	<b>1 236 600</b> <b>1 696 700</b>	<b>1 070 100</b> <b>1 565 200</b>
	<b>Atténuation cumulée</b> (MgCO <sub>2e</sub> )	Em. directes et indirectes :	"CITEPA" "expert"	7 583 300 14 726 100	7 047 500 14 462 900
	Emissions amont		13 308 500	12 885 301	12 009 600
	<b>Total :</b>	"CITEPA" "expert"	<b>20 891 800</b> <b>28 034 600</b>	<b>19 932 800</b> <b>27 348 204</b>	<b>17 249 000</b> <b>25 228 300</b>
<b>Coûts annuels (€/an)</b>			<b>16 991 900</b>	<b>- 16 375 000</b>	<b>- 63 162 400</b>
<b>Coûts cumulés (€)</b>			<b>273 880 800</b>	<b>- 263 938 400</b>	<b>- 1 018 074 700</b>
<b>Coût unitaire (€/ha de légumineuses)</b>			<b>19.36</b>	<b>- 18.65</b>	<b>- 71.95</b>
<b>Coût d'atténuation (€/MgCO<sub>2e</sub>)</b>			<b>18.60</b>	<b>- 18.25</b>	<b>- 77.02</b>

Plusieurs hypothèses, faites pour le calcul des émissions, sont sujettes à controverses. Une fourchette des émissions a donc été calculée en faisant varier certains paramètres de calcul. Ainsi, une fourchette haute a été estimée sur la base des hypothèses suivantes :

- introduction d'une légumineuse 1 an sur 5 (au lieu de 1an/6), conduisant à 20% la proportion de la surface en grandes cultures cultivée en légumineuses ;
- utilisation d'une partie des sols séchant et caillouteux exclus de l'assiette : on considère que, grâce à l'irrigation et grâce à la tolérance de certaines légumineuses (par ex la féverole) vis-à-vis des sols à cailloux, une partie de la surface concernée peut être mobilisée. Ainsi, on propose de récupérer 20% des 39% de sols exclus précédemment, faisant passer de 61% à 69% la proportion de la surface en grandes cultures éligible pour être cultivée en légumineuses ;
- les paramètres de consommation de carburant pour l'épandage (3,3 au lieu de 0,7 l/ha) et le labour (36 au lieu de 13,4 l/ha) ont été modifiés, suite à un paramétrage conseillé par Arvalis.

La fourchette basse a été calculée sur la base d'hypothèses inverses :

- on garde le délai de retour d'une légumineuse de 1an/6 ;
- on réduit l'utilisation des sols à ceux qui ont une RU supérieure à 150 mm, tablant sur le fait que les légumineuses sont très sensibles aux stress hydriques, ce qui amène à 34% la proportion de la SAU Grandes cultures utilisable par les légumineuses ;
- on conserve le paramétrage initial de consommation de carburant (0,7 et 13,4 l/ha pour respectivement un épandage et un labour).

Pour ces deux fourchettes, nous avons gardé l'hypothèse H1 de substitution. Les nouvelles estimations conduisent aux valeurs d'atténuation et de coût indiquées dans le Tableau 6.

**Tableau 6.** Fourchettes pour les estimations d'atténuation d'émissions et de coûts pour la sous-action "Légumineuses à graines", en fonction des nouvelles hypothèses de calcul détaillées ci-dessus

			<b>Sous-action 1 "Légumineuses à graines"</b>		
			Fourchette haute	Valeur moyenne	Fourchette basse
<b>Potentiel d'atténuation</b> (MgCO <sub>2</sub> e/an)	Em. directes et indirectes :	"CITEPA" "expert"	772 400 1 443 900	470 500 913 600	168 000 326 300
	Emissions amont		1 251 000	825 700	294 900
	<b>Total :</b>	"CITEPA" "expert"	<b>2 023 400</b> <b>2 694 800</b>	<b>1 296 000</b> <b>1 739 300</b>	<b>462 900</b> <b>621 200</b>
<b>Atténuation cumulée</b> (MgCO <sub>2</sub> e)	Em. directes et indirectes :	"CITEPA" "expert"	12 450 400 23 272 700	7 583 300 14 726 100	2 708 300 5 259 300
	Emissions amont		20 163 900	13 308 500	4 753 000
	<b>Total :</b>	"CITEPA" "expert"	<b>32 614 300</b> <b>43 436 600</b>	<b>20 891 800</b> <b>28 034 600</b>	<b>7 461 300</b> <b>10 012 300</b>
<b>Coûts annuels (€/an)</b>			<b>25 744 600</b>	<b>16 991 900</b>	<b>6 068 500</b>
<b>Coûts cumulés (€)</b>			<b>414 960 581</b>	<b>273 880 800</b>	<b>97 814 200</b>
<b>Coût unitaire (€/ha de légumineuses)</b>			<b>19.36</b>	<b>19.36</b>	<b>19.36</b>
<b>Coût d'atténuation (€/MgCO<sub>2</sub>e)</b>			<b>17.83</b>	<b>18.60</b>	<b>18.60</b>

Pour la sous-action "Légumineuses dans les prairies temporaires", plusieurs hypothèses peuvent également être discutées pour les calculs des fourchettes hautes et basses, dont les résultats sont présentés Tableau 7 :

Fourchette haute :

- le paramètre de consommation de carburant pour l'épandage (3,3 au lieu de 0,7 l/ha) a été modifié, suite à un paramétrage conseillé par Arvalis ;
- on retient une suppression totale de la fertilisation azotée minérale sur les prairies ayant une forte proportion de légumineuses, donc suppression de 66 uN/ha sur les prairies à plus de 20% de légumineuses, de 45 uN/ha sur les prairies entre 20 et 40% de légumineuses, et de 31 uN/ha sur les prairies de plus de 40% de légumineuses. Cela conduit à une économie de 170 479 tN/an à l'échelle de la France.  
Dans cette hypothèse, il est possible qu'une faible réduction de la production existe, mais elle est difficile à estimer, faute de références, et nous ne la prendrons pas en compte.

Fourchette basse :

- les surfaces concernées correspondent uniquement aux surfaces de prairies composées actuellement de moins de 20% de légumineuses, soit une assiette maximale de 2 069 754 ha (au lieu de 2 822 534 ha dans l'hypothèse moyenne),
- on maintient une réduction de 35 uN/ha de fertilisation azotée sur ces surfaces.

**Tableau 7.** Fourchettes pour les estimations d'abattement d'émissions et de coûts pour la sous-action "Légumineuses prairiales", en fonction des nouvelles hypothèses de calcul détaillées ci-dessus

			<b>Sous-action 2 "Prairies temporaires avec légumineuses"</b>		
			Fourchette haute	Valeur moyenne	Fourchette basse
<b>Potentiel d'atténuation</b> (MgCO <sub>2</sub> e/an)	Em. directes et indirectes :	"CITEPA" "expert"	1 657 400 995 400	801 784 479 537	700 400 419 100
	Emissions amont		908 200	440 826	385 100
	<b>Total :</b>	"CITEPA" "expert"	<b>1 903 600</b>	<b>920 362</b>	<b>804 200</b>
<b>Atténuation cumulée</b> (MgCO <sub>2</sub> e)	Em. directes et indirectes :	"CITEPA" "expert"	24 028 500 14 430 620	11 623 802 6 952 045	10 154 600 6 076 200
	Emissions amont		13 167 100	6 390 845	5 583 200
	<b>Total :</b>	"CITEPA" "expert"	<b>27 597 700</b>	<b>13 342 890</b>	<b>11 659 400</b>
<b>Coûts annuels (€/an)</b>			<b>- 168 614 770</b>	<b>- 88 903 578</b>	<b>- 79 302 600</b>
<b>Coûts cumulés (€)</b>			<b>- 2 444 479 700</b>	<b>- 1 288 872 826</b>	<b>- 1 149 683 600</b>
<b>Coût unitaire (€/ha de légumineuses)</b>			<b>- 59.74</b>	<b>- 31,50</b>	<b>- 38.32</b>
<b>Coût d'atténuation (€/MgCO<sub>2</sub>e)</b>			<b>- 169</b>	<b>- 185</b>	<b>- 189</b>

Par ailleurs, les résultats sont également sensibles à la ligne de base qui a été choisie. Les surfaces en légumineuses à graines, choisies comme ligne de base, correspondent aux surfaces 2010, qui avaient connu un léger sursaut lié à une prime spécifique accordée cette année-là. Depuis, les surfaces ont à nouveau régressé et se situent autour de 100 000 ha. Sans changer les surfaces objectifs à l'horizon 2030, l'assiette, et donc le potentiel d'atténuation, seraient donc sensiblement accrus. De même, il avait été envisagé de baser les calculs sur les données de pratiques culturales de l'enquête 2011, dont les résultats n'ont pas été disponibles à temps. Il est probable que leur utilisation modifie, mais sans doute à la marge, les résultats présentés dans cette étude.

Les coûts estimés sont sensibles aux variations des prix des intrants et des produits récoltés, les marges utilisées étant celles de l'année 2010. Les coûts globaux sont également sensibles aux hypothèses de substitution testées (Tableau 5). Enfin, ces coûts pourront également être modifiés en fonction de la prime spécifique aux protéagineux : si une telle prime était maintenue/supprimée, les coûts s'en trouveraient modifiés. Celle-ci n'a, pour l'instant, pas été prise en compte dans les calculs.

## 7.b. Les conditions d'une prise en compte de l'action dans l'inventaire national

### • Comptabilisation de l'effet

Jusqu'en 2006, les calculs d'émissions selon la méthode officielle du GIEC considéraient la fixation symbiotique comme une source potentielle d'émissions de N<sub>2</sub>O au même titre que la fertilisation azotée appliquée sur les cultures. Les dernières recommandations du GIEC en 2006 ont entériné l'évolution des connaissances et préconisent de ne plus prendre en compte la fixation symbiotique d'azote dans le calcul des émissions de N<sub>2</sub>O.

### • Vérifiabilité de la mise en œuvre

Concernant l'introduction de légumineuses à graines, la mise en œuvre des pratiques pourrait être estimée à l'aide de la statistique agricole annuelle et de l'enquête "Pratiques culturales" (surfaces, doses de fertilisants appliquées...), mais aussi à partir des déclarations d'aides (PAC) concernant les surfaces des cultures. En revanche, l'introduction de légumineuses en prairies est difficile à estimer, notamment pour les mélanges, et pourrait nécessiter des observations *in situ*.

## 7.c. Les contextes et mesures susceptibles de favoriser le déploiement de l'action

Les surfaces en légumineuses à graines ont beaucoup varié : très faibles au début des années 1970, elles ont atteint un pic en 1993, dépassant 720 000 ha, puis ont rechuté, pour passer par un minimum en 2009 où elles avoisinaient les 203 000 ha. Ces fluctuations apparaissent liées : en premier lieu aux évolutions relatives des prix des autres matières premières (blé et tourteau de soja) en concurrence avec les protéagineux pour la fabrication d'aliments du bétail, et aux rapports de prix entre les différentes grandes cultures ; depuis la PAC 1992, plus ponctuellement à des aides intermittentes à la culture ; dans une moindre mesure, à l'expansion d'*Aphanomyces* (favorisée par le non-respect des délais de retour de la culture sur une même parcelle et par des conditions hydriques de sol défavorables), et à la forte sensibilité de ces cultures aux stress abiotiques.

Cette importante variabilité de leurs rendements n'est, de plus, pas toujours clairement expliquée par les agriculteurs ou leurs conseillers, ce qui ne permet pas toujours de progresser dans la conduite de cette culture et décourage les producteurs. Il faudrait certainement envisager de mieux former les techniciens (de Chambres d'agriculture et de coopératives) qui connaissent souvent mal ces cultures, du fait de leur faible surface.

Au-delà de ces facteurs techniques et économiques, de nombreux autres facteurs, touchant l'ensemble des acteurs de la filière, convergent pour limiter l'intérêt des cultures de légumineuses à graines chez les agriculteurs, les organismes collecteurs, et l'ensemble de la filière. Une étude récente<sup>1</sup> a souligné l'importance de la question des débouchés, en alimentation animale notamment : les fabricants d'aliments du bétail sont prêts à utiliser le pois comme matière première à condition que les volumes d'offre soient très élevés et regroupés à proximité des usines de fabrication des aliments, ce qui n'est pas le cas aujourd'hui, avec une offre faible et dispersée géographiquement.

Les légumineuses à graines ont fait l'objet de soutiens publics en 2010, ce qui avait permis une petite augmentation de la surface (passée de 203 000 ha en 2009 à 397 000 ha en 2010, puis revenue à 278 000 ha en 2011). De même, une envolée des prix des engrais azotés de synthèse tend à être favorable aux légumineuses. Le caractère non prévisible et non pérenne

---

<sup>1</sup> Meynard et al., 2013. *Freins et leviers à la diversification des cultures. Etude au niveau des exploitations agricoles et des filières*. Synthèse du rapport d'étude, INRA.

de ces soutiens ou de ces effets n'est cependant pas favorable au maintien de cette culture. A noter qu'un Plan "Protéines végétales" a été annoncé début 2013.

L'augmentation de la proportion de légumineuses dans **les prairies temporaires** ne pose pas les mêmes difficultés. Elle requiert surtout un changement d'habitude (et de conseil probablement) de la part des agriculteurs. Gérer une prairie de graminées avec des intrants de synthèse est plus facile et moins risqué que gérer l'équilibre entre deux espèces au sein d'un même peuplement. La suppression des apports d'azote devrait pourtant générer un gain en temps de travail. Cependant, la composition plus variable du fourrage récolté nécessitera certainement un raisonnement plus fin des compléments alimentaires à fournir aux animaux. De telles pratiques existent déjà et pourraient être développées.

#### 7.d. Vulnérabilité et adaptabilité de l'action au changement climatique

Les légumineuses à graines étant particulièrement sensibles aux stress abiotiques, le changement climatique pourrait induire une baisse de leur productivité et une augmentation de son instabilité, avec des répercussions négatives sur les surfaces cultivées, sur l'atténuation potentielle et sur les coûts estimés.

Inversement, le risque d'une raréfaction en eau pour l'irrigation pourrait conduire à une diminution des surfaces en cultures d'été, fortement consommatrices en eau, au profit de cultures plus sobres, dont les légumineuses.

#### 7.e. Interactions entre sous-actions et avec les autres actions

Les deux sous-actions étudiées sont totalement disjointes, puisqu'elles ne concernent pas les mêmes surfaces : surfaces en grandes cultures pour la sous-action 1, et surfaces en prairies pour la sous-action 2. On peut donc *a priori* additionner les effets attendus en termes d'atténuation et les coûts induits.

Ces actions sont susceptibles d'interagir avec l'**Action 1** visant une réduction de l'utilisation des engrais (la fertilisation azotée étant déjà modifiée par l'introduction de légumineuses dans les rotations), et avec l'**Action 5** "Agroforesterie" (l'insertion de surfaces arborées réduira de fait l'assiette maximale pour l'introduction de légumineuses).

De même, l'**Action 7** "Lipides et additifs", par les besoins en surfaces cultivées en oléagineux, pourra modifier l'assiette maximale technique de l'Action "Légumineuses".

Une interaction avec la sous-action "Durée de vie de la prairie" de l'**Action 6** peut également être attendue, puisqu'une composition de la prairie, non conforme à ce qui est attendu, pourrait induire des retournements plus précoces.

Enfin, une interaction avec l'**Action 8** portant sur l'alimentation azotée des animaux est également attendue, puisque l'introduction de légumineuses dans les prairies va modifier la composition des fourrages ingérés, et donc la composition des compléments alimentaires à fournir aux animaux.

#### 7.f. Autres effets attendus de l'action, synergies/antagonismes avec l'adaptation au changement climatique et avec d'autres objectifs de politique publique

Les cultures de légumineuses à graines sont particulièrement sensibles aux stress abiotiques. Le changement climatique pourrait donc induire une baisse de leur productivité, avec des répercussions négatives sur l'atténuation potentielle et sur les coûts estimés, et des répercussions négatives sur les surfaces cultivées en légumineuses à graines, si des progrès dans la sélection ne sont pas réalisés pour cette adaptation.

En revanche, l'insertion de légumineuses dans les rotations a des impacts environnementaux bénéfiques en termes de réduction de l'usage de produits phytosanitaires à l'échelle de l'assolement, qui vont dans le sens visé par le plan Ecophyto 2018, grâce à la diversification des cultures introduites. Il est important de remarquer, par exemple, que parmi les systèmes de culture économes et performants, en grande culture, repérés dans la phase Test de l'étude Ecophyto (Dumas et al., 2012), nombreux étaient ceux qui comprenaient une culture de légumineuse. De même, dans le projet CasDAR "Grande culture économe", la conception de systèmes de culture moins sensibles aux bioagresseurs, moins dépendants des intrants de synthèse, et accroissant leur autonomie et leur valeur ajoutée a conduit plusieurs groupes d'agriculteurs à définir un cahier des charges dans lequel les systèmes devaient inclure 15% de légumineuses (Schaller, 2012). Le remplacement de cultures d'été, très consommatrices en eau, par une légumineuse, même de printemps, réduit également la consommation d'eau. La culture de légumineuses permet de réduire significativement la consommation d'énergie fossile, et d'accroître la biodiversité. Enfin, l'insertion de légumineuses à graines est également une mesure fréquente lors de la contractualisation d'une MAE à objectif de réduction d'usage de l'azote minéral.

## 8. Conclusions

L'action étudiée ici visait à estimer le potentiel d'atténuation et les coûts associés de l'introduction d'une plus grande quantité de légumineuses dans les systèmes de culture en France, soit en grandes cultures (sous-action 1), soit dans les prairies temporaires (sous-action 2). Le principal effet de ces espèces sur les émissions de gaz à effet de serre (principalement le N<sub>2</sub>O) est lié à leur capacité à fixer l'azote atmosphérique, supprimant ainsi la fertilisation azotée qui leur est appliquée lorsqu'elles sont cultivées en pures, la réduisant lorsqu'elles sont associées à d'autres espèces (cas des prairies temporaires associées graminées-légumineuses), et réduisant la fertilisation azotée des cultures suivantes de manière significative. Toutes les émissions, directes et indirectes liées à cette capacité, représentent donc un potentiel de réduction non négligeable.

Selon les hypothèses de calcul retenues, l'introduction d'une légumineuse à graines 1 an sur 6 dans les assolements de grandes cultures permettrait de réduire de **1,7 TgCO<sub>2</sub>e/an** les émissions. Grâce aux effets 'précédent' de ces espèces, le **coût économique** associé serait de **19,36 €/ha**, et le coût d'atténuation de **18,60 €/MgCO<sub>2</sub>e**. Dans les prairies temporaires, l'introduction et le maintien d'une proportion de légumineuses supérieure à 40% permettrait de réduire de **0,9 TgCO<sub>2</sub>e/an** les émissions, avec un **gain économique** associé de **31,50 €/ha**, et un coût d'atténuation de **-185 €/MgCO<sub>2</sub>e**.

Ces estimations sont cependant très sensibles aux hypothèses de substitution de cultures, et au paramétrage retenu pour les calculs, comme le montrent les fourchettes larges estimées pour la sous-action "Légumineuses à graines" en particulier.

L'introduction de légumineuses, à graines ou en prairies temporaires, dans la surface de grandes cultures et de légumineuses fourragères en France constitue ainsi un levier important pour réduire les émissions de GES, avec un bénéfice économique, principalement lié à la prise en compte des effets 'précédent' des légumineuses dans la conduite et l'estimation des performances des cultures suivantes, effets rarement pris en compte dans les études économiques jusqu'à présent, et encore pas suffisamment valorisés par les praticiens.

L'évolution récente des surfaces en légumineuses, nettement à la baisse malgré les nombreux et divers bénéfices environnementaux démontrés de l'introduction de ces espèces comme contributrices à la diversification des cultures, laisse penser que les changements envisagés ne pourront se faire que grâce à des incitations politiques fortes et pérennes, et à une évolution notable à différents maillons de la filière.

## Références bibliographiques citées

- Bouwman A.F., 1996. Direct emission of nitrous oxide from agricultural soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 46: 53–70.
- Carrouée B., Bourgerais E. and Aveline A., 2006. Nitrate leaching related to dry pea in arable crop rotations. In: *Grain legumes and the environment: how to assess benefits and impacts?*, 18–19 November 2004, Agroscope FAL Reckenholz, Zurich, Switzerland, (Ed. AEP-Paris), 117-124.
- Carrouée B., Schneider A., Flénet F., Jeuffroy M.H., Nemecek T., 2012. Introduction du pois protéagineux dans des rotations à base de céréales à paille et colza : impacts sur les performances économiques et environnementales. *Innovations Agronomiques*, 25, 125-142.
- Commissariat Général du Développement Durable (CGDD), 2009. La relance des légumineuses dans le cadre d'un plan protéines : quels bénéfices environnementaux ? *Etudes et Documents N° 15*, 44p.
- Dumas M., Moraine M., Reau R., Petit M.S., 2012. FERME 2010, Produire des ressources pour l'action à partir de l'analyse de systèmes de culture économes en produits phytosanitaires mis au point par les agriculteurs dans leurs exploitations. TOME I METHODE & RESULTATS. 154 p.
- Eagle A.J., Olander L.P., Henry L.R., Haugen-Kozyra K., Millar N., Robertson G.P., 2012. Greenhouse gas mitigation potential of agricultural land management in the United States, a synthesis of the literature. Technical working group on Agricultural Greenhouse Gases (T-AGG), 76 p.
- Fuhrer J., 2004. Environmental aspects of nitrogen cycle in legume-based cropping systems. In: *Grain legumes and the environment: how to assess benefits and impacts?* 18–19 November 2004, Agroscope FAL Reckenholz, Zurich Switzerland (Ed. AEP), 85-91.
- Goglio P., 2013. A LCA approach of environmental impacts of cropping systems with an agroecosystem model. PhD thesis, AgroParisTech,
- Haugaard-Nielsen H., Ambus P., Jensen E.S., 2003. The comparison of nitrogen use and leaching in sole cropped versus intercropped pea and barley. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 65, 289-300.
- Haugaard-Nielsen H., Gooding M., Ambus P., Corre-Hellou G., Crozat Y., Dahlmann C., Dibet A., von Fragstein P., Pristeri A., Monti M., Jensen E.S., 2009. Pea–barley intercropping for efficient symbiotic N<sub>2</sub>-fixation, soil N acquisition and use of other nutrients in European organic cropping systems. *Field Crop Res* 113:64–71.
- Hénault C., Revellin C., 2011. Inoculants de légumineuses pour mitigating soil emissions of the greenhouse gas nitrous oxide. *Plant Soil*, DOI 10.1007/s11104-011-0820-0
- Hunter H., Lafond G., Lemke R.L., Lupwayi N., 2007. The impact of grain legumes in no-till cropping systems on nitrous oxide emissions.
- IPCC, 1999. N<sub>2</sub>O: Direct Emissions from Agricultural Soils. In: *Background Papers: IPCC Expert Meetings on Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories*. 361–380.
- IPCC, 2006. Agriculture, Forestry and Other Land Use, Volume 4. In: *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Japan: Institute for Global Environmental Strategies.
- Jensen E. S., Haugaard-Nielsen H., Aveline A. and Crozat Y., 2004. Grain legumes and nitrate leaching: significance and prevention. In: 5th Eur. Conf. on Grain Legumes, 7–11 June 2004, Dijon (France), 63–64. AEP, Paris, France.
- Jensen E.S., Peoples M., Boddley R.M., Gresshoff P.M., Haugaard-Nielsen H., Alves B.J.R., Morrison M.J., 2012. Legumes for mitigation of climate change and the provision of feedstock for biofuels and biorefineries. A review. *Agron. Sustain. Dev.*, 32, 329-364.
- Jeuffroy MH, Baranger E, Carrouée B, de Chezelles E, Gosme M, Hénault C, Schneider A, and Cellier P, 2013. Nitrous oxide emissions from crop rotations including wheat, rapeseed and dry peas. *Biogeosciences*, 10, 1–11, doi:10.5194/bg-10-1-2013
- Lemke R.L., Zhong Z., Campbell C.A., Zentner R., 2007. Can pulse crops play a role in mitigating greenhouse gases from North American agriculture? *Agron J*, 99:1719–1725.
- Meynard J.M., Messéan A., Charlier A., Charrier F., Farès M., Le Bail M., Magrini M.B., Savini I., 2013. Freins et leviers à la diversification des cultures. Etude au niveau des exploitations agricoles et des filières. Synthèse du rapport d'étude, INRA, 52 p.
- Moussart A., Even M.N., Tivoli B., 2008. Reaction of genotypes from several species of grain and forage legumes to infection with a french pea isolate of the oomycete *Aphanomyces euteiches*. *Eur. J.Plant Pathol.*, 122, 321-333.
- Munier-Jolain N., Carrouée B., 2003. Quelle place pour le pois dans une agriculture respectueuse de l'environnement - Argumentaire agri-environnemental. *Cahiers d'études et de recherches francophones / Agricoles*, 12 (2), 111-120.
- Nature Québec, 2009. Module 1, Des pratiques agricoles ciblées pour la lutte aux changements climatiques. Document réalisé dans le cadre du projet Agriculture et climat : vers des fermes 0 carbone. 44 pages.
- Nemecek T., von Richthofen J-S., Dubois G., Casta P., Charles R., Pahl H., 2008. Environmental impacts of introducing grain legumes into European crop rotations. *Europ. J. Agronomy* 28, 380-393.
- Parkin T.B., Kaspar T.C., 2006. Nitrous oxide emissions from corn– soybean systems in the Midwest. *J Environ Qual* 35:1496–1506.
- Philibert A., Loyce C., Makowski D., 2012. Quantifying Uncertainties in N<sub>2</sub>O Emission Due to N Fertilizer Application in Cultivated Areas. *PLoS ONE* 7(11): e50950. doi:10.1371/journal.pone.0050950
- Rochette P., Janzen H., 2005. Towards a revised coefficient for estimating N<sub>2</sub>O emissions from legumes. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 73, 171–179, 2005.
- 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*, 17, 301-311.
- Schaller N., 2012. Vers une mesure agro-environnementale « systèmes de culture économes en intrants ». *Analyse N°53*. Centre d'études et de prospective.
- Solagro 2003. 12 propositions pour lutter contre le changement climatique dans le secteur de l'agriculture, 45p.
- Thomsen I.K., Kjellerup V., Christensen B.T., 2001. Leaching and plant offtake of N in field pea/cereal cropping sequences with incorporation of 15N-labelled pea harvest residues. *Soil Use and Management*, 17, 209-216.
- Zhong Z., Nelson L.M., Lemke R.L., 2011. Nitrous oxide emissions from grain legumes as affected by wetting/drying cycles and crop residues. *Biology and Fertility of soils*, 47, 687-699.
- IPCC (2001) *Climate Change 2001: The Scientific Basis: Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the IPCC*. Cambridge: Cambridge University Press. 881p.

- Mosier A, Kroeze C, Nevison C, Oenema O, Seitzinger S, et al. (1998) Closing the global atmospheric N<sub>2</sub>O budget: nitrous oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle; OECD/IPCC/IEA Phase II Development of IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 52: 225–248.
- Davidson EA (2009) The contribution of manure and fertilizer nitrogen to atmospheric nitrous oxide since 1860. *Nature Geoscience* 2: 659–662.
- Snyder CS, Bruulsema TW, Jensen TL, Fixen PE (2009) Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 133: 247–266.