



HAL
open science

Biens produits par l'écosystème

Olivier Therond, Muriel Tichit, Anaïs Tibi, Francesco Accatino, Luc Biju-duval, Christian Bockstaller, David Bohan, Thierry Bonaudo, Maryline Boval, Eric Cahuzac, et al.

► **To cite this version:**

Olivier Therond, Muriel Tichit, Anaïs Tibi, Francesco Accatino, Luc Biju-duval, et al.. Biens produits par l'écosystème. DEPE; Etude_9-EFESE-Agri. Partie III Chapitre 10. 2017. hal-02791226

HAL Id: hal-02791226

<https://hal.inrae.fr/hal-02791226v1>

Submitted on 5 Jun 2020

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License



VOLET "ÉCOSYSTEMES AGRICOLES" DE L'ÉVALUATION FRANÇAISE DES ÉCOSYSTÈMES ET DES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES (EFESE)

RAPPORT SCIENTIFIQUE DE L'ÉTUDE RÉALISÉE PAR L'INRA - NOVEMBRE 2017

Partie 3 - Chapitre 10. Biens produits par l'écosystème (p693-894)

Responsables scientifiques :

Olivier Therond – Inra, Laboratoire Agronomie et Environnement

Muriel Tichit – Inra, Sciences pour l'Action et le Développement : Activités, Produits, Territoires

Coordinatrice :

Anaïs Tibi – Inra, Délégation à l'Expertise scientifique, à la Prospective et aux Etudes

Directeur de la publication :

Bertrand Schmitt - Inra, Directeur de la Délégation à l'Expertise scientifique, à la Prospective et aux Etudes

Contacts :

Olivier Therond : olivier.therond@inra.fr

Anaïs Tibi : anaïs.tibi@inra.fr

Muriel Tichit : muriel.tichit@agroparistech.fr

Pour citer ce document :

Therond O. (coord.), Tichit M. (coord.), Tibi A. (coord.), Accatino F., Biju-Duval L., Bockstaller C., Bohan D., Bonaudo T., Boval M., Cahuzac E., Casellas E., Chauvel B., Choler P., Constantin J., Cousin I., Daroussin J., David M., Delacote P., Derocles S., De Sousa L., Domingues Santos J.P., Dross C., Duru M., Eugène M., Fontaine C., Garcia B., Geijzendorffer I., Girardin A., Graux A-I., Jouven M., Langlois B., Le Bas C., Le Bissonnais Y., Lelièvre V., Lifran R., Maigné E., Martin G., Martin R., Martin-Laurent F., Martinet V., McLaughlin O., Meillet A., Mignolet C., Mouchet M., Nozières-Petit M-O., Ostermann O.P., Paracchini M.L., Pellerin S., Peyraud J-L., Petit-Michaut S., Picaud C., Plantureux S., Poméon T., Porcher E., Puech T., Puillet L., Rambonilaza T., Raynal H., Resmond R., Ripoche D., Ruget F., Rulleau B., Rush A., Salles J-M., Sauvant D., Schott C., Tardieu L. (2017). *Volet "écosystèmes agricoles" de l'Évaluation Française des Ecosystèmes et des Services Écosystémiques*. Rapport d'étude, Inra (France), 966 pages.

Le présent document constitue le rapport scientifique d'une étude co-subsventionnée par le Ministère de la Transition Énergétique et Solidaire (MTES) sur le programme 217, action 01, sous-action 04, et sur le programme 113, action 7.

Le rapport a été élaboré par le groupe de travail sans condition d'approbation préalable par les commanditaires ou par l'Inra, et validé par les responsables scientifiques de l'étude. Son contenu n'engage que la responsabilité de ses auteurs.

Chapitre 10.

Biens produits par l'écosystème

Sommaire

10.1. Production de bien végétaux à partir des plantes cultivées	697
10.1.1. Spécification biophysique	697
10.1.2. Évaluation biophysique du niveau de production de biens végétaux par les plantes cultivées	712
10.1.3. Evaluation économique de la part de la production végétale permise par les SE de fourniture en azote et de restitution d'eau aux plantes cultivées	744
10.2. Production de fourrages par les surfaces en herbe	765
10.2.1. Spécification biophysique	765
10.2.2. Surfaces en herbe et services écosystémiques	776
10.2.3. Evaluation biophysique	778
10.3. Production de plantes sauvages à d'autres fins que les fourrages	797
10.3.1. Spécification biophysique	673
10.3.2. Pistes méthodologiques pour l'évaluation biophysique du niveau de fourniture de plantes sauvages	800
10.4. Production de biens animaux	803
10.4.1. Spécification biophysique	803
10.4.2. Evaluation biophysique de la production de biens animaux	811
Annexes du chapitre 10. Notes techniques	827
10-A. Note technique pour l'évaluation de la production de biens végétaux à partir des plantes cultivées	829
10-B. Note technique pour le calcul de la production de biens animaux	841
Références bibliographiques citées dans le chapitre 10	881

10.1. Production de bien végétaux à partir des plantes cultivées

10.1.1. Spécification biophysique

Expert coordinateur : Olivier Therond

Contributeur scientifique : Michel Duru

Dans EFESE-écosystèmes agricoles, la production agricole de biomasse végétale n'est pas conceptualisée comme un SE d'approvisionnement mais comme un processus de production de biens agricoles (cf. section 3.1). Le niveau de production agricole résulte des interactions entre les SE de régulation dont bénéficie l'agriculteur, appelés « SE intrants » ci-après, et des apports d'intrants exogènes (ex. énergie du travail du sol, fertilisants et amendements, eau d'irrigation, produits phytosanitaires). Différents modes de production de biens végétaux peuvent être distingués suivant la part relative de la production agricole permise par les SE de régulation pour un niveau de production donnée. Par exemple, il est possible de distinguer les systèmes de production « conventionnels » dont le niveau de production agricole est fortement basé sur les intrants exogènes, des systèmes de production, souvent qualifiés d'« agroécologiques », dont le niveau de production agricole est fortement déterminé par les SE dit « intrants » (Bommarco *et al.*, 2013; Duru *et al.*, 2015a; Gliessman, 2007; Therond *et al.*, 2017).

Les SE de régulation sont donc considérés ici comme des facteurs de production de nature fondamentalement différente des intrants exogènes. Comme les intrants exogènes, les SE « intrants » permettent de réduire les facteurs limitants (*limiting factors*) et de contrôler les facteurs réducteurs (*reducing factors*) (cf. section 3.1, Figure 10-1-1 ; Bommarco *et al.*, 2013 ; Duru *et al.*, 2015a ; Garbach *et al.*, 2014 ; Therond *et al.*, 2017). Dans EFESE-écosystèmes agricoles, ils correspondent aux SE :

- a) « Pollinisation des espèces cultivées » (section 8.1)
- b) « Régulation des graines d'adventices » (section 8.2)
- c) « Régulation des insectes ravageurs » (section 8.3)
- d) « Stabilisation des sols et contrôle de l'érosion » (section 8.5)
- e) « Structuration du sol » (section 8.6)
- f) « Stockage et restitution de l'eau » (section 8.7)
- g) « Fourniture d'azote minéral aux plantes cultivées » (section 8.8)
- h) « Fourniture d'autres nutriments et oligoéléments aux plantes cultivées » (section 8.9)

D'autres SE « intrants » clefs non instruits dans EFESE-écosystèmes agricoles par manque de compétences thématiques spécifiques dans le collectif d'experts, correspondent également à des SE « intrants », comme par exemple :

- i) le contrôle des maladies des plantes cultivées ;
- j) la régulation du microclimat de production.

Comme indiqué dans la section 3.1, deux grands types de pratiques agricoles sont distingués dans EFESE-écosystèmes agricoles au regard de leur rôle et de leur statut dans la production de biens agricoles et de SE :

(i) les pratiques de configuration spatiotemporelle de l'écosystème qui déterminent la nature de l'écosystème agricole et le niveau potentiel de production de biens agricoles (*defining factors* dans Ittersum et Rabbinge, 1997) et de fourniture de SE (Duru *et al.*, 2015a). Ces pratiques déterminent la nature et la structure spatiale et temporelle de la couverture végétale de l'écosystème. Autrement dit, elles correspondent aux choix de séquence de couvert végétaux et de dates et densités et distribution spatiale de semis/plantation. L'analyse du niveau de production de biens végétaux et de fourniture des SE d'un écosystème agricole donné considère ce type de pratique comme fixé. Les caractéristiques spécifiques, fonctionnelles et spatiotemporelles des couverts végétaux gérés par l'agriculteur sont alors considérées comme des déterminants biophysiques (endogènes) de l'écosystème. Par analogie, les couverts végétaux des habitats dits semi-naturels dans l'emprise spatiale de la parcelle agricole sont aussi considérés comme des déterminants biophysiques du niveau de fourniture des SE « intrants » fournis par l'écosystème agricole.

(ii) les pratiques agricoles qui visent à gérer la production de biomasse végétale voire de SE durant un cycle de production. Elles sont considérées comme des facteurs exogènes anthropiques qui peuvent moduler le niveau de production de biens agricole ou de fourniture des SE dans la période considérée pour leur évaluation (ex. pratiques phytosanitaires qui modulent le niveau des SE de régulations biologiques et de production de biens au fil du cycle de culture). Trois grands types de pratiques agricoles sont considérés :

- Les pratiques qui visent à réduire les stress abiotiques (eau et éléments minéraux) ou réguler les conditions physico-chimiques du sol (ex. chaulage, gypsage, travail du sol). Elles visent à réduire les facteurs limitants de la production agricole (*limiting factors* dans Ittersum et Rabbinge, 1997).
- Les pratiques qui visent à réduire les dommages causés par les bioagresseurs (stress biotiques). Elles visent à réduire les facteurs réduisant le rendement (*reducing factors* dans Ittersum and Rabbinge, 1997).
- Les pratiques de gestion de la biomasse soit d'exportation de la parcelle soit de « restitution » au sol.

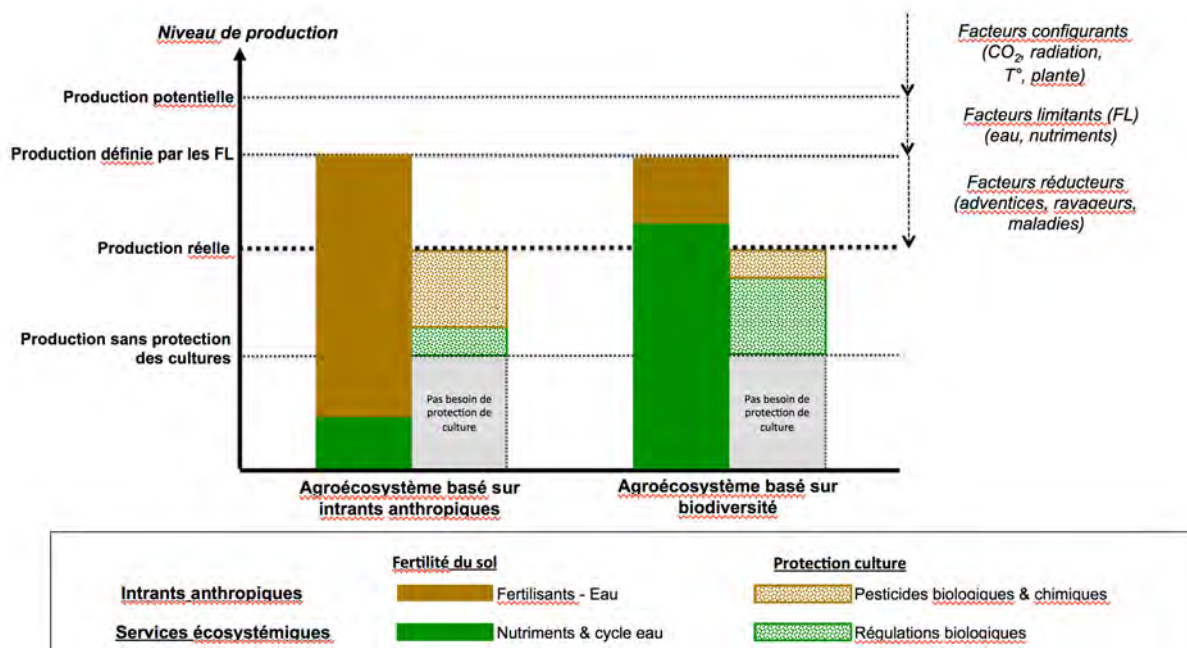
Suivant leur nature et leur distribution spatiotemporelle, ces trois types de pratiques agricoles peuvent avoir un effet positif ou négatif, intentionnel ou non intentionnel, sur le niveau de fourniture des SE rendus à l'agriculteur ou la société et sur le niveau de production agricole, à court terme (cycle de la culture, année) et moyen-long terme (pluriannuel, décennies).

Ces deux grands types de pratiques agricoles, de configuration et exogènes, déterminent l'état de l'écosystème agricole au fil du temps. L'évaluation d'un niveau de production de biens ou de fourniture de SE est réalisée en considérant un état initial donné et une période d'analyse, par exemple, une année culturale ou la durée de la rotation culturale. Évaluer la production de biens ou de SE à l'échelle temporelle de la rotation culturale permet de prendre en compte les effets d'enchaînement des couverts végétaux, appelés par ex. « effets précédents », ou les effets cumulatifs qui peuvent s'exprimer à cette échelle de temps (ex. régulation des adventices des cultures).

Pour rappel, l'écosystème agricole est conceptualisé dans EFESE-écosystèmes agricoles comme le système sol-plantes-animaux s'étendant sur l'ensemble de l'emprise spatiale de la parcelle. La parcelle représente ci-après l'espace agricole géré par l'agriculteur comprenant l'espace cultivé pour la production de biens végétaux, l'espace cultivé et géré avec des couverts végétaux semés d'autres types (bande enherbée, bande fleuries), la zone entre l'espace cultivé et la limite spatiale de la parcelle. Cette dernière peut comprendre une formation ligneuse, le plus souvent gérée par l'agriculteur.

Figure 10-1-1. Représentation du fonctionnement de deux formes archétypales d'agroécosystèmes présentant, pour des raisons illustratives, le même niveau de production.

La première forme d'agroécosystème est basée sur une faible biodiversité planifiée et sur une forte utilisation d'intrants exogènes d'origine anthropique (type d'agroécosystème « basé sur les intrants anthropiques »). La deuxième a développé un agroécosystème basé sur une biodiversité planifiée et associée qui fournit un haut niveau de SE intrants (régulations des nutriments et biologiques) ce qui lui permet de fortement réduire son utilisation d'intrants industriels et, possiblement, d'eau d'irrigation. Le niveau de « production sans (processus de) protection des cultures » est celui qui est atteint quand aucune protection naturelle (régulation biologique) et anthropique intervient. Afin de simplifier la représentation, le niveau de production sans (processus de) protection des cultures des deux types d'agroécosystème est le même. Dans l'agroécosystème basé sur les intrants anthropiques les facteurs limitants et réducteurs sont principalement compensés par des apports d'intrants anthropiques. Dans l'agroécosystème basé sur la biodiversité ils sont principalement compensés par les services écosystémiques de régulation (adapté de Duru *et al.*, 2015a, voir aussi Bommarco *et al.*, 2013).



10.1.1.1. Dénomination précise et nature du ou des biens agricoles

La production de biens agricoles végétaux à partir de plantes cultivées ou gérées génère quatre grands types de biomasse déclinés en fonction de leur usage :

- biens végétaux pour l'alimentation humaine (grains, fruits et légumes) produits au sein des écosystèmes agricoles de grandes cultures annuelles (céréales, oléoprotéagineux, cultures industrielles, pomme de terre), cultures légumières, cultures fruitières pérennes (vergers) et vignes ;
- biens végétaux pour la production secondaire d'énergie produits au sein des écosystèmes agricoles de cultures dédiées pérennes (miscanthus, switchgrass), pluriannuelles (luzerne) et annuelles (blé et colza pour les biocarburants de 1^{ère} génération, sorgho, chanvre, maïs) ou des cultures non dédiées (cultures intermédiaires). Ces biens « énergétiques » peuvent également être issus de plantes ligneuses dédiées à cette production (taillis à courte rotation et à très courte rotation) ou non dédiées (sous-produits végétaux liés à l'élagage et la taille des arbres fruitiers et des vignes, haies, lisières de forêts) ;
- les autres biens végétaux pour une production non alimentaire produits au sein des écosystèmes agricoles de grandes cultures (lin textile et chanvre notamment). Cette catégorie de biens n'est pas prise en compte dans EFESE-écosystèmes agricoles car elle reste très marginale à l'échelle de la France ;
- biens végétaux pour la production secondaire de biens animaux produits au sein des écosystèmes agricoles en grandes cultures annuelles (maïs fourrage, plante sarclée fourragère, autres fourrages annuels) et prairies temporaires et artificielles. La production de fourrages par les prairies semées est traitée dans la section 10.2.

Seules les productions de biens issus des écosystèmes de grandes cultures sont considérées ci-après.

Plusieurs de ces couverts végétaux (ex. blé, colza, maïs, sorgho) peuvent être transformés, dans leur totalité ou en partie, exclusivement ou non, en biens alimentaires, énergétiques, non alimentaires ou fourragers (ex. le colza peut être utilisé pour la production d'huile végétale alimentaire ou de biocarburant et les tourteaux sont utilisés pour l'alimentation animale).

Les formations ligneuses comprises dans l'emprise spatiale des parcelles agricoles gérées par les agriculteurs en vue d'une production de biomasse à usage de production d'énergie, de litière pour les animaux, de matière organique rapportée au sol, relèvent du champ d'analyse de l'étude. Cependant du fait du manque de données ce type de production ne donne pas lieu à une évaluation biophysique et économique. L'Association Française pour l'Agroforesterie a initié des travaux sur cette question¹.

10.1.1.2. Déterminants biophysiques clefs de la production de biens végétaux

Le niveau de production de biens agricoles végétaux à partir des écosystèmes agricoles dépend de différents déterminants biophysiques :

- l'**emprise spatiale de l'écosystème** (y compris les linéaires de formations ligneuses gérés pour la production de biomasse) et plus particulièrement de la surface gérée pour la production de biens végétaux ;
- l'**état des caractéristiques abiotiques** (ex. pH) et **biotiques du sol** résultant des interactions entre les composantes abiotiques du sol et la biodiversité planifiée et associée ;
- la **nature** et la **distribution spatiotemporelle de la biodiversité planifiée** à l'échelle de la parcelle, autrement dit des espèces et génotypes (ou variétés pour les espèces végétales cultivées) intentionnellement semés et plantés par l'agriculteur ;
- la **nature** et la **distribution spatiotemporelle de la biodiversité associée, végétale et animale**, à l'échelle de la parcelle résultant des interactions entre les processus écologiques déterminés par la biodiversité planifiée, de la composition ou configuration du paysage et de facteurs exogènes à l'écosystème (climat et pratiques agricoles exogènes) ;
- la **composition** et la **configuration du paysage** environnant l'écosystème agricole, qui peut déterminer le niveau des « SE intrants » dépendant des flux de matière ou d'énergie qui interviennent à cette échelle supra-parcellaire. Ainsi, les SE de régulation biologiques (a, b, c, i dans la liste ci-dessus) et les SE de « stabilisation des sols et contrôle de l'érosion » et de « régulation du microclimat » sont reconnus comme étant plus particulièrement dépendant des caractéristiques du paysage (Cf. sections correspondantes) ;
- les **SE « intrants »**, dépendant plus ou moins des déterminants biophysiques précédents, qui correspondent à des processus écologiques dont le gestionnaire de l'écosystème agricole peut dériver un avantage pour la production de biens végétaux (Cf. liste ci-dessus).

Comme cette section est focalisée sur les déterminants de la production de biens végétaux, seuls les SE « intrants » sont abordés ci-après.

Relation entre la nature et la distribution spatiotemporelle de la biodiversité planifiée, et le niveau des SE intrants

La nature des espèces et des variétés cultivées détermine la nature des biens végétaux produits ainsi que le fonctionnement de l'écosystème pour un état initial de celui-ci donné (ex. état organique des sols). La caractérisation fonctionnelle des espèces et variétés présentes dans l'écosystème, basé sur les cadres conceptuels et méthodologiques de l'écologie fonctionnelle, est reconnue comme une approche prometteuse pour établir des relations entre traits biologiques des espèces cultivées et fonctionnement de l'écosystème au regard des SE (voir encadré 10-1-1 ; Duru *et al.*, 2015a ; Faucon *et al.*, 2017 ; Gaba *et al.*, 2014a,b ; Moonen et Bàrberi, 2008 ; Therond *et al.*, 2017 ; Wood *et al.*, 2015).

¹ Voir le programme d'activités « Excelsior : Accompagnement à la valorisation de biomasse issue de zones « non-concurrentielles de l'agriculture ».

Encadré 10-1-1. L'examen des relations entre traits biologiques des espèces cultivées et fonctionnement de l'écosystème : un front de recherche

La description de l'état des connaissances sur les relations entre traits biologiques des espèces cultivées et fonctionnement de l'écosystème (voir la revue de Faucon *et al.*, 2017), leur développement et leur opérationnalisation pour la conception et la gestion des écosystèmes agricoles en vue de développer les SE est un front de recherche actuel (Duru *et al.*, 2015a ; Wood *et al.*, 2015 ; Gaba *et al.*, 2014a,b). De premiers exemples d'opérationnalisation sont en cours de développement comme ceux sur la caractérisation fonctionnelle des couverts intermédiaires en vue d'aider au choix de la ou des espèces adaptées à chaque écosystème (situation de production) et objectifs relatifs à un ou plusieurs SE (ex. structuration du sol, fourniture en azote, régulations biologiques) (ex. Damour *et al.*, 2014; Ozier-Lafontaine *et al.*, 2011). Cependant, l'identification des traits permettant la caractérisation fonctionnelle des couverts intermédiaires, comme des autres espèces cultivées, reste un front de recherche (pour les couverts intermédiaires voir Tribouillois *et al.*, 2015a,b, plus généralement voir Faucon *et al.*, 2017). Cette caractérisation fonctionnelle des couverts végétaux en grande culture est moins avancée et opérationnalisée que pour les prairies (Cf. section 10.2).

La **distribution spatiotemporelle de la biodiversité planifiée** est identifiée comme un levier de premier niveau pour augmenter le niveau de fourniture des SE « intrants » (ex. Duru *et al.*, 2015a ; Gaba *et al.*, 2014a ; Bommarco *et al.*, 2013 ; Kremen *et al.*, 2012). La distribution temporelle des génotypes correspond à l'enchaînement temporel des couverts végétaux. Dans les systèmes de culture de courtes durées, cet enchaînement temporel est appelé séquence ou succession de cultures², et peut notamment inclure un couvert intermédiaire (CI)³. Une revue des effets des CI sur les SE et les impacts négatifs des activités agricoles, principalement lixiviation et volatilisation d'azote, sont analysés et présentés dans Justes *et al.* (2015). Les multiples objectifs de production de biomasse, de limitation des impacts ou de développement de SE ont conduit à une déclinaison des qualificatifs associés à ces couverts intermédiaires : CI multi-services écosystémiques ou environnementaux (CIMSE), CI à vocation énergétique (CIVE), CI piège à nitrates (CIPAN), couvert cultivé en « dérobé » pour les CI pour l'alimentation des animaux... Une revue récente met l'accent sur le potentiel des CI pour la régulation du climat *via* les deux principaux effets directs de stockage du C et sur l'albédo (Kaye et Quemada, 2017). Ces différents objectifs ne sont pas obligatoirement exclusifs les uns des autres. Les modalités de gestion des CIMSE pour lever des antagonismes entre SE reste un front de recherche (Justes *et al.*, 2015). Par exemple, il y a un important enjeu dans les zones à déficit en eau à définir des modes de gestion des CI qui permettent de gérer le possible antagonisme entre les deux SE relatifs à la capacité à stocker et restituer de l'eau ; c.-à-d. entre (i) l'eau transpirée par la culture de rente dont l'agriculteur dérive un avantage et (ii) les flux d'eau vers les milieux aquatiques (rendement en eau) dont la société peut dériver un avantage.

La **distribution spatiale de la biodiversité planifiée** dans la parcelle correspond à deux grandes caractéristiques : (i) la configuration des individus (ex. pieds ou talles), des populations ou des communautés (mélanges d'espèces) végétales et (ii) la densité spatiale de la ou des populations/communautés. Il est tout autant question ici d'un couvert monospécifique avec une densité et un arrangement spatial donnés d'individus (ex. pieds ou talles), que d'un ou plusieurs couverts de production correspondant à des mélanges d'espèces/variétés combiné(s), suivant un arrangement spatial particulier intra ou inter mélanges, combiné à un ou des couverts implantés ou gérés pour offrir un ou des habitats aux auxiliaires des cultures (ennemis des insectes ravageurs) ou repousser ou attirer la concentration des insectes ravageurs ou maladies afin de limiter les dégâts et dommages sur les cultures de rentes (concept de « *push-pull* »).

La **diversification spatiale des cultures** se traduit par le développement de différents grands types de systèmes de culture qui peuvent être qualifiés de mixtes et qui correspondent à des :

- **mélanges de variétés ou d'espèces** (*intraspecific or crop mixtures*). Pour leurs effets sur les régulations biologiques voir, par ex., Iverson *et al.* (2014), Letourneau *et al.* (2011), Dassou et Tixier (2016), Bedoussac *et al.* (2015) et la section 8.3 sur le SE de régulation des insectes ravageurs ;

² Une séquence de culture cyclique, fixe ou avec certaines cultures optionnelles, est appelée une rotation fixe ou flexible de culture.

³ Un couvert végétal entre deux cultures ou mélanges de cultures de rentes est qualifié de couvert intermédiaire. Il peut être soit semé soit composé de repousse de la (ou des) culture(s) précédente(s). Il peut être soit semé dans la culture précédente (*relay cropping*) soit après la culture précédente (*cover crop*). Dans la même logique, il peut soit être détruit (mécaniquement, chimiquement, par le gel ou la compétition) avant le cycle de la culture suivante (*cover crop*) soit pendant celui-ci (*relay cropping*).

- **mélanges d'espèces ligneuses et de cultures ou de prairies** (agroforesterie). Pour une revue de leur potentiel pour la production de SE voir Fagerholm *et al.* (2016) et Torralba *et al.* (2016) ;

- **organisation spatiale de couverts de natures différentes monospécifiques ou plurispécifiques à vocation de production et de gestion des régulations biologiques ou du microclimat** (voir par ex. Gaba *et al.*, 2014a et Tzilivakis *et al.*, 2016).

Ces modalités de gestion de la biodiversité planifiée ne sont pas exclusives l'une de l'autre. Gaba *et al.* (2014a) proposent de décrire ces différents types de système de culture *via* la caractérisation de l'asynchronie des couverts et leurs différentes allocations spatiales.

Du point de vue des SE relatifs à la régulation des nutriments (Fourniture en nutriments aux plantes cultivées), la diversité de niche, dans l'espace (ex. valorisation de volumes de sol différents) et dans le temps (ex. décalage phénologique) et la diversité fonctionnelle (différents mécanismes écologiques d'accès aux ressources en azote et phosphore) permettent une potentielle amélioration de l'expression et l'utilisation des SE (Gaba *et al.*, 2014a, section 10.2, section 3.2). Le processus de facilitation entre espèces (ex. la solubilisation du phosphore par les légumineuses mis à disposition des autres espèces d'un mélange) peut également intervenir (Cf. section 8.9). Les différents effets de la diversité spatiotemporelle de niche et de la diversité fonctionnelle, combinés aux effets de protection physiques du sol par les couverts peuvent également permettre de réduire les impacts environnementaux négatifs des activités agricoles comme les fuites de polluants ou l'érosion (Gaba *et al.*, 2014a ; Sections 8.5 sur le SE de stabilisation des sols et contrôle de l'érosion, 8.8 et 8.9 sur les SE de fourniture en azote et en autres nutriments aux plantes cultivées, et 8.11 sur le SE de régulation de la qualité de l'eau). Enfin, la biodiversité planifiée peut également avoir un effet clef sur le niveau de SE de structuration du sol (Gaba *et al.*, 2014a, Section 8.6). Ainsi, certains CI sont implantés dans un objectif de développement de la capacité de structuration des sols de l'écosystème agricole (Justes *et al.*, 2015).

Les effets de la distribution spatiotemporelle de la biodiversité planifiée à l'échelle de la parcelle sur le niveau des SE de régulations biologiques des maladies, des insectes ravageurs et des adventices sont basés sur 8 grands types de processus écologiques (Duru *et al.*, 2015a, voir détails dans Ratnadass *et al.*, 2011 :

- Dilution de la ressource et détournement stimulo-dissuasif (effet push-pull) ;
- Perturbation spatiale ou temporelle des cycles écologiques ;
- Effets allelopathiques ;
- Capacité suppressive (générale ou spécifique) du sol ;
- Résistance physiologique de la culture ;
- Conservation des auxiliaires des cultures et facilitation de leur action contre les insectes ravageurs ;
- Effets directs ou indirects de l'architecture du couvert (effet de barrière).

Des méta-analyses récentes tentent d'établir les relations entre la diversité à l'échelle de la parcelle (*local-scale*) et le niveau de régulation des bioagresseurs. Elles confirment l'effet potentiellement important de la diversité intra parcellaire sur le niveau de ces SE (Dassou et Tixier, 2016 ; Cf. sections 8.2 et 8.3).

Relations entre biodiversité planifiée et associée

Il est important de noter que bien que certaines adventices des cultures sont considérées comme nuisibles du fait de la compétition qu'elles exercent avec les cultures de rente, leur présence dans l'écosystème agricole (la parcelle cultivée) peut être déterminante de la qualité de l'habitat qu'elle représente pour les organismes mobiles à l'origine des SE de régulations biologiques. Ainsi, de récents travaux analysent l'importance de la diversité et de l'abondance de ces plantes dans le cycle écologique de nombreux organismes mobiles à l'origine de ces SE (ex. Emmerson *et al.*, 2016 ; Petit *et al.*, 2015 ; Marshall *et al.*, 2003 ; Storkey and Westbury, 2007 ; Rollin *et al.*, 2016 ; Cf. sections 8.1, 8.2 et 8.3).

De plus en plus de travaux montrent qu'il existe d'importantes interactions entre les biodiversités aérienne (*aboveground*) et souterraine (*belowground*) (ex. Mendes *et al.*, 2013 ; Philippot *et al.*, 2013 ; Wardle, 2004). Ainsi, la compréhension des relations entre la nature des plantes cultivées ou de la biodiversité végétale associée, et la dynamique des communautés des organismes du sol est un front de recherche en développement (Mendes *et al.*, 2013 – voir encadré 10-1-2).

Encadré 10-1-2. La compréhension des relations entre la nature de la biodiversité végétale et la dynamique des communautés des organismes du sol dans les parcelles agricoles : un front de recherche

L'objectif agronomique serait de « piloter » la dynamique des communautés microbiennes associées aux plantes cultivées (microbiotes), ou plus généralement des organismes du sol, pour atteindre des objectifs en termes de SE, comme par exemple la régulation des bioagresseurs souterrains des plantes ou la fourniture de nutriments aux plantes cultivées (Dessaux *et al.*, 2016 ; Lemanceau *et al.*, 2015 ; Mendes *et al.*, 2013). Cela pourrait passer par la sélection de plantes cultivées présentant des traits fonctionnels à l'origine d'un microbiome (ensemble des génomes qui soutient l'ensemble des chaînes trophiques dans le sol) promoteur des SE recherchés. Ainsi, par exemple, Perez-Jaramillo *et al.* (2016) montrent comment l'évolution des espèces cultivées et des pratiques culturales peut modifier l'assemblage et les fonctions du microbiome rhizosphérique (voir aussi Bulgarelli *et al.*, 2015).

Effets de l'état des caractéristiques abiotiques et biotiques du sol.

Comme indiqué dans les sections 8.4, 8.6, 8.8 et 8.9, au-delà de sa texture, l'état organique du sol détermine fortement son fonctionnement et les SE qui en dépendent. La quantité et l'activité des microorganismes et des autres organismes du sol sont fortement déterminées par la nature et la distribution de la matière organique dans le profil de sol (Bouthier *et al.*, 2014, voir ci-dessous la section sur le travail du sol). Cette activité biologique et les caractéristiques et propriétés physico-chimiques de la matière organique déterminent la capacité de structuration des sols (Cf. section 8.6), la stabilisation des sols et le contrôle de l'érosion (Cf. section 8.5), la capacité à stocker et restituer l'eau (Cf. section 8.7) et la fourniture en nutriments aux plantes cultivées (Cf. sections 8.8 et 8.9).

Relation entre la composition et la configuration du paysage et le niveau des SE « intrants »

Le niveau des SE de régulations biologiques peut aussi dépendre de la composition et de la configuration du paysage puisqu'elles peuvent influencer la dynamique des bioagresseurs et des auxiliaires des cultures (encadré 10-1-3 ; Cf. sections 8.2 et 8.3). L'hétérogénéité fonctionnelle, c.-à-d. l'agencement spatiotemporel des couverts végétaux en termes de fonctions dans le cycle écologique des organismes mobiles (ex. ressource alimentaire, reproduction, repos, hivernage) serait plus particulièrement à considérer. En effet, l'hétérogénéité fonctionnelle dans l'espace et dans le temps peut générer des continuités, ruptures, facilitation ou compétition dans les cycles écologiques des organismes mobiles, qui favorisent ou défavorisent leur développement et dispersion (Fahrig *et al.*, 2011 ; Schellhorn *et al.*, 2015).

Les travaux de Concepcion *et al.* (2008) et de Tschardtke *et al.* (2012) ont initié le développement d'un schéma général des interactions entre conduite de l'écosystème agricole à l'échelle de la parcelle, complexité (hétérogénéité) du paysage et niveau de biodiversité associée. Ils représentent le fait que les effets de la complexification du paysage peuvent être fortement modulés par la nature de l'écosystème agricole au sein de la parcelle et le niveau de complexité initial (voir aussi Emmerson *et al.*, 2016 ; Leroux *et al.*, 2008 ; Tschardtke *et al.*, 2012 ; Cf. sections 8.2 et 8.3). La question du poids relatifs des effets de l'échelle parcelle et celle du paysage en fonction des caractéristiques des écosystèmes à ces deux échelles est un front de recherche (ex. Emmerson *et al.*, 2016). De plus en plus de travaux suggèrent que l'effet du paysage sur les SE de régulation biologique pourrait être (beaucoup) moins important lorsque la nature de l'écosystème agricole et de son mode de conduite sont favorables à la biodiversité associée à l'origine de ces SE (ex. Petit *et al.*, 2017 ; Tamburini *et al.*, 2016 ; Chabert et Sarthou, 2017 ; Chaplin-Kramer et Kremen, 2012).

Encadré 10-1-3. Relations entre caractéristiques du paysage et SE de régulations biologiques

Tscharntke *et al.* (2012) proposent une liste de sept grandes hypothèses sur les processus ou contextes biophysiques qui peuvent déterminer les relations entre les caractéristiques du paysage et de la région biophysique considérées d'une part, et le niveau des SE de régulations biologiques d'autre part :

- L'hypothèse du pool d'espèces à l'échelle du paysage : la diversité locale (alpha) est modulée par la taille du pool d'espèce à l'échelle paysagère.
- L'hypothèse de la dominance de la diversité « bêta » : la dissimilarité entre les communautés locales (bêta diversité) détermine les niveaux de biodiversité à l'échelle du paysage et annule les effets négatifs locaux de la fragmentation des habitats.
- L'hypothèse des échanges entre habitats : les échanges d'énergie, de ressources et d'organismes entre habitats influencent la structure des communautés, et les processus associés, à l'échelle du paysage.
- L'hypothèse de la concentration et de la dilution à l'échelle du paysage : les changements spatio-temporels dans la composition des paysages peuvent entraîner des effets transitoires de concentration ou de dilution des populations et avoir des conséquences fonctionnelles.
- L'hypothèse de la sélection des traits fonctionnels à l'échelle du paysage : la sélection des traits des espèces par le contexte paysager façonne le rôle fonctionnel et les règles d'assemblage des communautés.
- L'hypothèse d'assurance liée au paysage : la complexité du paysage assure une plus grande résilience et une meilleure stabilité des processus écologiques dans des environnements soumis à de fortes perturbations.
- L'hypothèse de la complexité intermédiaire : les effets de la mise en place d'aménagements locaux (ex. mesure de conservation ou pratiques agricoles) sont plus importants dans des paysages de complexité intermédiaire que dans des paysages extrêmement simplifiés (niveau de biodiversité à l'échelle du paysage beaucoup trop faible pour détecter les effets des aménagements locaux) ou très complexes (niveau de biodiversité à l'échelle du paysage déjà maximale).

Ces auteurs rajoutent une hypothèse, d'une autre nature, sur les relations entre conservation de la biodiversité à l'échelle du paysage et gestion des services écosystémiques : la conservation de la biodiversité à l'échelle du paysage pour optimiser la diversité fonctionnelle et les services écosystémiques associés ne permet pas de répondre aux enjeux de conservation et de protéger les espèces menacées (Cf. section 3.2).

L'abondance et la distribution spatiale des habitats semi-naturels sont considérées comme des déterminants majeurs du niveau de SE de régulations biologiques. Cependant, de nombreux travaux mettent en avant les possibles effets contradictoires d'une plus grande abondance de ces habitats sur certains processus de régulation des insectes ravageurs et des adventices. Aussi, Tscharntke *et al.* (2016) identifient cinq grands types de situations pour lesquels une relation négative entre l'abondance de ces habitats et le niveau des SE de régulation des bioagresseurs peut être observée :

- Pas d'espèce d'auxiliaires des cultures efficaces contre les bioagresseurs dans le pool régional d'espèces.
- Les habitats semi-naturels sont une plus grande source de bioagresseurs que d'auxiliaires des cultures.
- Les habitats cultivés fournissent plus de ressources aux auxiliaires des cultures que les habitats semi-naturels.
- La quantité, la proximité, la composition ou la configuration des habitats semi-naturels ne permettent pas la mise en place de populations d'auxiliaires des cultures suffisantes pour assurer un contrôle naturel efficace.
- Les pratiques agricoles masquent les effets positifs des habitats semi-naturels sur l'établissement des auxiliaires des cultures et le niveau de contrôle naturel.

Enfin, Hagen *et al.* (2012) proposent une importante revue de littérature sur l'effet de la fragmentation des habitats sur le niveau des SE de régulations biologiques. Ils montrent que les traits fonctionnels des organismes mobiles (ex. taille, capacité de dispersion) déterminent leur réaction aux différentes formes de fragmentation. Ils montrent que mes méthodes de caractérisation de cette fragmentation et les effets associés sur les SE de régulation biologique dans les paysages agricoles donnent lieu actuellement à d'importants débats scientifiques. Pour appréhender les relations entre hétérogénéité du paysage et dynamique des organismes mobiles, ces auteurs proposent de développer une approche basée sur la caractérisation des réseaux trophiques (voir aussi Bohan *et al.*, 2013, 2016). Ils proposent de développer des approches intégrées d'analyse des réseaux écologiques et spatiaux et d'analyse fonctionnelle.

Plus généralement, concernant les SE de régulations biologiques, de l'échelle de la parcelle à celle du paysage, il est possible de distinguer les effets de la végétation sur l'abondance des ravageurs (*bottom-up effects*) de ceux de l'activité de prédation ou parasitisme des espèces qui limitent le développement des bioagresseurs (*top-down effects*). Une pratique donnée peut favoriser à la fois les ravageurs et leurs prédateurs, ou favoriser certains prédateurs mais en défavoriser d'autres. Il est alors nécessaire d'identifier les antagonismes en jeu et déterminer les caractéristiques des systèmes de culture et du paysage qui permettraient de les réduire ou de les lever (Malézieux, 2011 ; Rapidel *et al.*, 2015 ; Ratnadass *et al.*, 2011, Tscharntke *et al.*, 2012, 2016).

Biodiversité, niveaux et résilience de la production de biens végétaux agricoles

Enfin, à l'image de ce qui est observé sur les prairies (Cf. section 10.2), dans les systèmes de grandes cultures à faible niveau d'intrants exogènes (ex. agriculture biologique) les mélanges plurispécifiques ou de génotypes au sein de la parcelle permettent souvent d'obtenir un niveau de production ou une qualité de biens agricoles plus élevés du fait d'effet de complémentarités de niche, temporelle ou fonctionnelle (ex. Bedoussac *et al.*, 2015) pour les mélanges d'espèces en agriculture biologique). La simplification des séquences de culture, c.-à-d. la réduction du nombre d'espèces au sein de la séquence, serait source d'une baisse ou d'une stagnation des rendements (Bennett *et al.*, 2012 ; Brisson *et al.*, 2010 ; Jeuffroy *et al.*, 2012 ; Pinochet et Noël, 2012). Cependant, pour le blé en France l'effet positif du progrès génétique sur le niveau de production (rendement) reste supérieur à celui, négatif, de la simplification des séquences de culture (Brisson *et al.*, 2010). Cette simplification des séquences de culture tendrait à ralentir la progression des rendements liés aux progrès génétique et des pratiques.

Comme indiqué dans la section 3.2, de nombreux travaux laissent entendre que l'augmentation de la biodiversité planifiée au sein de la parcelle ou du paysage et, par conséquent de la biodiversité associée, serait source de résilience des processus écologiques à l'origine des SE, des SE eux-mêmes et du niveau de production de biens associé (ex. Duru *et al.* 2015a ; Malézieux, 2011 ; Ponisio et Ehrlich, 2016 ; Cf. section 3.2).

10.1.1.3. Facteurs exogènes clefs de la production de biens végétaux

La production de biens agricoles végétaux est étroitement liée aux itinéraires techniques de conduite des écosystèmes agricoles cultivés et au climat (Figure 10-1-2). Les itinéraires techniques déterminent les opérations culturales, mises en œuvre sur les couverts végétaux pour obtenir un état de l'écosystème agricole attendu : travail du sol (notamment labour ou non), fertilisation (en termes de nature, quantité et temporalité), irrigation (quantité et temporalité), traitements phytosanitaires (nature, quantité et temporalité des apports des produits et matières actives). Les agronomes français conceptualisent le système de culture comme le mode de conduite d'un ensemble de parcelles conduites suivant la même stratégie. Le système de culture est composé de la séquence de culture (ici biodiversité planifiée de l'écosystème agricole) et des itinéraires techniques associés à chacune des cultures de cette séquence (Boiffin *et al.*, 2001 ; Meynard *et al.*, 2003). Dans EFESE-écosystèmes agricoles, ces itinéraires techniques sont considérés comme des facteurs exogènes à l'écosystème agricole, dont la configuration dépend, entre autres, des séquences de culture. Le système de culture est conçu et appliqué suivant des objectifs de production et d'état de l'écosystème agricole, pensé à plus ou moins long terme. La cohérence des systèmes de culture relativement à un ensemble d'objectifs et un état des connaissances, est l'objet central du travail de l'agronome des systèmes de culture (Meynard *et al.*, 2003). Par soucis de lisibilité nous présentons ci-après les principaux effets de chacun des types d'opérations techniques. Une ébauche d'analyse à l'échelle du système de culture est réalisée dans la section suivante.

Les effets du **travail du sol par retournement** (labour) développés pour réguler le développement des adventices et obtenir une structure du sol adaptée à la croissance des cultures font l'objet de nombreux travaux de recherche depuis de nombreuses années. Nous nous concentrons ici sur les effets potentiels du labour sur la fourniture de SE analysés dans EFESE-écosystèmes agricoles. Le labour modifie la distribution des éléments abiotiques et biotiques du sol et des résidus de culture sur la profondeur de travail. Il génère alors une modification majeure de la porosité, et donc de la structure du sol, la disponibilité en oxygène, de la dynamique de la température et de l'humidité du sol, de la distribution de la matière organique dans le sol, ceci entraînant des modifications majeures des caractéristiques de l'habitat sol et, *in fine*, de la vie du sol (bactéries, champignons, meso et macro faunes) et donc son fonctionnement écologique. Le labour aurait un effet significatif sur :

- le SE de structuration des sols puisqu'il peut engendrer une forte perturbation de (i) la composante biotique du sol et de son fonctionnement et (ii) la dynamique de la matière organique des sols qui est un déterminant majeur de ce SE (Cf. section 8.6). Le développement de la fréquence et de l'intensité du travail du sol, plus particulièrement du labour, est le plus souvent associé à une diminution de l'abondance et de la diversité des organismes microbiens du sol (ex. Zuber et Villamil, 2016) et des « ingénieurs du sol » (Bouthier *et al.*, 2014, Cf. section 8.6). Il apparaît que le travail du sol affecte plus particulièrement certains groupes microbiens, comme les populations nitrifiantes ou les champignons mycorhiziens. L'augmentation de l'intensité et la fréquence du travail du sol est particulièrement défavorable au développement de la macrofaune du sol plus affectée par ce

type de perturbation que les organismes de plus petite taille (Bouthier *et al.*, 2014). Les effets du labour sur la dynamique de la matière organique des sols fait l'objet d'intense débat scientifique en France opposant les résultats montrant que le labour a avant tout un effet sur la répartition du carbone dans le sol (Dimassi *et al.*, 2013, 2014) à ceux montrant qu'il a un effet significatif sur la dynamique du carbone du fait des modifications de température, d'humidité et d'oxygénation du sol et donc sur la minéralisation de la matière organique du sol (CF. section 8.12). Ces modifications de conditions physico-chimiques peuvent également jouer sur les émissions de N₂O du fait de la modification des processus de nitrification et dénitrification (CF section 8.12).

- les SE de fournitures en nutriments et oligoéléments, du fait des modifications des conditions abiotiques et biotiques du sol (CF. section 8.8 et 8.9).

- les SE de régulations biologiques, lorsqu'il génère des perturbations des réseaux trophiques à l'origine de ces SE (CF. section 8.2 et 8.3).

Les **apports de fertilisants minéraux ou organiques** modifient la disponibilité en nutriments dans les sols et donc la dynamique des organismes vivants qui en dépendent, aussi bien les plantes que la biodiversité associée du sol. *Via* ses effets sur la dynamique de la biomasse végétale, la fertilisation modifie le régime des flux d'énergie, d'eau et de nutriments dans le système sol-plante et donc sur les SE associés.

Les apports de fertilisants sont réalisés en fonction d'objectifs de production de biens agricoles. La nature, le dimensionnement, la distribution spatiale et la temporalité des apports de fertilisants déterminent l'efficacité de ces apports à répondre, dans l'espace et dans le temps, aux besoins de la plante cible, principalement les cultures de rente. Le principal enjeu est d'apporter le bon produit à la bonne dose, au bon endroit, au bon moment ("*Right Product, Right Rate, Right Time, and Right Place*" ; Spiertz, 2012). Suivant les méthodes utilisées pour définir la stratégie d'apport des fertilisants, ces apports sont plus ou moins complémentaires aux nutriments fournis par les écosystèmes pour répondre aux besoins de la plante cible. Ainsi, pour une capacité de SE de fourniture en nutriments donnée dans un écosystème donné, si les apports réalisés ont vocation à couvrir l'ensemble des besoins de la plante cible, le niveau de SE effectif est faible voire nul ; l'agriculteur ne dérive pas ou peu d'avantage de la capacité de l'écosystème à fournir des nutriments. En revanche, si l'agriculteur met en œuvre des méthodes lui permettant d'estimer le niveau de SE (en début de cycle de culture, pendant le cycle de culture ou en fin de période de fertilisation), il peut alors transformer tout ou partie du SE en avantage et donc avoir un haut niveau de SE effectif.

L'estimation par culture, système de culture et situation pédoclimatique, de la marge de manœuvre existant pour augmenter le SE effectif relativement à la capacité de l'écosystème reste encore à réaliser finement (Goulding *et al.*, 2008 ; Cordell *et al.*, 2011 ; voir un premier essai pour l'azote en section 8.8). Les stratégies de développement de la capacité des écosystèmes à fournir des nutriments aux plantes cultivées sont à élaborer en considérant les spécificités des situations de productions (Duru *et al.*, 2015a,b ; Drinkwater et Snapp, 2007). La fertilisation organique et la gestion de la biomasse (voir ci-dessous) sont deux leviers importants pour développer cette capacité de fourniture, du fait des apports de nutriments et de matière organique au sol qu'elles peuvent générer. La fertilisation, comme les amendements, modifient les caractéristiques abiotiques du sol (ex. acidification par apport d'azote minéral, alcalinisation par apport d'effluents organiques, voir Houot *et al.*, 2014) et son fonctionnement biotique, et donc les SE qui en dépendent tels que la capacité de régulation du climat (régulation des émissions des N₂O, dynamique de minéralisation du carbone) (Cf. section 8.12) et la capacité de structuration du sol (CF. section 8.6). Par ses effets sur le développement quantitatif et qualitatif de la biomasse, la fertilisation peut également modifier les caractéristiques des couverts végétaux qui déterminent la dynamique des organismes mobiles à l'origine des SE de régulation biologique (ex. Emmerson *et al.*, 2016 ; Cf. sections 8.2 et 8.3).

L'apport de produits phytosanitaires chimiques vise à contrôler les (dégâts des) bioagresseurs ou à modifier les caractéristiques des plantes (ex. régulateur de croissance) pour atteindre des objectifs de production de biens agricoles. Comme pour la fertilisation, l'enjeu réside dans l'apport du bon produit à la bonne dose, au bon endroit, au bon moment. Les effets des pesticides chimiques sur le rendement, voire les organismes cibles et non cibles, font l'objet de récents travaux en France.

Les travaux de Lechenet *et al.* (2017) et Gaba *et al.* (2016) sur les relations entre quantité de pesticides et rendements pour les premiers, et quantité d'herbicides, rendements et adventices pour les seconds, laissent entendre qu'il existerait une importante marge de manœuvre pour la réduction des pesticides. Les travaux de Hossard *et al.* (2015 et 2016) vont dans le même sens pour le maïs et, considérant les effets sur le rendement, pour le blé.

Par ailleurs, les travaux de Gaba *et al.* (2016) amènent à s'interroger sur l'effet des herbicides sur les adventices cibles et montrent leurs effets négatifs sur la biodiversité associée végétale rare qui peut représenter un enjeu en terme de biodiversité patrimoniale et d'habitat pour les auxiliaires des cultures (voir section précédente). Enfin, les effets négatifs des pesticides sur la biodiversité associée ont été largement étudiés et démontrés en France, en Europe et dans le monde (ex. Emmerson *et al.*, 2016 ; Cf. sections 8.1, 8.2 et 8.3). L'effet des pesticides sur les organismes non cibles pouvant alors conduire à une diminution des SE effectifs de régulation biologique en cours d'année mais aussi à la perturbation des réseaux trophiques à l'origine de ces SE et donc la capacité de l'écosystème à délivrer ces SE. La logique d'analyse des relations entre pratiques de fertilisation et niveau de SE effectif de fourniture en nutriments peut se transposer à l'identique à la gestion des pesticides : en fonction de ces pratiques d'observation/mesure/information, l'agriculteur peut obtenir un niveau plus ou moins important de SE effectif de régulation biologique pour une capacité de l'écosystème à fournir ce SE donnée. Le développement de méthodes de production basées sur la lutte intégrée contre les bioagresseurs des cultures (*integrated pest management*) est une voie prometteuse pour permettre de réduire les apports de pesticides et valoriser au mieux les SE de régulation biologique (Barzman *et al.*, 2015 ; Lamichhane *et al.*, 2016). De nouvelles pratiques de **contrôle des bioagresseurs par utilisation d'intrants biologiques** exogènes se développent actuellement. Elles peuvent prendre plusieurs formes : introduction d'ennemis naturels des prédateurs des cultures développés industriellement (ex. trichogramme du maïs), d'organismes à l'origine de SE (ex. bactéries azotobacters, champignons mycorrhiziens), apports de bio-stimulants du sol ou de la santé des plantes, utilisation de biopesticides afin de réduire l'écotoxicité des pratiques phytosanitaires... Alors que l'efficacité de certaines innovations comme l'inoculation de rhizobiums dans les systèmes de culture de légumineuses a été démontrée (Lemamceau *et al.*, 2015), les effets au champ d'intrants tels que les bio-stimulants ne semblent pas être solidement démontrés (Reeve *et al.*, 2016). De plus, ces intrants biologiques ont généralement une faible résilience, ce qui conduit les agriculteurs à les appliquer régulièrement (par exemple, chaque année). Une raison de cette faible résilience, pourrait être que ces produits sont utilisés de la même manière que les produits chimiques, alors qu'étant biologiques, ils devraient être appliqués conformément à leurs exigences écologiques (Alabouvette *et al.*, 2006). En outre, il est encore nécessaire d'étudier attentivement l'effet du type d'inoculum, du taux d'application et du temps d'application pour assurer l'efficacité du contrôle biologique (*ibid.*). En d'autres termes, les bonnes pratiques de gestion de ce type d'intrants restent à définir. Par exemple, la stratégie d'application des bio-pesticides (Cordeau *et al.*, 2016), seuls ou en combinaison avec des pesticides chimiques, le développement possible des résistances comme celle développées aux pesticides chimiques (Siegwart *et al.*, 2015 ; Gan-Mor et Matthews, 2003) est un front de recherche à développer (Hynes et Boyetchko, 2006 ; Glare *et al.*, 2012).

L'irrigation est réalisée de manière à réduire voire supprimer un déficit hydrique édaphique qui limite significativement et régulièrement la production de biens agricoles. Les apports d'eau modifient principalement l'état hydrique du sol et le niveau de stress hydrique de la plante cultivée. Ils engendrent donc des modifications dans les flux d'eau, verticaux principalement (Cf. section 8.7). Ils modifient également le régime des processus écologiques édaphiques et les SE associés qui dépendent du niveau d'humidité du sol comme ceux liés au cycle de l'azote (Cf. section 8.8 et 8.12).

Comme pour la fertilisation et les traitements phytosanitaire, les marges de manœuvre existantes pour augmenter l'efficacité d'utilisation du SE de stockage et restitution de l'eau aux plantes cultivées dans les différentes situations de production restent à déterminer (Ali et Talukder, 2008; Playan et Mateos, 2006). Les gains possibles de capacité des écosystèmes à stocker et restituer l'eau aux plantes cultivées, *via* par exemple une augmentation de la structuration du sol et du taux de matière organique, et les stratégies culturales qui permettraient de les exprimer en fonction des caractéristiques biophysiques des écosystèmes agricoles, restent à définir (Therond *et al.*, 2017).

La gestion de la biomasse des couverts végétaux cultivés est un levier puissant de modification des niveaux de plusieurs SE « intrants ». Ainsi la nature et la quantité de biomasse exportée de la parcelle, ainsi que la nature, la quantité et l'état (ex. broyée) de la biomasse restituée au sol, déterminent les flux de carbone, de nutriments et d'eau dans l'écosystème et donc les SE associés. En effet, le bilan net de biomasse et le ratio C/N de celle-ci détermine la dynamique de la matière organique dans les sols, les flux d'azote associés et la capacité de structuration des sols. Les pratiques de gestion en surface ou d'enfouissement de cette biomasse jouent également un rôle clef dans la dynamique de décomposition de la matière organique (Cf sections 8.6, 8.8 et 8.12). La conservation des résidus de culture en surface permet la protection des sols contre les effets érosifs des événements pluvieux (Cf. sections 8.5 et 8.6). Elle permet également de réguler les flux d'évaporation et donc d'améliorer la capacité de l'écosystème à stocker et restituer de l'eau aux plantes cultivées (CF section

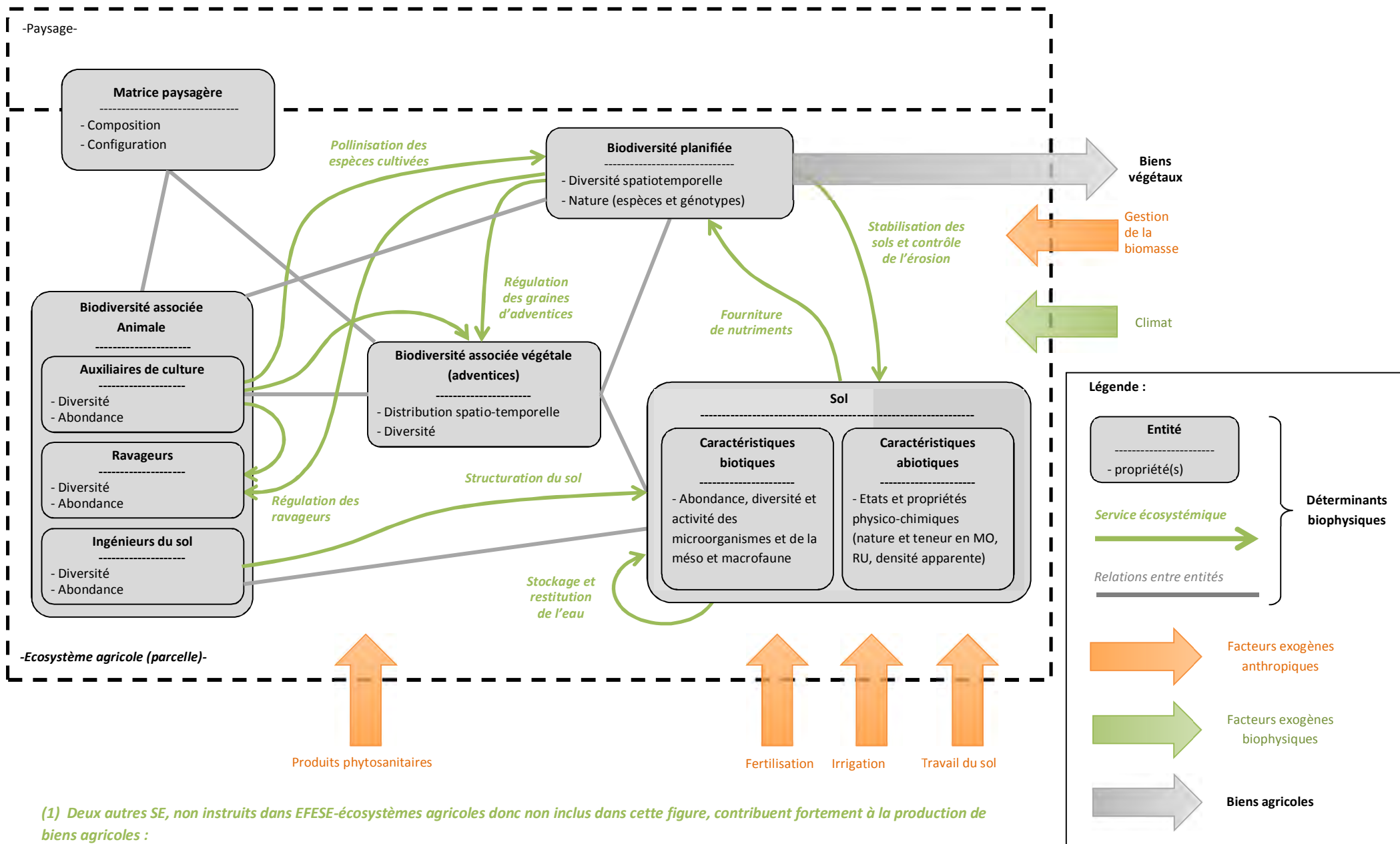
8.7). L'intégration de matières organiques exogènes à l'écosystème (ex. compost, Bois Raméal Fragmenté, biochar), considérant leurs propriétés (ex. C/N), a des effets du même type.

Plus généralement, un des grands enjeux du développement de systèmes de culture fortement basés sur les SE « intrants » est de concevoir des pratiques agricoles exogènes qui ne viennent pas perturber, à court et moyen-long termes, le fonctionnement de l'écosystème en termes de fourniture de SE (par exemple des stratégies de protection phytosanitaires qui ne perturbent pas ou peu les réseaux trophiques à l'origine des SE de régulation biologique ; voir Duru *et al.*, 2015a ; Therond *et al.*, 2017).

Dans la même logique que ce qui est présenté dans la section précédente, les effets des pratiques agricoles sur les SE peuvent être analysés avec les outils de l'écologie fonctionnelle et de l'analyse des réseaux trophiques. Une approche complémentaire consiste à mobiliser les outils de l'écologie pour traduire les effets des pratiques en niveau de perturbation et d'effets sur la biodiversité associée, et *in fine* sur les SE (voir un exemple sur les adventices dans Gaba *et al.*, 2014b).

Enfin, **la variabilité climatique et les changements climatiques** sont de puissants facteurs exogènes de la production de biens *via* la fourniture de SE par les écosystèmes. Des travaux complémentaires à ceux sur les effets de la simplification des séquences de culture mentionnés dans la section précédente, ont montré les effets de ces dimensions du climat sur la variabilité et les tendances de la productivité des écosystèmes agricoles (ex. Brisson *et al.*, 2010 ; Moore et Lobell, 2014).

Figure 10-1-2. Représentation schématique des déterminants biophysiques et facteurs exogènes de la production de biens végétaux



(1) Deux autres SE, non instruits dans EFESE-écosystèmes agricoles donc non inclus dans cette figure, contribuent fortement à la production de biens agricoles :

- Contrôle des maladies des plantes cultivées
- Régulation du microclimat de production

10.1.1.4. Effets combinés des déterminants biophysiques et facteurs exogènes sur le niveau de production de biens

Le cadre conceptuel d'EFESE-écosystèmes agricoles distingue les déterminants biophysiques des facteurs exogènes de la fourniture de SE et de la production de biens, de manière à offrir la possibilité de différencier ce qui relève du système « sol-plantes-animaux » d'une part, et ce qui relève des pratiques agricoles et du climat exogènes à ce système d'autre part (Figure 10-1-2). Considérant un état donné de l'écosystème agricole (ex. taux de matière organique des sols), cette conceptualisation offre la possibilité d'**analyser le potentiel de SE que l'écosystème peut délivrer et comment, via leurs effets sur les processus écologiques, les pratiques agricoles exogènes amplifient ou réduisent le potentiel de SE**. Cependant, cela ne conduit pas l'agronome à changer de posture d'analyse et de conception : c'est bien une combinaison cohérente entre une configuration spatiotemporelle de couverts végétaux et les pratiques agricoles de gestion de ceux-ci, autrement dit un système de culture, qui peut permettre d'atteindre des objectifs en terme de production agricole, réduction des intrants exogènes, d'état de l'écosystème agricole, et d'effet de son fonctionnement sur les autres écosystèmes.

Différents grands types de systèmes de culture peuvent être distingués. Il existe beaucoup de terminologies décrivant des systèmes de culture plus durables en opposition aux systèmes de culture dits « conventionnels » c.-à-d. basé sur des rotations de culture simplifiées et courtes (voire des monocultures) et d'importants apports d'intrants exogènes. Ainsi, on trouve dans la littérature internationale une grande diversité de termes pour décrire ces systèmes de production agricoles alternatifs : *biodynamic, community-based, ecoagriculture, ecological, environmentally sensitive, extensive, farm-fresh, free-range, low-input, organic, permaculture, precision, smart, diversified, integrated, conservation*, etc. (e.g. Therond *et al.*, 2017). D'intenses débats existent sur la question de la durabilité des systèmes agricoles décrits par ces différents termes (Garbach *et al.* 2016 ; Pretty, 2008). Les récents travaux de Duru *et al.* (2015a,b) puis de Therond *et al.* (2017) cherchent à classer ces formes de systèmes de culture (*cropping system*) ou de production (*farming system*) en fonction de la part de la production permise par les SE « intrants » et de celle permises par les intrants exogènes. Ils sont largement mobilisés dans le cadre conceptuel d'EFESE-écosystèmes agricoles et rappelé en introduction de cette section.

L'objet de cette section n'est pas de réaliser un inventaire, une caractérisation ou une évaluation multicritères des grands types de systèmes de culture ou de production au regard de la fourniture des SE et de la production des biens. Il est de présenter, aux travers de quelques exemples de systèmes de production « alternatifs » aux systèmes conventionnels, la nature des relations qui peuvent s'exprimer entre leurs caractéristiques et celles de la fourniture des SE et de la production des biens. Nous retenons deux exemples : les systèmes d'agriculture de conservation (*conservation agriculture*) et les systèmes polyculture-élevage intégrés (*integrated crop-livestock systems*).

Garbach *et al.* (2016) présentent une méta-analyse des caractéristiques et des effets observés sur neuf SE et la production de biens agricoles de différents types de systèmes de culture dont ceux en **agriculture de conservation**. Ce dernier type de système est basé sur trois piliers en termes de pratiques : la minimisation des perturbations du fonctionnement du sol (réduction du travail du sol et non-labour), le maintien d'une couverture du sol (couvert végétal mort ou vivant) et la diversification et l'allongement des rotations (Garbach *et al.* (2016); Pittelkow *et al.* 2014). Dans leur méta-analyse, Pittelkow *et al.* (2014) montrent que ce type de systèmes de culture permet d'atteindre des niveaux de rendement équivalent à ceux des systèmes conventionnels lorsque ces trois types de pratiques (leviers agronomiques) sont mis en œuvre en combinaison. Ils montrent aussi que lorsque le non-labour est mis en œuvre seul, bien que les résultats soient variables, il a en moyenne tendance à réduire le niveau de production de biens végétaux.

Concernant les SE, les points forts majeurs de l'agriculture de conservation seraient l'amélioration des SE liés à la régulation du cycle de l'eau, du cycle des nutriments, la structuration du sol et le contrôle de l'érosion. Bien qu'en moyenne ces systèmes permettraient aussi d'amplifier les SE de régulation des bioagresseurs, les effets peuvent être contrastés. Plus particulièrement, la régulation des adventices semble être une des grandes difficultés rencontrées par ces systèmes (Garbach *et al.* 2016).

Il est important de noter que ces différents effets positifs peuvent s'exprimer après une période de transition de plusieurs années. La question de la durée et des modalités de conduite de cette transition restent un front de recherche (Duru *et al.*, 2015a,b ; Garbach *et al.* 2016 ; Pittelkow *et al.* 2014 ; Ponisio et Ehrlich, 2016). Ainsi, par exemple, tout récemment, Petit *et al.* (2017) ont montré que les systèmes en agriculture de conservation favorisent l'abondance des carabes après une période de transition d'au moins quatre ans.

Les **systèmes intégrés culture-élevage** sont souvent considérés comme des systèmes permettant de développer des modes de production de biens végétaux plus durables, basés sur les SE. Dans ces systèmes, l'enjeu est développer les interactions spatiotemporelles entre les prairies, les grandes cultures et les animaux, de manière à augmenter la diversité spatiotemporelle à l'échelle de la parcelle et du paysage et, *in fine*, les SE qui en dépendent (Bonaudo *et al.*, 2014 ; Moraine *et al.*, 2014, 2016a ; Martin *et al.*, 2016). Ces systèmes intégrés culture-élevage peuvent être développés à l'échelle du système de production en culture-élevage (Ryschawy *et al.*, 2017). Ils peuvent aussi être développés à l'échelle de collectifs d'agriculteurs ou du territoire (Moraine *et al.*, 2016b, 2017 Ryschawy *et al.*, 2017, Dumont *et al.*, 2016). Dans ces deux derniers cas, l'organisation d'échanges de matières (grains, fourrage, effluents) voire d'animaux, entre des exploitations spécialisées en grande culture et en élevage permet de diversifier les assolements et séquences de culture des exploitations en grande culture (ex. intégration de légumineuses à grain, de luzerne ou d'autres prairies temporaires). Ce type d'organisation peut également permettre une extension des surfaces en herbe dans les exploitations d'élevage sur les surfaces libérées des objectifs de production transférés aux exploitations de grande culture (ex. production de céréales). La diversification spatiotemporelle à l'échelle de la parcelle, du système de production ou du paysage peut permettre le développement des SE de régulations biologiques, de fourniture de nutriments (ex. effet des légumineuses sur les fournitures en azote et phosphore), de stockage du carbone et de maintien de la structuration du sol (Duru et Therond, 2014 ; Martin *et al.*, 2016 ; Moraine *et al.*, 2016b, 2017 ; Dumont *et al.*, 2016).

La conception et la gestion de systèmes de culture et de production basés sur les SE limitant fortement le recours aux intrants exogènes constituent un enjeu majeur de la recherche en agroécologie (e.g. Duru *et al.*, 2015b, Bommarco *et al.*, 2013, Malézieu, 2011, Doré *et al.*, 2011). Différents auteurs ont récemment tenté de formaliser des méthodologies participatives de diagnostic-conception-évaluation de systèmes et paysage agricoles permettant de développer les SE (ex. Mitchell *et al.*, 2016 ; Mastrangelo et Weyland., 2014 ; Rapidel *et al.*, 2015 ; Shippers *et al.*, 2015 ; Wood *et al.*, 2015 ; Jackson *et al.*, 2012). Beaucoup d'entre eux mettent le focus sur (i) la sélection *a priori* d'un jeu de SE prioritaires à différents niveaux d'organisation, (ii) l'analyse des interactions entre ces SE (plus particulièrement des antagonismes), (iii) la construction de compromis sociaux (choix de SE prioritaires) considérant ces antagonismes biophysiques, (iv) la conception de systèmes dont il est fait l'hypothèse qu'ils permettront d'atteindre les objectifs fixés puis (v) leur évaluation. Dans ces approches, l'identification des leviers d'actions pour le développement des SE, les phénomènes d'antagonisme et synergie, les boucles de rétroaction qui les déterminent, et la nature des pressions qui limitent l'expression des SE est une information clef pour des gestionnaires d'espaces (Birkhofer *et al.*, 2015 ; Brunner *et al.*, 2015 ; Mastrangelo *et al.*, 2014 ; Bennett *et al.*, 2009, 2015 ; Sayer *et al.*, 2013 ; Cumming *et al.*, 2013).

10.1.1.5. Perspectives de recherche

Comme cela a été réalisé pour présenter les relations entre caractéristiques des prairies et niveaux de SE (Cf. section 10.2), l'évaluation qualitative de l'importance relative des différentes caractéristiques des écosystèmes de grandes cultures sur le niveau de fourniture des différents SE considérés dans EFESE-écosystèmes agricoles reste à réaliser. Cette représentation qualitative et synthétique pourrait être construite à partir des informations disponibles dans la description des déterminants biophysiques de chacun des SE analysés, et des connaissances des experts impliqués dans l'étude. Elle permettrait de représenter l'importance relative des caractéristiques de composition et configuration spatiotemporelle de l'écosystème à l'échelle de la parcelle et du paysage sur le niveau de fourniture des SE (voir exemple dans Duru *et al.*, 2015a).

L'analyse des relations entre configuration de l'écosystème et du paysage, pratiques agricoles exogènes, climat, niveau de fourniture des différents SE et niveaux de production de biens agricoles semble rester le front de recherche principal pour produire des connaissances mobilisables par les acteurs pour la conception et gestion des systèmes agroécologiques (Bommarco *et al.*, 2013 ; Duru *et al.*, 2015a ; Gagic *et al.*, 2017 ; Kremen *et al.*, 2012 ; Therond *et al.*, 2017). Comme indiqué ci-avant, les caractéristiques et modalités de gestion de la transition d'un système de culture simplifié à un système diversifié fournissant un haut niveau de SE sont des questions clefs. Dans ce champ de recherche, de nombreuses questions de recherche plus précises restent à formaliser, comme par exemple : quelles sont les relations entre biodiversité aérienne et souterraine et plus particulièrement entre biodiversité planifiée, vie du sol et régulations biologiques souterraine et aérienne ? Quel est le rôle du microbiote associé aux espèces végétales (et animales) dans ces relations ? Quel est le rôle

des interactions entre plantes *via* des processus allélopathiques ? Quelles sont les possibilités de piloter ces interactions *via* la configuration spatiotemporelle des écosystèmes ?

Plus généralement, il semble nécessaire d'orienter les recherches en agroécologie sur une analyse intégrée des interactions entre conditions abiotiques, biodiversité planifiée, apports d'intrants exogènes, bioagresseurs, auxiliaires des cultures, dégâts biophysique sur les cultures et dommages qualitatif et quantitatif sur la production de biens agricoles. En effet, alors que de nombreux travaux traitent d'une partie de cette chaîne d'interaction (ex. relations entre biodiversité planifiée et régulations biologiques, entre auxiliaire(s) des cultures et bioagresseur(s), entre bioagresseurs et dommages, entre pesticide(s) et bioagresseur(s) ou auxiliaire(s)), peu de travaux traitent de la chaîne d'interaction complète. Plus particulièrement, il existe un manque de données crucial sur les relations entre régulations biologiques (ou niveau de bioagresseurs) et dommages (ex. pertes de rendement) (Nelson, 2017). Cela semble fortement limiter la possibilité de traduire les connaissances scientifiques en informations actionnables par les gestionnaires des écosystèmes agriculteurs et les décideurs publics. L'enjeu ici serait d'estimer le niveau et la variabilité des effets potentiels des SE relativement aux niveaux des effets obtenus avec des méthodes de contrôles des bioagresseurs basés sur les intrants exogènes. Comme indiqué ci-dessus, l'enjeu serait aussi de définir des pratiques agricoles exogènes qui ne remettent pas en cause le niveau des SE à court et moyen long-terme. En complément, les recherches sur le poids relatif de la composition et configuration du paysage sur les SE de régulation biologique pour différents systèmes de culture sont nécessaires (voir ci-dessus). Autrement dit l'enjeu est de développer des approches intégrées tel que préconisées par exemple par Hagen *et al.* (2012) ou Bohan *et al.* (2016).

Enfin, concernant le cycle des nutriments, l'enjeu est de développer des configurations d'écosystèmes et des pratiques exogènes qui permettent d'augmenter la fertilité physique, chimique et biologique des sols (CF. section 8.4). Dans cet objectif, de manière convergente avec les objectifs de stockage de carbone pour la régulation du climat, l'amélioration et la gestion de l'état organique des sols semblent être au cœur des questions de recherche (voir par ex. Drinkwater et Snapp, 2007).

10.1.2. Évaluation biophysique du niveau de production de biens végétaux par les plantes cultivées

Expert coordinateur : Olivier Therond

Contributeurs scientifiques : Céline Schott, Thomas Poméon, Thomas Puech

Ingénierie de données : Camille Dross, Céline Schott, Thomas Poméon, Anne Meillet, Thomas Puech.

10.1.2.1. Méthodologie et indicateurs pour l'évaluation biophysique du niveau de production de biens végétaux par les plantes cultivées

Méthodologies d'évaluation existantes

Calcul de la production totale de biens végétaux à partir des plantes cultivées

Deux grands types d'indicateurs sont utilisés pour évaluer et cartographier le niveau de production des biens agricoles végétaux.

Le premier type d'indicateurs, utilisés notamment dans le projet MAES, permet d'évaluer ce niveau de façon directe, il regroupe des indicateurs de quantité physique de biens végétaux consommables (alimentation humaine et animale) ou utilisables pour la production d'énergie (ex. tonnes ou quintaux de grains produits par an, tonnes de Matière Sèche produites par an) (v. Oudenhoven *et al.*, 2012 ; Ausseil *et al.*, 2013 ; Pan *et al.*, 2013 ; Maes *et al.*, 2014) ou par des indicateurs exprimant la quantité d'énergie produite (ex. en calorie, Felipe-Lucia *et al.*, 2014 ; Maes *et al.*, 2014). Ces indicateurs de quantité de biens agricoles végétaux produits sur un territoire donné peuvent être renseignés par des données primaires issues des statistiques agricoles nationales (Maes *et al.*, 2014. En France, ces données primaires sont librement accessibles *via* les Statistiques Agricoles Annuelles (SAA) qui publient des données concernant les surfaces, les rendements et les quantités récoltées

des couverts végétaux cultivés, selon une nomenclature très détaillée. Ces données primaires présentent toutefois deux inconvénients : (i) elles ne permettent pas de distinguer la vocation alimentaire ou énergétique des cultures et n'apportent pas d'information sur les cultures pérennes à vocation énergétique et (ii) elles ne sont disponibles qu'à des résolutions spatiales grossières (France, région et département).

Pour évaluer et cartographier le niveau de production des biens agricoles végétaux à des résolutions spatiales plus fines, les méthodes utilisées dans la littérature sont souvent basées sur l'utilisation de données secondaires, qui caractérisent l'occupation des sols (Crossman *et al.*, 2013). Le niveau de production est ainsi fréquemment approximé par les surfaces allouées aux différents types d'écosystèmes cultivés (ex. en hectare pour un territoire donné ou en kilomètre s'il s'agit d'une haie ou d'une lisière de forêt) (Maes *et al.*, 2011).

Sur la base de ces indicateurs, le niveau de production de biens agricoles végétaux peut également être approché en combinant plusieurs sources d'information disponibles à des résolutions spatiales différentes (Kandziora *et al.*, 2013a ; Crossman *et al.*, 2013) : des quantités de biens végétaux produits peuvent être calculées à une résolution spatiale fine (ex. la commune, l'îlot de culture) en combinant des rendements végétaux disponibles à une résolution spatiale grossière (ex. le département dans les SAA) et des surfaces par culture disponibles à la résolution spatiale plus fine. Bien que produisant des informations à une résolution spatiale plus fine, ces méthodes s'appuient sur des données de niveau de production qui sont du même ordre que celles du premier type présentées ci-avant. C'est donc l'affectation des surfaces de production par type de production (ex. culture) qui est plus précise

Calcul de la part de la production de biens végétaux non liée aux intrants exogènes

La détermination de la part de la production agricole liée aux SE « intrants » relève d'un front de recherche émergent. Elle demande de distinguer la part relative de l'effet des intrants anthropiques (énergie, irrigation, fertilisation, pesticides) de celle des SE « intrants ». Autrement dit, **elle nécessite, sur une période de temps donnée, de distinguer la part de la production agricole permise par l'écosystème agricole, considérant un état initial donné, de celle permise par les apports d'intrants exogènes dans cet écosystème pour cette période de temps**. A ce jour, il existe un nombre très limité d'études ayant tenté d'opérer ce partitionnement (ex. Bengtsson, 2015). Cet enjeu n'est pas propre aux écosystèmes agricoles mais plus généralement lié aux écosystèmes anthropisés fournissant des biens (goods) (Albert *et al.*, 2015 ; Heink *et al.*, 2015 ; Kandziora *et al.*, 2013a,b ; van Reeth, 2014 ; Remme *et al.* 2014). Il n'existe cependant pas d'accord sur la ou les méthodes permettant de partitionner les effets relatifs de ces deux types de facteur de production sur la production de biens agricoles. Aussi, la production totale reste largement utilisée comme proxy du SE d'approvisionnement rendus par l'agriculture (Maes *et al.*, 2014).

Néanmoins, pour approcher ce niveau de production non liée aux intrants exogènes, Maes *et al.* (2011) proposent d'établir un bilan net de l'énergie issue de la production agricole dégrevé de l'énergie correspondant aux quantités de fertilisants, d'eau, de phytosanitaire et de travail apportées (Maes *et al.*, 2011). Bien que cette approche représente une réelle avancée pour traiter de la question de la relation entre modes de production agricole et niveau de production de biens agricoles par l'écosystème, elle présente plusieurs limites et faiblesses. D'un point de vue méthodologique, elle nécessite de traduire les différents inputs en unité d'énergie afin d'assurer la commensurabilité des différentes variables manipulées. Le référentiel de coefficients de transformation des différentes catégories d'inputs en équivalent énergie peut fortement déterminer les résultats de l'analyse. D'un point de vue conceptuel, cette méthode s'abstrait de la prise en compte des interactions entre apport d'intrants, SE potentiel et impacts négatifs des apports d'intrants. Elle s'abstrait des aspects dynamiques très déterminant de la capacité des intrants à répondre aux objectifs de réduire ou lever les facteurs limitants et réducteurs du niveau de production agricole. Par exemple, dans cette méthode les quantités d'intrants qui circulent au-delà de l'écosystème agricole (ex. azote volatilisé et lixivié, émissions de N₂ et N₂O, eau d'irrigation percolée ou ruisselée) sont considérées comme participant à la production agricole et, par construction méthodologique, viennent donc réduire le niveau estimé de SE effectif. Autre exemple, alors que les intrants exogènes peuvent avoir une efficacité réelle limitée (ex. régulation des bioagresseurs) dans cette méthode ils sont considérés comme totalement efficace, et ce quelles que soient les caractéristiques des situations de production.

Pour remédier aux faiblesses de cette méthode, il est possible d'utiliser des modélisations dynamiques du fonctionnement des écosystèmes pour représenter les interactions entre apports d'intrants exogènes, SE potentiel et effectif. Ce type de modélisation est largement employé pour l'analyse des impacts négatifs des activités agricoles relatifs aux cycles de l'azote et aux émissions de GES et pour l'analyse des flux d'eau et du cycle du carbone dans les écosystèmes agricoles. La grande limite de ces méthodes de modélisation est que, le plus souvent, elles ne représentent pas les effets combinés et les interactions entre stress biotiques et abiotiques et des pratiques pour les lever. Actuellement, à notre connaissance, peu d'évaluation des SE rendus par les écosystèmes agricoles sont basés sur l'utilisation de ce type de modélisation dynamique. EFESE-écosystèmes agricoles, en mobilisant ce type d'approche, propose donc **un premier pas vers une évaluation de la part de la production agricole permise par les SE intrants, relatifs à la fourniture de l'azote et la restitution de l'eau, prenant en compte la dynamique journalière des interactions entre apports intrants et processus écologiques.**

Méthodologies d'évaluation retenues dans le cadre d'EFESE-écosystèmes agricoles

Dans EFESE-écosystèmes agricoles nous avons réalisé l'évaluation biophysique de la production de biens végétaux agricoles suivant deux approches :

- 1) L'évaluation du niveau total de production de biens agricoles végétaux en combinant les sources d'information statistique sur les rendements à la résolution départementale et sur les surfaces de production agricoles par PRA.
- 2) L'évaluation du niveau de production permis par les SE « intrants » de fourniture en azote et de restitution de l'eau *via* le dispositif de simulation dynamique du système sol-plante basé sur l'utilisation des modèles STICS pour les systèmes de grandes cultures et PaSim pour les systèmes de prairies (Cf. section 10.2 et Annexe 8-A).

10.1.2.2. Résultats et analyse

Dans cette section nous décrivons tout d'abord les caractéristiques de configuration spatiotemporelle des écosystèmes de grandes cultures en France puis les pratiques agricoles exogènes mis en œuvre pour les gérer. Dans un deuxième temps nous présentons les résultats d'évaluation du niveau total de production de biens agricoles végétaux puis l'évaluation du niveau de production permis par les SE « intrants » de fourniture en azote et de restitution de l'eau.

Description de la distribution spatiale de la configuration des écosystèmes agricoles en France

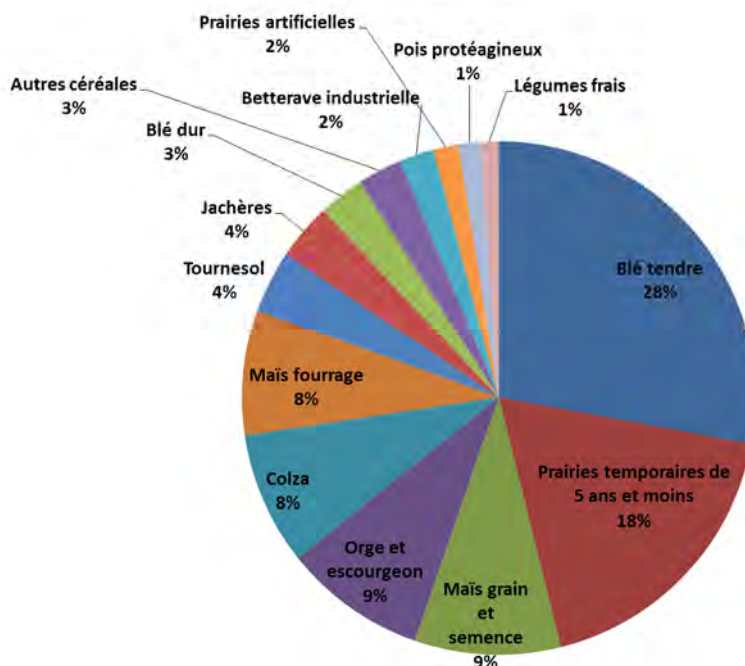
Assolement

En 2010, la surface agricole utilisée par les exploitations agricoles⁴ (SAU) en France est d'environ 27Mha (hors pacages collectifs), pour 491378 exploitations agricoles (soit environ 56 ha par exploitation) d'après le Recensement Agricole de 2010. Au sein de cette SAU, les surfaces en grandes cultures représentent 15Mha (soit 56% de la SAU en 2010), celles en prairies temporaires 3.2Mha (12% de la SAU), alors que les surfaces toujours en herbe (STH) sont de 7,6Mha (soit 28% de la SAU) - les 4% restants correspondant aux vignes et autres cultures pérennes.

Les cultures les plus présentes (Figure 10-1-3) sont, en 2010, le blé tendre (19%), les prairies temporaires (12%), le maïs grain et semence (6%), l'orge et escourgeon (6%), le colza (6%), le maïs fourrage (5%) et le tournesol (3%).

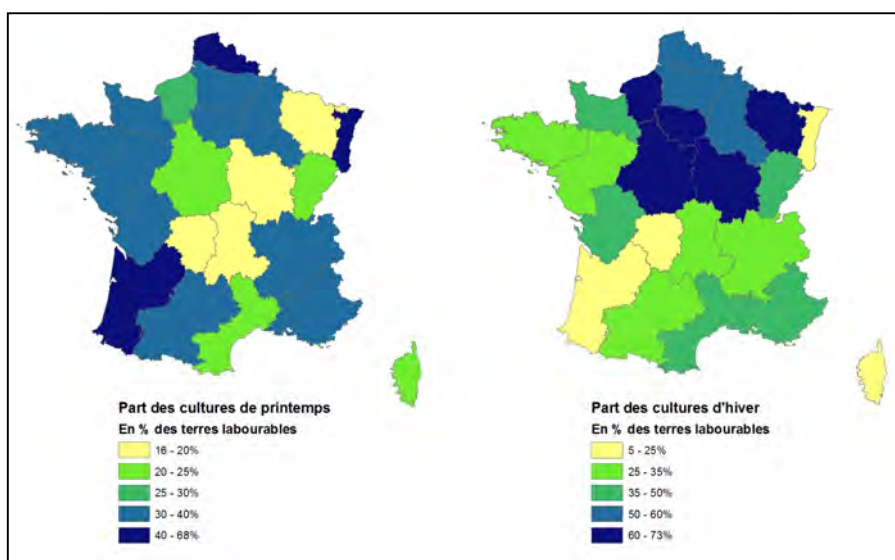
⁴ Dans la statistique agricole française, la définition de la Surface Agricole Utilisée (SAU), commune à toutes les enquêtes, a évolué au cours du temps. Depuis les années 1970, les SAA distinguent la SAU des exploitations (identique à celle définie dans le RA) et la SAU du département qui inclut la SAU détenue par des exploitations non professionnelles ou des particuliers (l'écart entre les deux s'élevant à environ 2 million d'hectares, le plus souvent de surfaces en herbe peu productives). Depuis 2010, le RA inclut dans la SAU les superficies de pacages collectifs, ce qui représente une différence d'environ 800 000 ha avec les recensements précédents, principalement localisés en zones de montagne.

Figure 10-1-3. Part des différentes grandes cultures à l’échelle de la France en 2010 (en % de la SAU)
(Source : Recensement Agricole)



La distribution spatiale par région des cultures de printemps et des cultures d’hiver est présentée dans la figure 10-1-4. La proportion de cultures de printemps par rapport à la surface en terres labourable à l’échelle nationale est d’environ de 37% en 2011 (Agreste). Les régions où ces cultures sont les plus importantes dans l’assolement sont l’Aquitaine, l’Alsace et le Nord-Pas-de-Calais (forte présence de monoculture de maïs dans les deux premières régions et de betteraves dans la dernière). En revanche, leur part est très faible en Lorraine, Bourgogne, Auvergne et Limousin (couverture du sol assurée par les prairies temporaires et/ou les cultures colza-blé-orge).

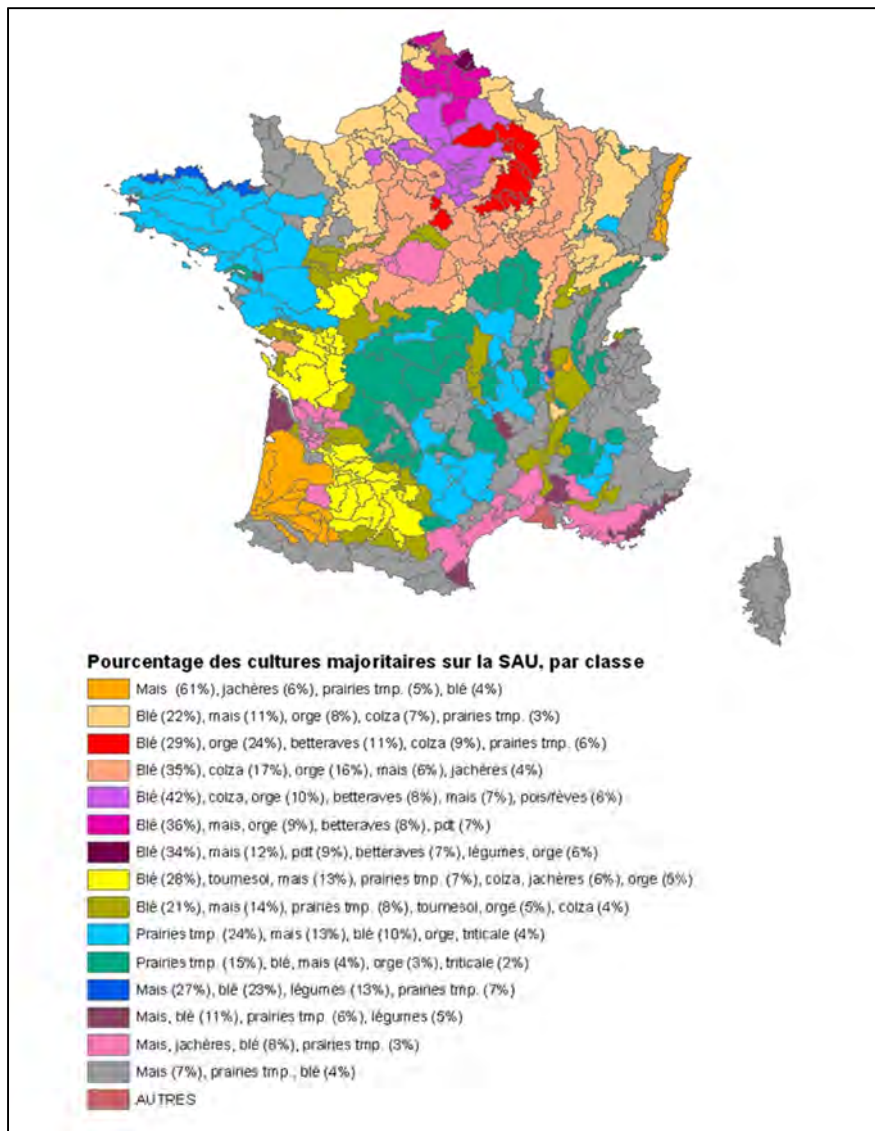
Figure 10-1-4. Part de cultures de printemps et de cultures d’hiver en pourcentage des terres labourables par région administrative en 2010 (Source : Statistiques Agricoles Annuelles)



La présentation de la distribution spatiale des différentes cultures est réalisée dans les compléments ajoutés en fin de section.

L'analyse de la part des surfaces de culture dans la SAU des PRA sur la période 2006-2009 *via* une analyse en composante principale et une classification ascendante hiérarchique a permis à l'UMR ASTER (Inra) de développer une typologie des PRA en 16 classes, selon leurs cultures annuelles dominantes (Figure 10-1-5). Cette typologie fournit une vision synthétique des de la distribution des types d'assolement en France. Elle permet de visualiser des PRA présentant des assolements similaires au travers de la France comme par exemple la Bretagne, le nord-est et le sud du massif central, basé sur des prairies temporaires, maïs blé, orge et triticale. Elle permet également de visualiser et caractériser les assolements des différentes PRA des grands bassins de cultures en France comme le grand bassin parisien.

Figure 10-1-5. Typologie des régions agricoles selon les cultures annuelles majoritaires en 2006-2009 (Source Teruti-Lucas)



Séquences de cultures

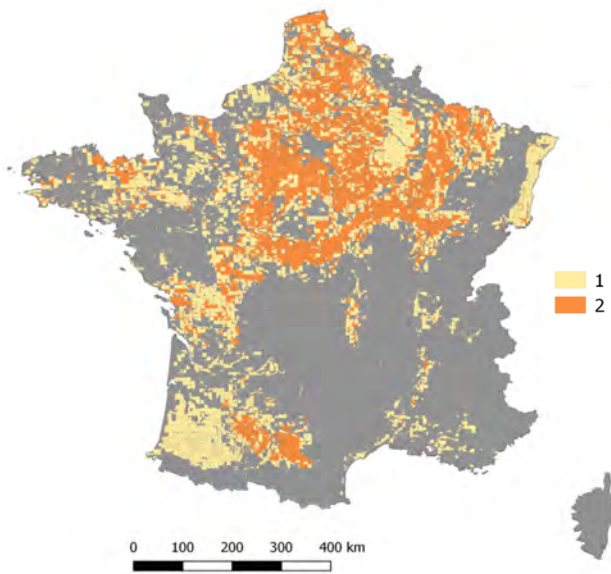
L'analyse de la base de données sur les séquences et rotation de cultures de cultures produite par l'INRA permet de représenter la distribution spatiale des monocultures de céréales à paille (blé tendre ou blé dur principalement) et de maïs, de rotation courte de 2 à 3 ans et de rotation plus longue de 3 ans et plus (Figure 10-1-6). Les monocultures de maïs représentent de 50 à plus 75% de la surface en grande culture dans le sud-ouest, dans certaines zones de l'Alsace et le long de la Dordogne et de ces principaux affluents, ainsi que sur le versant ouest du massif central. Elles sont également significativement présentes dans la presqu'île du Cotentin. Les monocultures de céréales à paille sont très présentes dans la bassin méditerranéen (ex. monoculture de blé

dur), dans plusieurs zones du massif central (ex. monoculture de triticale) et en Bourgogne. Les rotations de 2 à 3 ans se répartissent un peu partout en France avec une présence plus marquée dans le bassin de la Garonne (ex. rotation blé-(blé-) tournesol), en Bretagne et Normandie (ex. maïs-blé), et dans le bassin parisien (ex. blé-orge-colza). Les rotations de plus de trois ans, sont aussi très réparties sur la France, avec quelques poches où elles représentent plus de 66% de la surface en grande culture, comme dans le grand est et la Beauce. Une analyse plus fine des caractéristiques de ce dernier type de rotations reste à réaliser de manière à évaluer la diversité des cultures et espèces au sein de celles-ci.

Figure 10-1-6. Distribution spatiale du nombre (a) et des différents types de rotation en fonction de leur longueur (b, c, d) dans les unités pédoclimatiques EFESE-écosystèmes agricoles

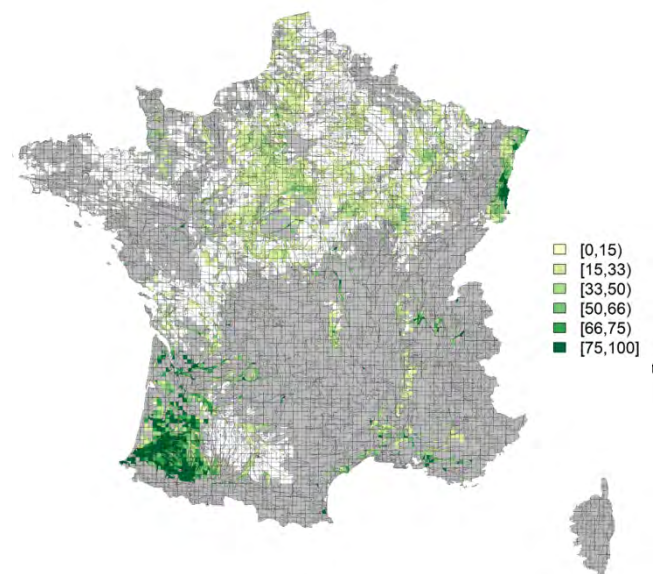
a. Nombre de rotations simulées dans chaque UPC

En gris : pas de simulation « GC »



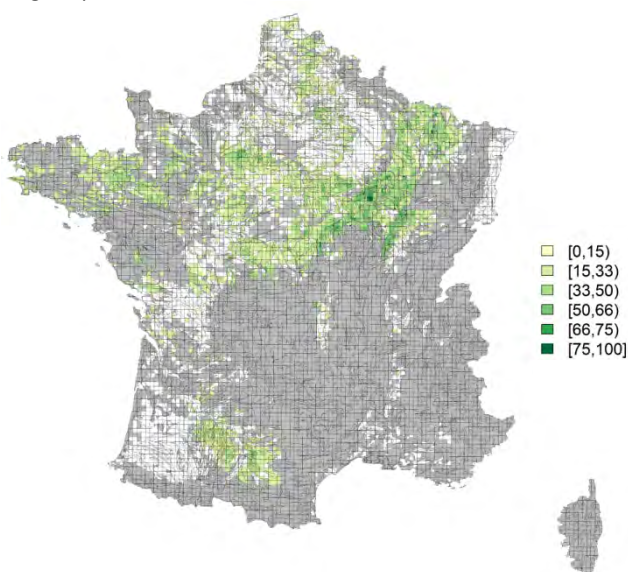
b. Proportion de monocultures simulées dans chaque UPC

En gris : pas de simulation « GC »



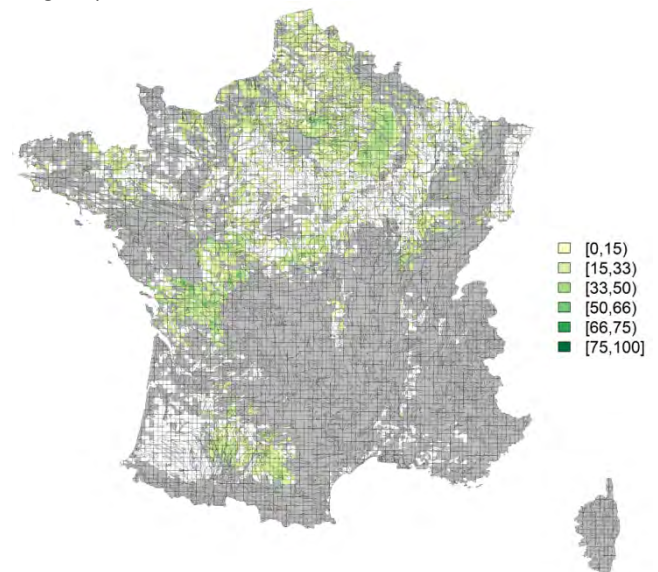
c. Proportion de séquences de cultures simulées dont la durée est de 2 à 3 ans dans chaque UPC

En gris : pas de simulation « GC »



d. Proportion de séquences de cultures simulées dont la durée est supérieure ou égale à 4 ans dans chaque UPC

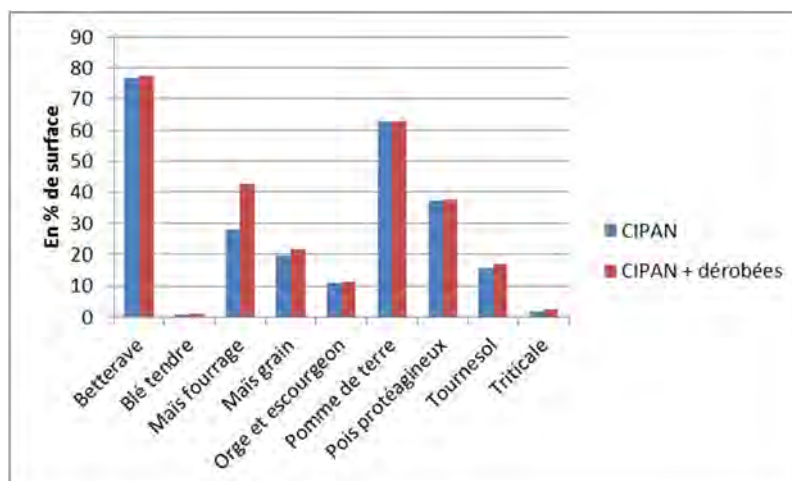
En gris : pas de simulation « GC »



Couverts intermédiaires

L'obligation, en zones vulnérables azote, de couvrir le sol laissé à nu pendant la période automnale, y.c. par l'implantation d'une couverture intermédiaire (CI) de type CIPAN, dérobées, repousses ou résidus broyés, ne concerne que les intercultures longues, à savoir celles qui précèdent une culture de printemps. L'implantation de CIPAN et cultures dérobées concerne essentiellement les cultures de printemps (Figure 10-1-7), même si cette pratique s'observe occasionnellement avant une céréale d'hiver (1% avant blé et 2% avant triticale). Les cultures dérobées n'existent presque exclusivement qu'en précédant maïs fourrage (14,7% des surfaces).

Figure 10-1-7. Part de cultures intermédiaires avant l'implantation d'une culture en 2011 (CIPAN seules ou avec cultures dérobées) (Source : Enquête Pratiques culturales 2011)



Avant betterave, environ 77% des surfaces sont couvertes par une CIPAN mais la proportion varie de 54% en Haute-Normandie à 89% en Champagne-Ardenne. La pomme de terre, précédée de 63% des surfaces par une CI, connaît les mêmes tendances géographiques (de 43% dans le Centre à 75% en Champagne-Ardenne). Idem pour le tournesol, qui n'est précédé d'une CI que sur 17% des surfaces, principalement situées dans le nord de la France. Pour l'orge (11% des surfaces concernées), c'est en Champagne-Ardenne, Ile-de-France et Picardie que les CI sont les plus présentes, en lien avec une proportion plus forte d'orge de printemps (Figure 10-1-8).

Pour le pois (38% de CI), le maïs fourrage (43% de CI) et grain (environ 22% de CI), mais également le triticale et le blé, c'est en Bretagne que les taux d'implantation de CI sont les plus forts (>60% pour les cultures de printemps et autour de 6% pour les cultures d'hiver). En revanche, dans la moitié sud de la France, ces taux sont très faibles, voire nuls, sauf pour le maïs fourrage (où on observe encore 37 à 38% de CI en Rhône-Alpes ou Midi-Pyrénées).

L'influence de la délimitation en zones vulnérables se remarque pour certaines cultures, notamment le maïs qui, en 2011, est précédé d'une culture intermédiaire sur 26% de sa surface en zone vulnérable, contre seulement 5% en zone non vulnérable (Agreste, 2014). Le rapport est un peu moins important pour le maïs fourrage. L'influence des zones vulnérables est beaucoup plus faible pour les autres cultures.

A l'échelle de la France, les principaux couverts utilisés comme CIPAN sont la moutarde (55% des surfaces), suivie des céréales (19%). Les autres couverts représentent environ un quart des surfaces implantées en CIPAN (Figure 10-1-9).

Figure 10-1-8. Part de cultures intermédiaires avant l’implantation d’une culture par région en 2011
(Source : Enquête Pratiques culturales 2011)

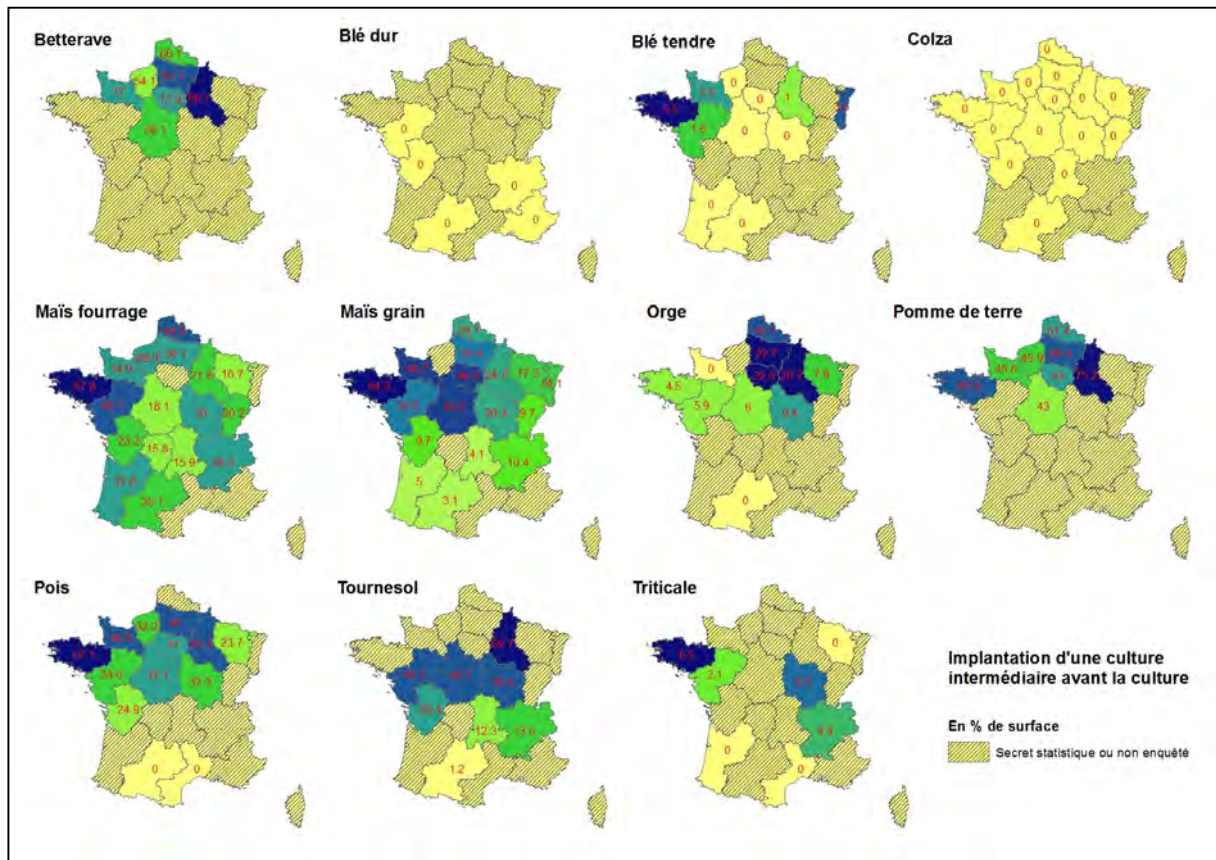
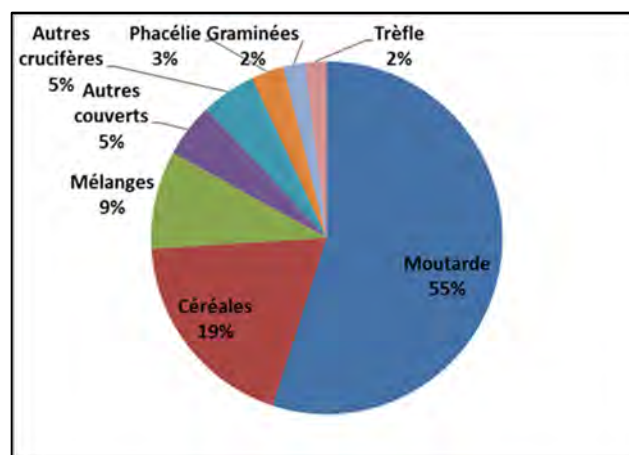
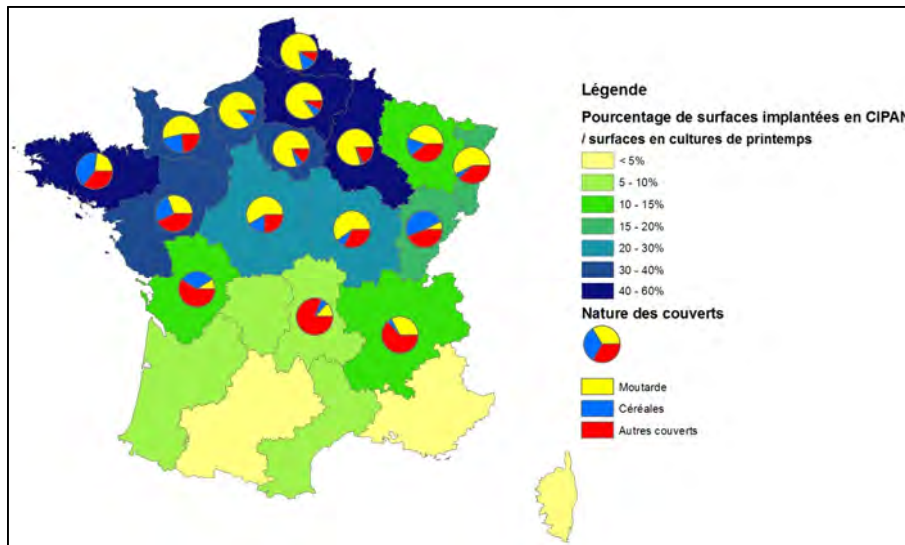


Figure 10-1-9. Nature des couverts utilisés comme CIPAN en 2011 (en % de surface) – (Source : Enquêtes Pratiques Culturales 2011)



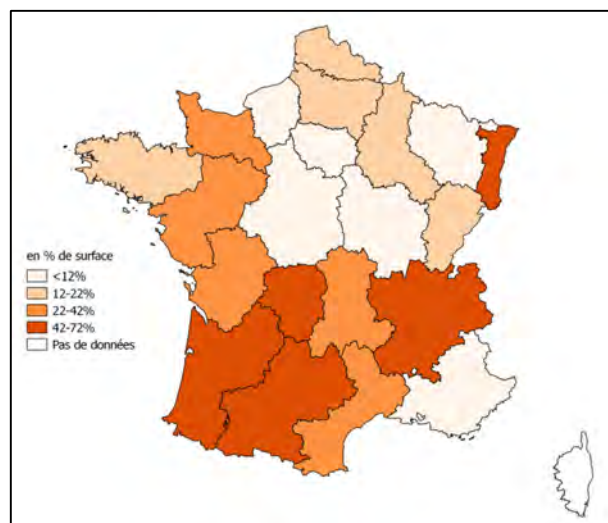
En synthèse de ces grandes tendances, les régions où la part de cultures de printemps précédée par une culture intermédiaire est beaucoup plus forte sont dans le nord de la France (Bretagne, Champagne, Ardenne, mais également Picardie et Nord-Pas-de-Calais) où on atteint en 2010 plus de 40% des surfaces en cultures de printemps précédées d’une CI (Figure 10-1-10). En revanche, les régions Midi-Pyrénées et PACA n’atteignent pas les 5% de ces surfaces.

Figure 10-1-10. Pourcentage de cultures de printemps précédées par une CIPAN en 2010 et nature de ces CIPAN en 2011 par région (Sources : Recensement Agricole 2010 et Enquête Pratiques Culturelles 2011)



En conclusion, la part de sols restant vraiment nus en hiver serait de 20% en 2011 (Agreste, 2011). Les régions concernées sont essentiellement celles où se pratique la monoculture de maïs (Alsace, Rhône-Alpes, Aquitaine, Midi-Pyrénées) où la proportion de sols nus en hiver dépasse les 40% des surfaces en grandes cultures (Figure 10-1-11).

Figure 10-1-11. Part de surfaces en grandes cultures restant nues en hiver (en % de surface en grandes cultures) (Source Agreste 2011)



Description de la distribution spatiale des pratiques agricoles en France

Pratiques de labour et non labour à l'échelle de l'année

La pratique du labour est plus fréquente pour les cultures de printemps (maïs grain et fourrage, tournesol...) alors que celle des Techniques Culturelles Sans Labour (TCSL) est plus fréquente pour les cultures d'automne, telles que le colza, le blé tendre et le blé dur (Labreuche et Wissocq, 2016). En 2011, les TCSL sont appliquées sur 58% des surfaces en blé dur, 51% de celles en colza, 43% pour le blé tendre, puis entre 13 et 31% pour les autres cultures (Figure 10-1-12). La distribution de cette pratique est très contrastée à l'échelle régionale (Figure 10-1-13).

Figure 10-1-12. Part de non labour par culture en France (Source : Enquête Pratiques Culturelles 2011)

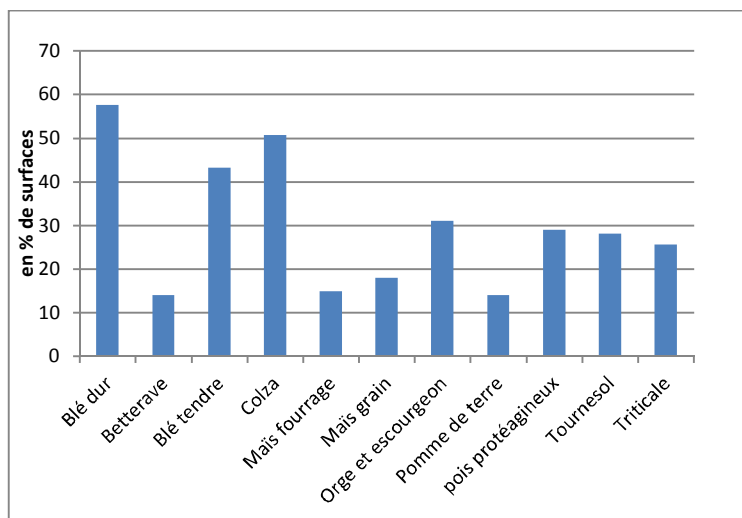
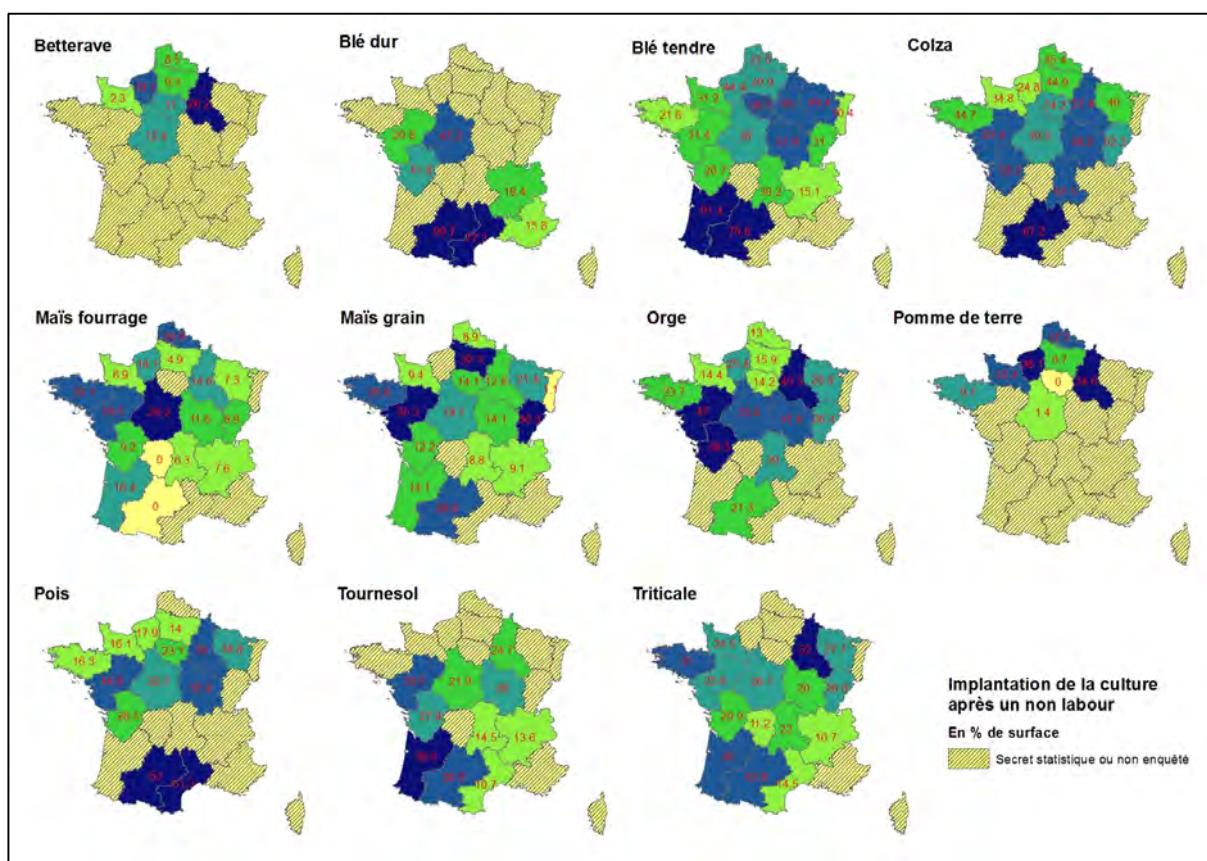


Figure 10-1-13. Estimation du non-labour avant implantation d’une culture en pourcentage de surface par culture et par région (Source : Enquête Pratiques Culturelles 2011)



Ainsi pour la betterave, c’est la Champagne qui est la région la plus concernée (26% des surfaces), contre 2% en Haute-Normandie. On retrouve les mêmes tendances pour l’orge (avec les Pays de Loire et le Poitou-Charentes), la pomme de terre (avec la Haute-Normandie) et le triticale (suivi du sud-ouest et de la Bretagne). Pour le blé dur, on dépasse les 3/4 des surfaces en TCSL annuelle en Midi-Pyrénées et Languedoc-Roussillon, tandis qu’il n’y a que 15% des surfaces en PACA. Pour le blé tendre, c’est en Midi-Pyrénées et Aquitaine que le non labour annuel est également le plus important (près de 80%, voire 91% en Aquitaine), mais seulement 10%

en Alsace, 15% en Rhône-Alpes et 22% en Bretagne. Pour le colza, même tendance avec 87% des surfaces en non labour annuel en Midi-Pyrénées mais entre 25 et 35% en Normandie.

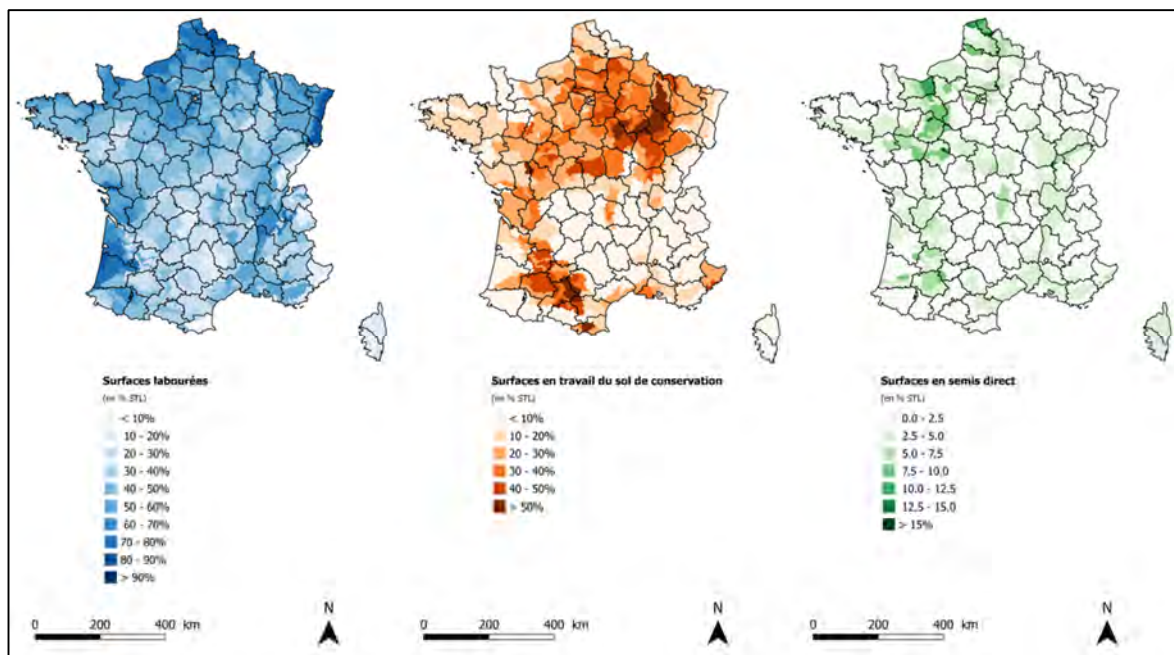
Pour le maïs fourrage c'est le Centre qui pratique le plus le non labour annuel (ainsi que le Nord et la Bretagne et Pays de Loire), tandis que pour le maïs grain, ce sont les Pays de Loire, la Picardie et la Franche-Comté.

D'après le recensement agricole 2010, le labour est particulièrement développé dans le nord de la France (plus de 80% des surfaces en Terres Labourables) et le long du littoral de la Manche, ce qui peut s'expliquer par une forte proportion de culture de printemps, mais également par un climat océanique marqué (Figure 10-1-14). En Alsace et dans les Landes (et dans une moindre mesure en région Rhône-Alpes), la fréquence du labour est directement à mettre en relation avec la monoculture de maïs.

Les TCSL, globalement moins développés que le labour, dominent dans certaines régions céréalières, en particulier en Meuse, Haute-Marne et Haute Garonne où ces surfaces sont supérieures à 50% des STL. Dans le nord de la France, on note que ces surfaces sont particulièrement développées sur les plateaux du Barrois et dans le Pays d'Othe, où dominent les systèmes de culture de type « colza-blé-orge d'hiver » composés de cultures d'automne. Dans le sud-ouest de la France, ce sont les régions agricoles du Lauragais et du Conflent qui sont particulièrement concernées, du fait de l'importance de systèmes « blé tendre/dur – tournesol ».

Les techniques de semis direct sont des pratiques relativement confidentielles et rarement développées sur des surfaces excédant 10% des terres arables à l'échelle de la région. Elles semblent plutôt localisées dans le nord-ouest de la France, soit dans des régions fortement marquées par la présence d'élevage (Perche, Pays d'Auge), soit dans des régions avec des systèmes de culture assez particuliers (Flandres, Val de Loire, Saumurois).

Figure 10-1-14. Méthode de travail du sol (pour les cultures de la campagne 2009-2010) en pourcentage des surfaces en terres labourables (Source : RA 2010)



Comme indiqué dans le chapitre 6, ces résultats fournissent des informations sur les pratiques de travail du sol une année donnée pour une culture donnée, mais n'apportent pas d'information sur la pratique du non labour à l'échelle du système de culture. Il est courant qu'un agriculteur alterne labour et TCSL sur une même parcelle : le labour est réalisé à chaque fois que la parcelle (abondances d'adventices, présence de résidus en trop grande quantité ou infectés, structure du sol dégradée) ou le climat l'exigent. Ce labour occasionnel ou simplification partielle du travail du sol est opposée à la simplification totale (Boisgontier *et al.*, 1994) basée sur un non labour systématique pour toute la durée de la rotation (Labreuche *et al.*, 2007).

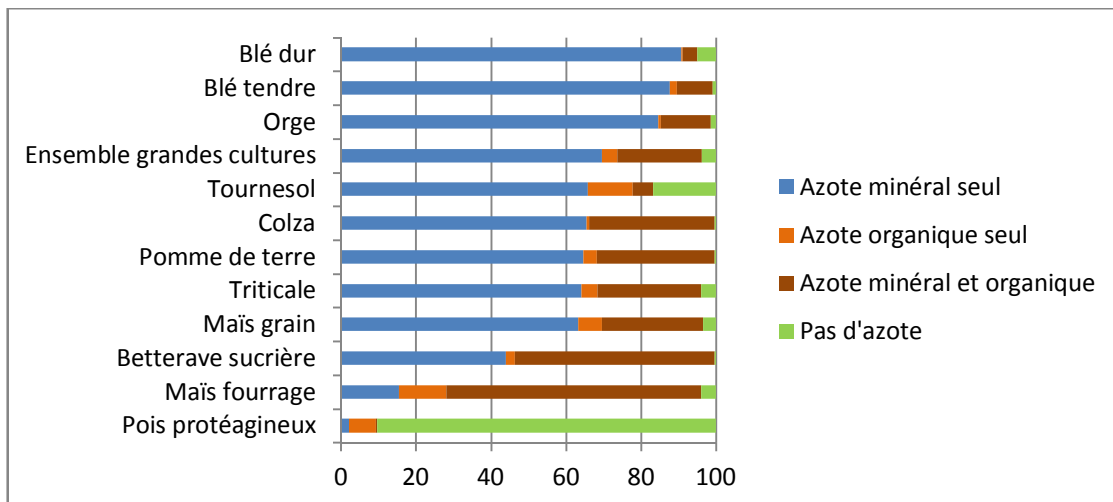
Il existe peu d'enquêtes permettant de caractériser les modalités de travail du sol sur un pas de temps pluriannuel. Les travaux de Labreuche *et al.*(2007) et de Labreuche et Wissocq (2016)⁵ montrent que sur la période 2001-2006, les stratégies d'alternance du labour et des techniques culturales sans labour (TCSL) sont légèrement plus répandues que le labour systématique (44,6 % des surfaces contre 43,7%). Pendant la période 2006-2011, l'écart se creuse encore un peu (46,8% contre 40,3%). L'alternance entre labour et TCSL va d'un non-labour opportuniste (une à deux fois en six ans) à une pratique très occasionnelle du labour (14,5% des surfaces avec au maximum deux labours en six ans). Le non labour continu reste assez peu développé avec 11% des surfaces sur 2001-2006 et 13% sur 2006-2011. Ces résultats sont confirmés dans Agreste Primeur (2008) qui indique que 34 % des surfaces sont dispensées de labour en 2006 mais que seules 11 % n'ont jamais été retournées depuis 2001. Selon Labreuche et Wissocq (2016), la pratique des TCSL systématique est plus répandue dans le cas des rotations largement composées de cultures d'hiver (colza-blé-orge d'hiver). A contrario, les rotations très largement composées de céréales, soit de printemps (maïs-maïs), soit alternant automne et printemps (maïs-blé), incluent assez rarement du non labour continu. Le même phénomène est observé pour des rotations incluant de la prairie temporaire.

Fertilisation azotée

Certaines cultures reçoivent presque exclusivement des engrais minéraux (70% des surfaces en 2011) alors que d'autres reçoivent à la fois des engrais organiques et minéraux (22% des surfaces en 2011). La part des surfaces sans fertilisation azotée (minérale ou organique) plafonne à 4 % de la sole, dont la moitié est constituée des cultures de pois et de tournesol. La part des surfaces ne recevant que des apports organiques est de 4% (Agreste, 2014).

Globalement, toutes les cultures, à l'exception du pois et de certains maïs et tournesol, reçoivent un engrais azoté minéral (Figure 1-1-15). La fertilisation organique concerne 81% des surfaces en maïs fourrage, 56% de celles en betterave, environ un tiers des surfaces en colza, pomme de terre, triticales, maïs grain, 17% de celles en tournesol. Elle est beaucoup moins fréquente sur les céréales à paille (4% sur blé dur, 10% sur blé tendre et 14% sur orge).

Figure 10-1-15. Part de surface par culture ayant reçu une fertilisation organique et/ou minérale en France en 2011 (Source : Enquête Pratiques Culturelles)



⁵ Travaux sur les pratiques agricoles de travail du sol du GIS Grande Culture à Hautes Performances Economiques et Environnementales (GIS GCHP2E) : Etude des résultats de l'enquête pratiques culturales 2011 (Agreste)

Fertilisation organique

La fertilisation organique suit une distribution à l'échelle de la France fortement liée à la présence de l'élevage. Dans le cas du colza, du maïs grain, du blé dur, du tournesol et de la pomme de terre, c'est en Bretagne et/ou Pays de Loire que les apports organiques sont les plus fréquents. Mais ces grandes tendances ne se retrouvent pas pour toutes les cultures.

Pour les grandes cultures comme la betterave, c'est dans le Nord que cette culture reçoit le plus d'engrais organique, en majorité de la vinasse en Ile de France, Champagne-Ardenne et Région Centre. Pour le blé tendre, c'est en Auvergne, Bretagne et Franche-Comté alors que pour le maïs fourrage c'est en Midi-Pyrénées que les proportions de surface avec engrais organique sont les plus fortes. Cette distribution spatiale est à relativisée au regard des surfaces de ces cultures dans les régions mentionnées. La part de surface ayant reçu une fertilisation organique par culture et par région est présentée en complément 2.

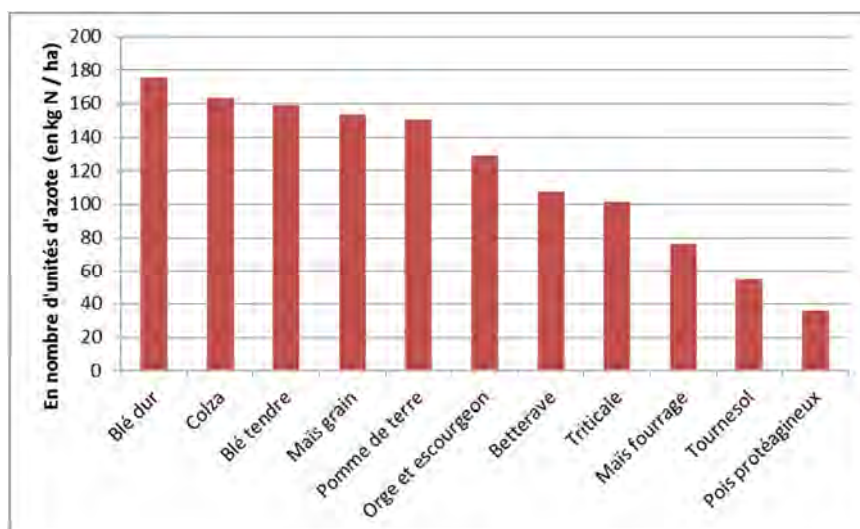
Quant à la nature de la fertilisation organique, elle est, en termes de surfaces concernées, presque toujours d'origine animale (à 88%) et en majorité issue des élevages bovins (59%). Les effluents de volailles viennent en 2^{ème} place (11%), puis ceux de porcs (10%). Les effluents hors élevage (issues de l'industrie ou du traitement des boues de STEP) ne représentent que 9% du total des surfaces concernées par un effluent organique. La nature de la fertilisation organique dominante et la dose moyenne associée, par culture et par région, est présentée dans l'Annexe 8-A.

Fertilisation minérale

En terme de répartition spatiale de la fertilisation minérale (Figure 10-1-16), pour la plupart des cultures (blé tendre, colza, maïs fourrage, maïs grain, pomme de terre et tournesol) la part de surface fertilisée avec des engrais minéraux est plus faible dans les régions d'élevage comme la Bretagne ou les Pays de Loire (Cf. complément 2).

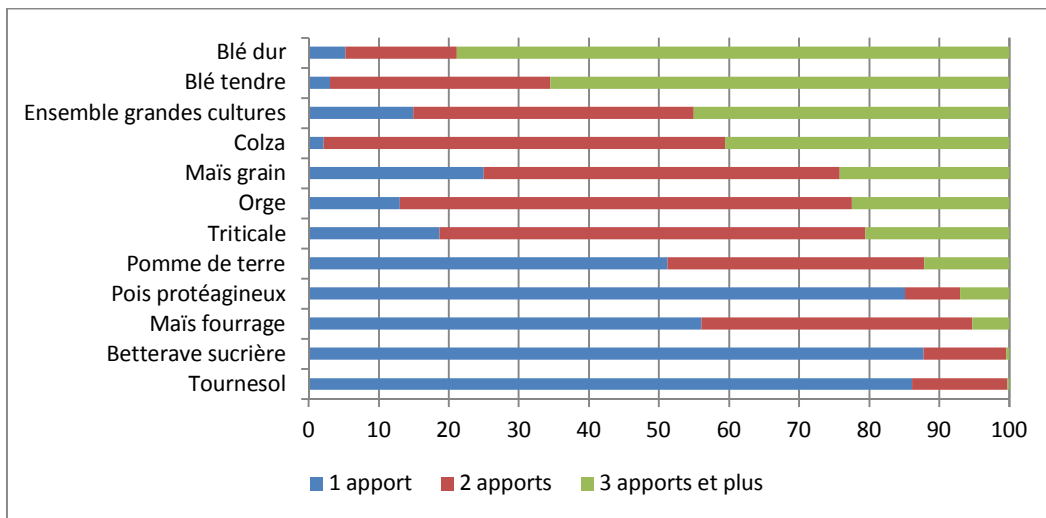
En termes de doses appliquées, les doses moyennes d'azote reçues par culture en 2011 varient de 36 kg N/ha pour le pois (moyenne calculée sur les parcelles ayant reçu un engrais minéral) à 176 kg N/ha pour le blé dur (Figure 10-1-16). Les doses de fertilisation minérale dans les systèmes de culture ne recevant que ce type de fertilisation, par culture et par région, sont présentées dans l'Annexe 8-A.

Figure 10-1-16. Dose moyenne d'azote minéral reçue par culture en France en 2011 - sur les parcelles en ayant reçu (Source : Enquête Pratiques Culturelles 2011)



En 2011, 85 % des surfaces fertilisées exclusivement par de l'azote minéral reçoivent des apports fractionnés (Agreste, 2014). Pour les surfaces uniquement fertilisées par de l'azote minéral, l'apport se fait en 3 passages en moyenne pour le blé et le colza, 2 pour l'orge, le triticale, le maïs, la pomme de terre, et 1 pour le tournesol, la betterave et le pois (Figure 10-1-17).

Figure 10-1-17. Fractionnement des apports d'azote minéral sur grandes cultures
(Source : Enquête pratiques culturales 2011)

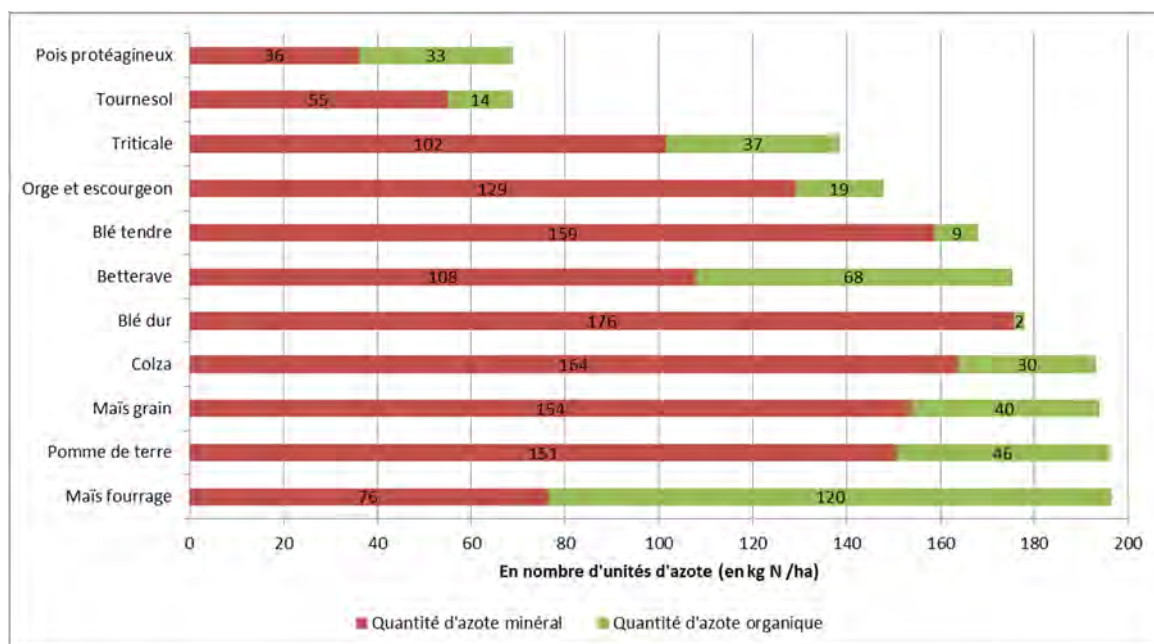


Le nombre d'apports est notamment plus faible pour les cultures dont le développement empêche les passages répétés (maïs), les cultures faiblement fertilisées en azote (tournesol) ou les cultures dont la filière aval exige une faible teneur en azote (une forte teneur en azote des racines de betterave pénalise l'extraction des sucres).

La fertilisation azotée totale

En moyenne, la dose totale apportée par culture quand on fait le cumul de la fertilisation organique et minérale est plus élevée que la dose moyenne d'azote minérale (Figure 10-1-18). Le maïs fourrage, la pomme de terre, le maïs grain et le colza arrivent en tête avec une dose moyenne comprise entre 193 et 196 kg N /ha, ces cultures étant largement fertilisées par des engrais organiques. De même, la betterave qui reçoit des doses d'azote minérale relativement faible, atteint des apports d'azote équivalents à ceux du blé dur. La quantité d'azote totale (organique et minérale) moyenne apportée par culture et par région en 2011 est présentée en complément 2.

Figure 10-1-18. Quantité d'azote totale (organique et minérale) moyenne apportée par culture en France en 2011 sur les parcelles en ayant reçu (Source : Enquête Pratiques Culturales 2011)



L'intégration de la fertilisation organique à la fertilisation totale redessine partiellement la carte des pressions azotées sauf pour les cultures comme le blé dur ou le blé tendre qui en reçoivent très peu. La betterave apparaît beaucoup plus fertilisée en Champagne-Ardenne, la pomme de terre en Bretagne, l'orge en Bourgogne, le pois en Lorraine, le tournesol en Pays de Loire et le triticale dans le sud de la France. Certaines répartitions restent sensiblement les mêmes comme pour le colza, le maïs grain, mais avec un gradient entre l'est et l'ouest beaucoup plus faible, du fait de la compensation des faibles doses d'azote minérale dans les régions d'élevage de l'ouest par des apports organiques plus abondants (résultats non représentés).

Le raisonnement de la fertilisation azotée

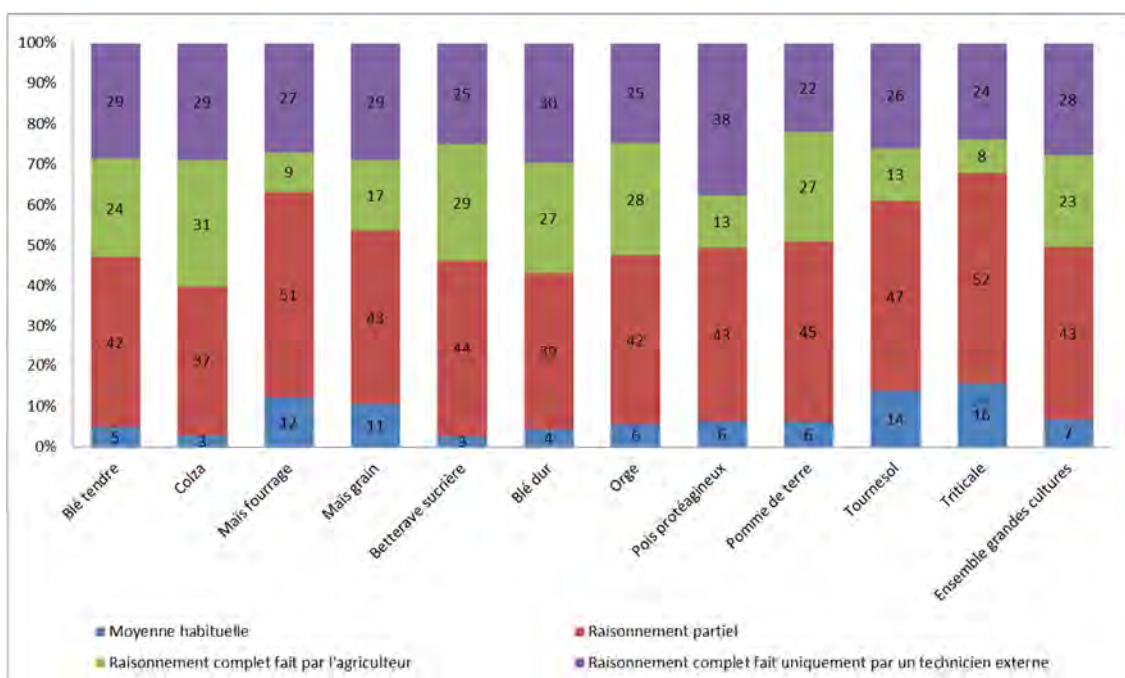
L'enquête Pratiques culturales 2011 montre que **la fertilisation organique est prise en compte presque systématiquement** par les agriculteurs au moment du calcul de la dose d'azote minéral à apporter (entre 88 et 95% des cas). Lorsqu'il y a un apport organique en complément d'apports minéraux, les surfaces fertilisées reçoivent en moyenne 46 kg/ha d'azote minéral en moins (105 kg d'azote minéral apporté par hectare, contre 151 kg en l'absence de complément organique).

Un critère de décision fréquemment pris en compte pour le calcul de la dose d'azote minérale est **la dose habituelle apportée**. Ce critère reste encore relativement élevé sur le tournesol (25% des surfaces), triticale (22%) ou le maïs fourrage (20%) dans les zones non vulnérables, mais se limite à 10% environ des surfaces des autres cultures. Ces fréquences sont beaucoup plus faibles en zones vulnérables, où ce critère n'est pris en compte que pour 10% max des surfaces cultivées et jusqu'à seulement 2% des surfaces en colza par exemple.

En dehors de ces surfaces la dose d'azote est raisonnée en fonction de critères agronomiques, notamment les besoins de la culture à chaque stade, déterminés en fonction du rendement espéré et d'une estimation de l'azote fourni par le sol. Ce dernier est estimé de façon plus ou moins précise, à partir des reliquats d'azote immédiatement disponibles, et de la minéralisation à venir de matière organique du sol et des fumures organiques apportées au cours de la campagne et des campagnes précédentes.

Le calcul de la dose d'azote par **la méthode du bilan complet**, qui prend théoriquement en compte tous ces éléments, **concerne 50 % des surfaces fertilisées en 2011**. Ce type de raisonnements est plus fréquent sur colza, pomme de terre, betterave et blé (entre 53 et 60% des surfaces), alors qu'ils ne concernent que 30 à 46 % des surfaces fertilisées du maïs et tournesol (Figure 10-1-19). **43 % des surfaces en grandes cultures reçoivent une dose d'azote selon un raisonnement établi sur un bilan partiel** (qui mobilise un seul voire plusieurs éléments de bilan parmi le précédent cultural, l'hypothèse de rendement espéré, l'estimation ou la mesure des reliquats et les apports organiques) (Agreste, 2014).

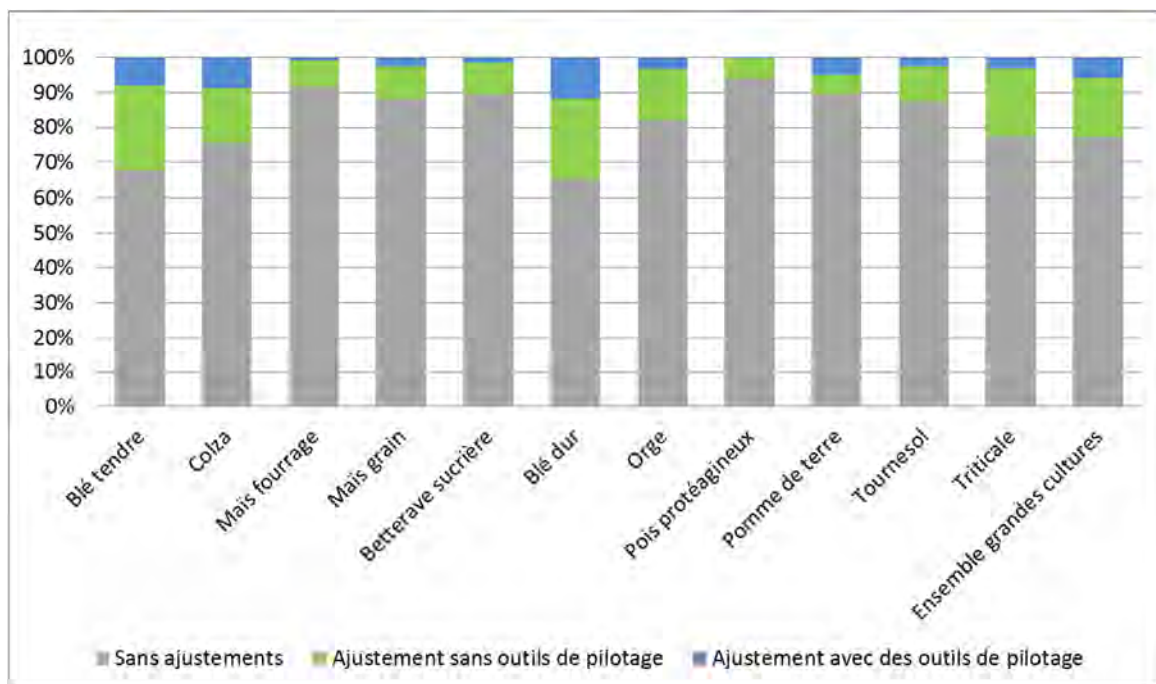
Figure 10-1-19. Part de surface selon le raisonnement de l'azote minéral
(Source : Enquête Pratiques culturales 2011)



Une fois la dose fixée en début de campagne, l'exploitant peut ajuster la dose prévue en cours de végétation et la modifier selon la quantité d'azote consommé par la culture, qui peut être estimée en fonction des conditions climatiques, de l'aspect visuel de la culture, ou bien mesurée par des « outils de pilotage ». **Le pilotage de la fertilisation azotée en court de saison concerne surtout les cultures de blé et colza** (Agreste, 2014). Ces outils de pilotage permettent d'ajuster au mieux les apports d'azote en fonction de l'azote minéral contenu dans le sol en sortie d'hiver, de l'azote contenu dans la plante, et des besoins de la culture. Parmi ceux-ci, les méthodes Jubil® et Ramsès sont basées sur l'analyse de la teneur en nitrates du jus extrait de la base de la tige (céréales à paille, maïs et pomme de terre). La méthode Hydro N tester permet d'évaluer la teneur en chlorophylle des feuilles. Dans le cas du colza, l'introduction de la réglette azote avec la méthode dite par pesée, permet de voir que, d'une année sur l'autre, la fertilisation sur une même parcelle peut varier très sensiblement. Le développement récent de Farmstar-colza® a permis aux agriculteurs de découvrir et de quantifier la variabilité qui existe au sein même des parcelles, notamment avec des colzas très développés, pour lesquels l'observation visuelle de surface est nettement insuffisante pour percevoir les différences (Lagarde et Champolivier, 2006). Ces techniques mises au point par l'Inra ou les instituts techniques agricoles sont encore marginales dans les petites structures agricoles. L'observation de la densité des plants, l'estimation des reliquats d'azote dans le sol en sortie d'hiver et la simple surveillance des parcelles sont les autres méthodes utilisées par les agriculteurs, qui peuvent d'ailleurs les combiner (Figure 10-1-20).

La modification de la dose d'azote minéral en cours de campagne n'intervient que sur un quart des surfaces des grandes cultures fertilisées en 2011 (14% en 2006). Cette pratique dépend très largement de la culture. La croissance du blé et du colza permet de fractionner et de modifier pendant la culture la dose d'azote en fonction de l'observation de la parcelle : densité, aléas climatiques et sanitaires. Ceci explique que **sur 32% des surfaces en blé tendre et 24% des surfaces en colza un ajustement en cours de campagne de la dose d'azote** a été réalisé en 2011 (dont 8 à 9% avec un outil de pilotage). Ces chiffres sont à considérer avec précaution puisqu'il peut y avoir un « effet année » lié aux conditions climatiques. Pour le maïs et la betterave cet ajustement n'intervient que dans 10% des cas environ.

Figure 10-1-20. Fréquence d'ajustement de la dose d'azote en cours de végétation
(Source : Enquête Pratiques culturales 2011)



Comme indiqué dans la section 10.2, ces informations sur les méthodes de raisonnement de l'azote laissent entendre que pour une partie significative des surfaces de grandes cultures **il reste des marges de manœuvre, importante** (ex. bilan partiel sans ajustement en cours de campagne) **pour augmenter le niveau effectif de service de fourniture en azote aux plantes cultivées considérant la capacité actuelle de l'écosystème agricole à rendre ce SE.**

Irrigation

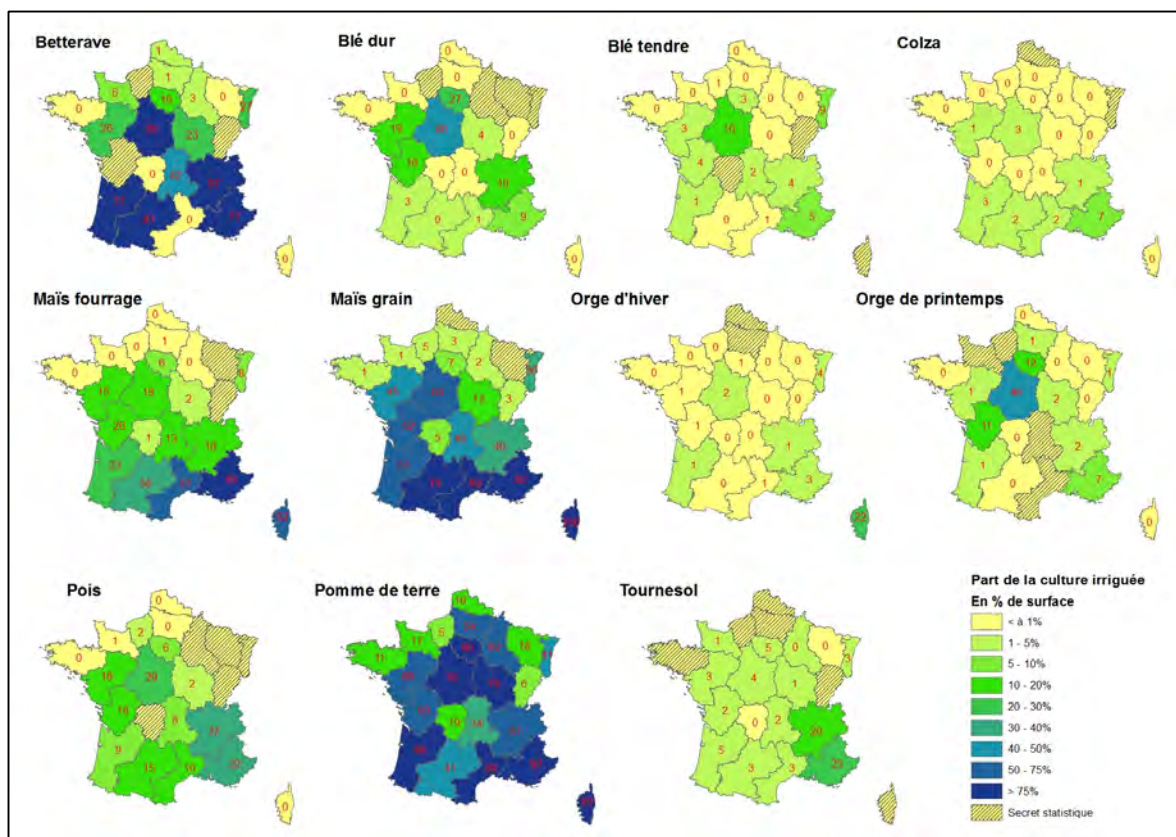
En 2010, les principales cultures irriguées sont le maïs grain, la pomme de terre et, secondairement, la betterave, le blé dur et l’orge de printemps.

Le maïs grain est irrigué non seulement en Beauce (63% des surfaces) mais également sur toute la moitié sud de la France (sauf le Limousin), à laquelle s’ajoutent l’Alsace (36% des surfaces) et les Pays de Loire (45% des surfaces). Le maïs fourrage présente les mêmes tendances, mais avec des pourcentages beaucoup plus faibles (18% dans le Centre et jusqu’à 38% en Midi-Pyrénées, voire plus dans les régions méditerranéennes mais sur des surfaces en maïs peu significatives) (Figure 10-1-21).

Pour la betterave, le blé dur, le blé tendre et l’orge de printemps les surfaces irriguées se concentrent dans la région centre, plus particulièrement en Beauce : 40% des surfaces en blé dur dans la région Centre, 10% du blé tendre et 46% de l’orge de printemps sont irriguées.

Le pois est irrigué essentiellement en région Centre (29% des surfaces) mais également dans les régions voisines (18% en Pays de Loire et Poitou-Charentes, les surfaces en Rhône-Alpes et PACA n’étant guère significatives). Le tournesol n’est pas une culture fréquemment irriguée (sauf en régions Rhône-Alpes et PACA où il dépasse 20%), même dans le sud-ouest de la France où il est bien implanté. L’irrigation du colza n’est pas significative, de même que pour l’orge d’hiver.

Figure 10-1-21. Part de la surface irriguée sur la surface totale d’une culture par région en 2010
(Source : RA 2010)



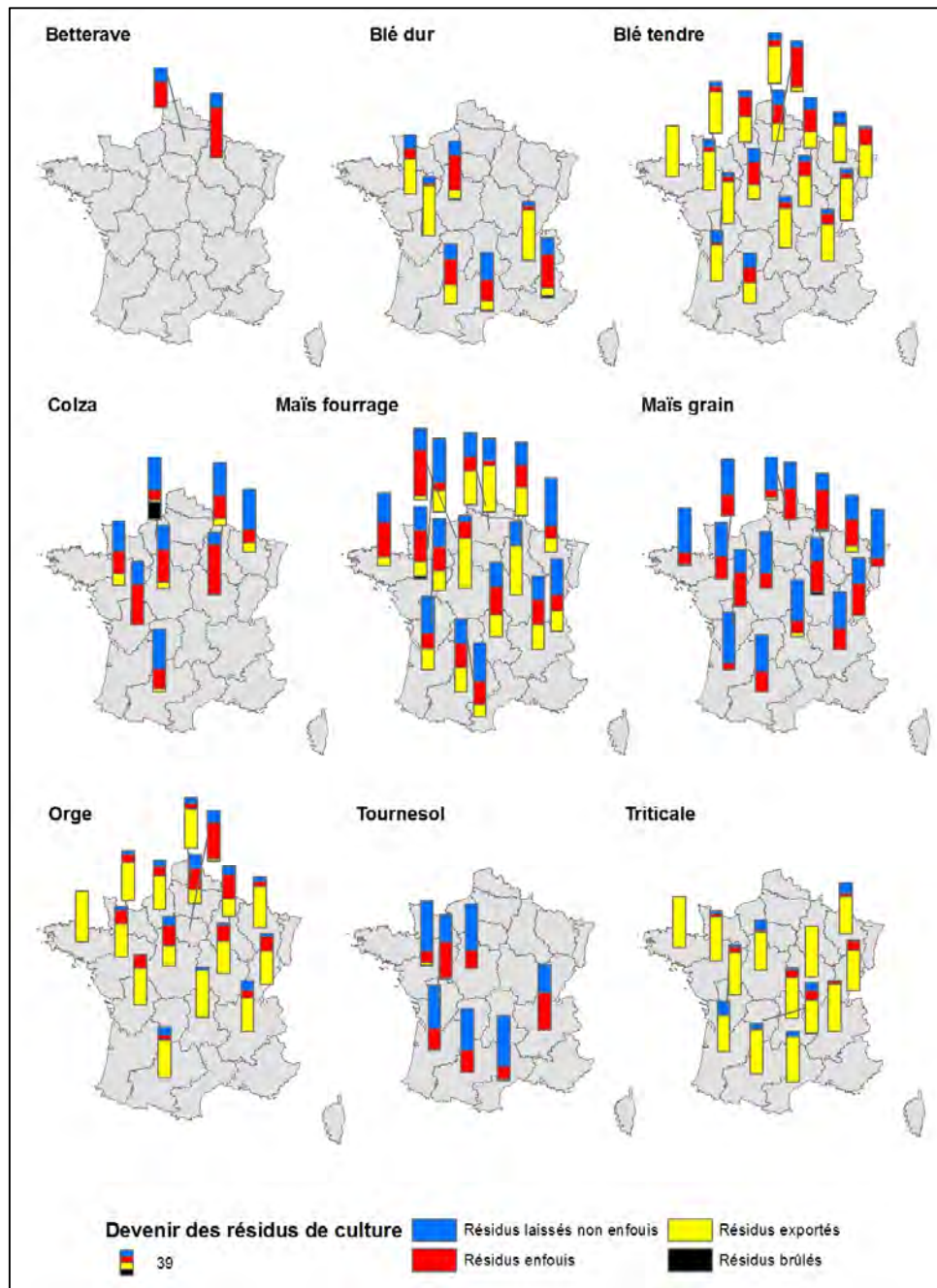
Les quantités d’eau apportées dépendent fortement des années climatiques. En 2011, les apports moyens varient de plus de 200 mm sur maïs grain en Aquitaine à environ 50 mm sur blé dur et pois en région Centre et Pays de Loire. Les quantités apportées sur maïs varient entre 134 mm en région Centre à 209 mm en Aquitaine. Sur pomme de terre, elles varient entre 127 (Ile-de-France) et 175 mm (Centre et Champagne-Ardenne). Les autres cultures présentent peu de données régionales exploitables.

Un travail spécifique serait nécessaire pour évaluer l’efficacité des apports d’eau d’irrigation pour les différentes cultures dans les différentes régions. A l’image de ce qui est réalisé ci-avant pour la fertilisation azotée, il faudrait analyser les stratégies de raisonnement d’irrigation pour pouvoir en inférer un ordre de grandeur des marges de manœuvre existantes.

Gestion des résidus de culture

Les résidus de cultures sont soit enfouis, laissé en surface (non enfoui), exporté voire brûlés (Figure 10-1-22). Ils sont le plus souvent enfouis pour la betterave, et non enfouis pour le tournesol.

Figure 10-1-22. Gestion des résidus de cultures par culture et par région en France en 2011
(Source : Enquête Pratiques culturales 2011)



Dans le cas du maïs grain, ils sont très majoritairement non enfouis dans les régions de monoculture (Aquitaine, Alsace) mais plus fréquemment enfouis dans les régions où il est assolé (Champagne-Ardenne, Picardie, Bourgogne, Poitou-Charentes). On note même une petite part d'exportation en Lorraine et Auvergne. Dans le cas du maïs ensilage, les réponses sont plus difficiles à interpréter car l'essentiel de la plante est par définition exportée. Or, si par « résidus », on entend ce qui reste après un chantier d'ensilage, on peut être étonné par la fréquence des résidus recensés exportés, notamment en Bourgogne ou Centre.

Dans le cas du colza, l'essentiel des pailles sont enfouies (Bourgogne, Centre) ou laissées sur place sans être enfouies (Midi-Pyrénées, Lorraine), voire exportées dans certaines régions (Centre, Lorraine, Centre et Champagne-Ardenne) ou brûlés (Haute-Normandie).

Concernant les céréales à paille, le triticale présente un profil assez simple à l'échelle de la France, car il s'agit d'une culture produite pour l'élevage et notamment pour sa forte production de paille. Il n'est donc pas étonnant que l'essentiel des pailles soit exporté quelles que soient les régions.

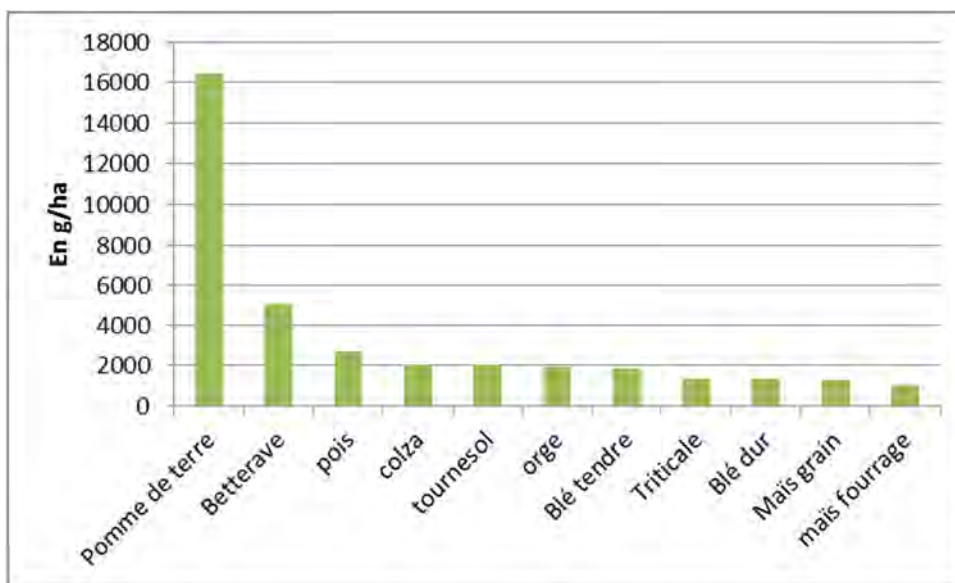
Dans le cas du blé dur, on observe des profils très différents : pailles presque systématiquement exportées (Poitou-Charentes, Rhône-Alpes), à majoritairement enfouies (Centre, PACA).

Dans le cas du blé tendre et de l'orge, les pailles sont majoritairement exportées (jusqu'à 100% en Bretagne), sauf en Ile-de-France, Centre, Champagne-Ardenne, Picardie, où elles sont majoritairement enfouies.

Pratiques phytosanitaires

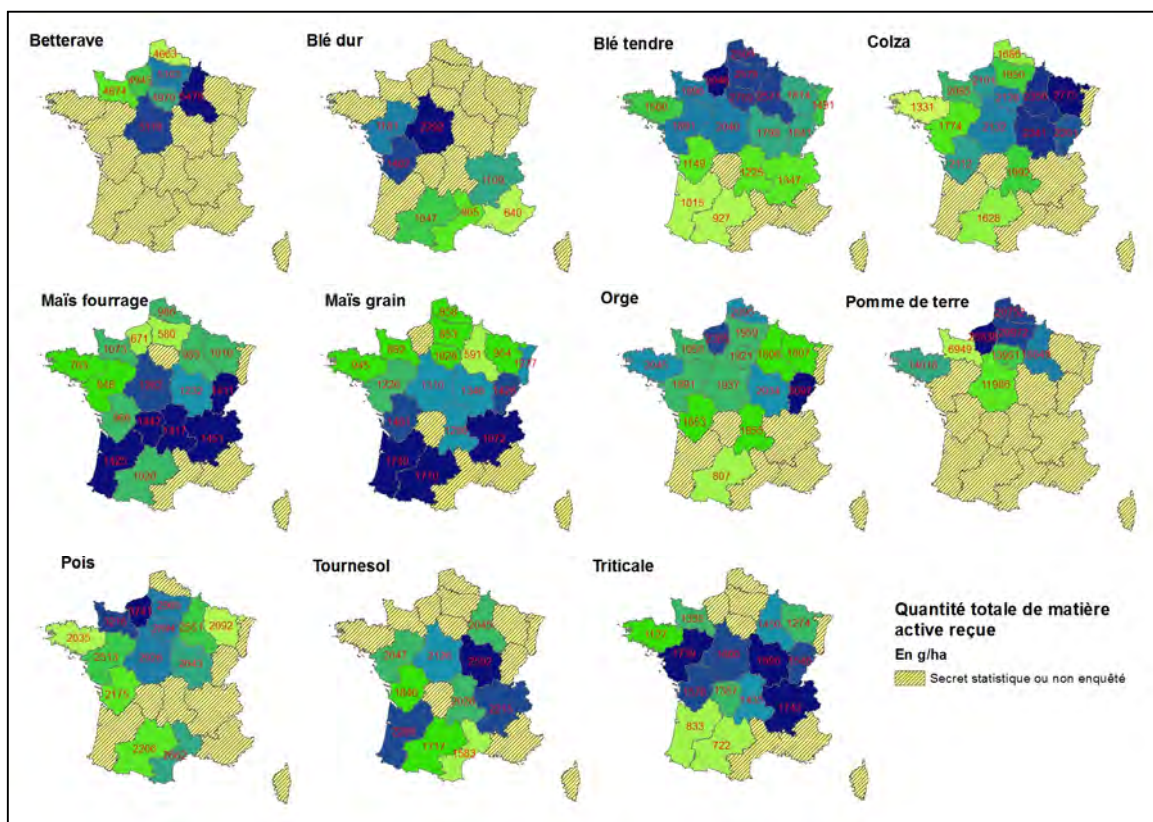
Les quantités de matières actives (MA) appliquées (quelle que soit leur action phytosanitaire) en moyenne par culture varient beaucoup. La principale culture traitée selon cet indicateur est la pomme de terre avec 16 500 g de MA/ha en moyenne (liés aux nombreux traitements fongicides mobilisant des MA minérales « pondéreuses » comme le cuivre et le soufre). Vient ensuite la betterave avec plus de 5000 g/ha et le pois avec près de 2700 g/ha. Le colza, le tournesol, l'orge et le blé tendre arrivent ensuite avec des quantités de MA de l'ordre de 2000 g/ha. Enfin, les cultures les moins traitées selon cet indicateur sont le triticale, le blé dur, les maïs grain et fourrage (< à 1380 g/ha).

Figure 10-1-23. Quantités de matières actives appliquées en moyenne par culture à l'échelle de la France en 2011 (Source : enquête Pratiques Culturelles 2011)



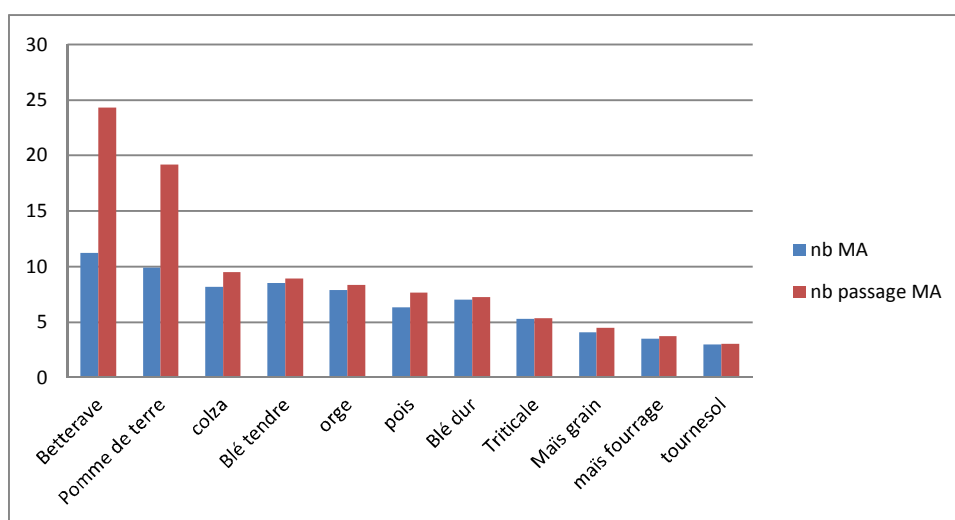
Il y a cependant un effet régional très marqué (Figure 10-1-23) : la betterave est plus traitée en Champagne-Ardenne, le blé dur dans la moitié nord (notamment en région Centre), idem pour le blé tendre et la pomme de terre (surtout en Haute-Normandie et nord du bassin parisien). Le pois est plus traité (en QMA) sur la partie ouest du bassin parisien (Normandie), le triticale dans une bande au centre de la France (Pays de Loire, Bourgogne, Rhône-Alpes), le colza dans le quart nord-est de la France, le maïs grain et fourrage dans la moitié sud de la France. Seuls le tournesol et l'orge ne montrent pas de tendances régionales très marquées.

Figure 10-1-24. Quantités de matières actives appliquées par culture et par région en 2011
(Source : enquête Pratiques Culturelles 2011)



Concernant le **nombre de matières actives** utilisées, on retrouve approximativement le même ordre de classement parmi les cultures : la pomme de terre et la betterave sont à nouveau les grandes cultures les plus consommatrices de produits phytosanitaires avec une moyenne de 10 MA utilisées. Cependant, le nombre de passages de MA est beaucoup plus important que le nombre de MA utilisées (24 passages*MA pour la betterave, contre 19 pour la pomme de terre), ce qui signifie qu’une même MA est appliquée plusieurs fois au cours de l’année culturale (Figure 10-1-25).

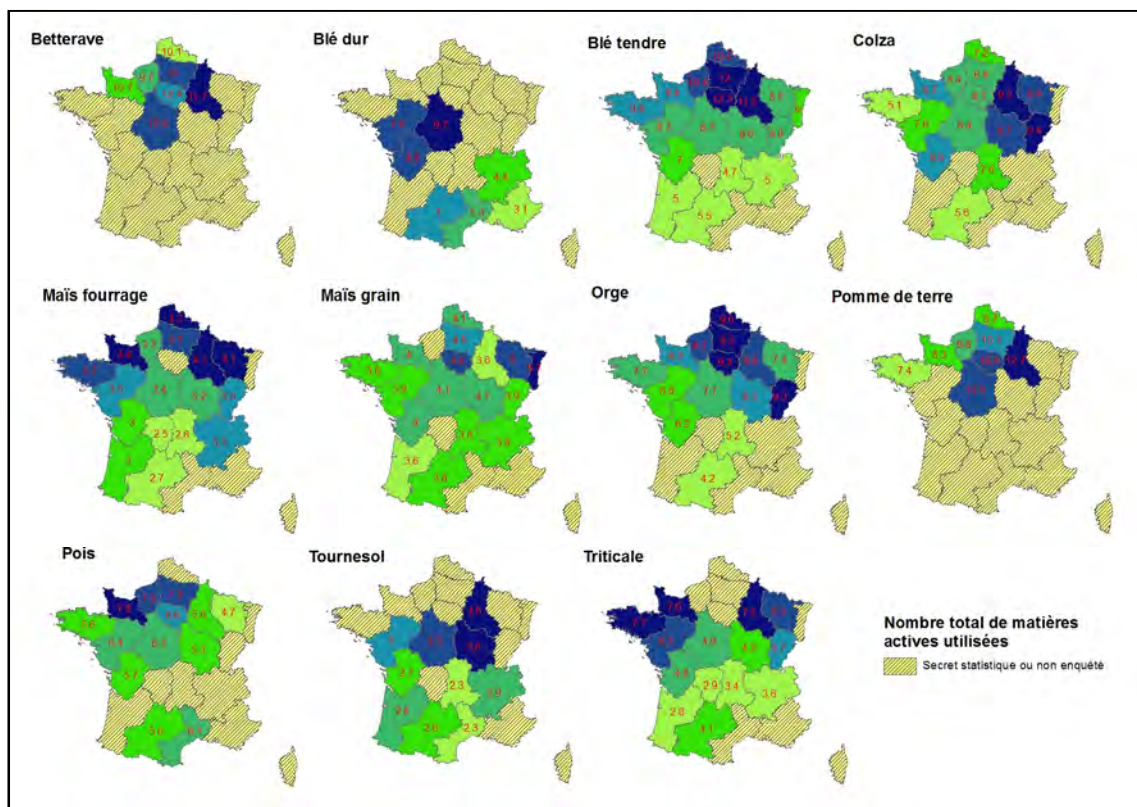
Figure 10-1-25. Nombre de matières actives utilisées et de passages de matières actives moyen par culture en France en 2011 (Source : enquête Pratiques Culturelles 2011)



Le colza, le blé tendre, l’orge, le pois et le blé dur arrivent ensuite, avec 7 à 8 MA utilisées en 7 à 9.5 passages. Triticale, maïs et tournesol sont les cultures mobilisant le moins de MA différentes (entre 3 et 5 MA en environ autant de passages).

En termes de distribution spatiale (Figure 10-1-26), pour la betterave, du blé dur, du blé tendre, du colza et du pois la distribution spatiale du nombre de MA est du même ordre que pour les QMA de la Figure 10-1-25. En revanche, les maïs suivent une distribution très différente, avec une plus grande diversité de MA utilisées dans le nord de la France (plus de 4 MA utilisées dans 4 régions du nord contre 3 et moins dans le quart nord-ouest de la France). Dans le cas du maïs grain, c’est l’Alsace qui arrive en tête avec 5,7 MA. Pour l’orge, c’est le nord et la Franche-Comté (>9.2 MA) qui utilisent le plus grand nombre de MA, pour la pomme de terre, c’est la Champagne-Ardenne (12.7 MA), pour le tournesol, c’est à nouveau la Champagne-Ardenne (>3.6 MA) et pour le triticale, les régions enquêtées du nord (>6.3 MA).

Figure 10-1-26. Nombre de matières actives utilisées par culture et par région en 2011
(Source : enquête Pratiques Culturelles 2011)

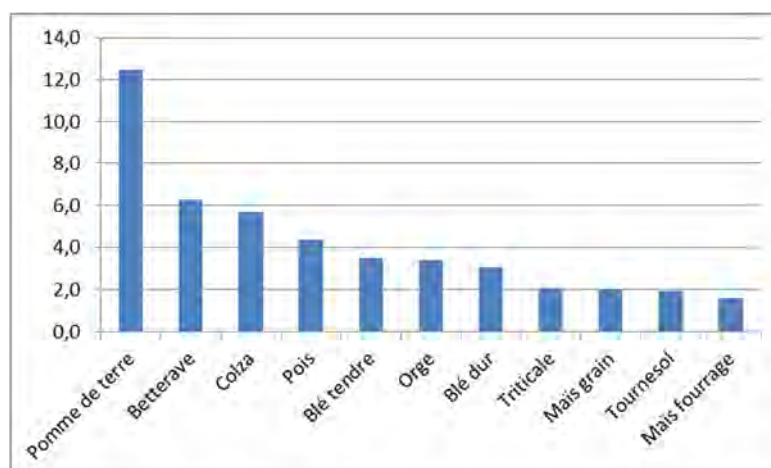


La carte représentant le nombre de passage de MA suivant les mêmes tendances géographiques que la précédente, nous avons choisi de ne pas l’ajouter ici. Par contre, nous avons choisi de représenter ci-dessous le nombre de passages total (Figure 10-1-27).

En termes de nombre de passages (un passage pouvant apporter plusieurs produits et donc plusieurs MA avec des actions différentes), la pomme de terre arrive en tête avec 12.5 passages, puis la betterave (6.3), le colza (5.7), le pois (4.3). Les autres cultures reçoivent moins de 4 passages, le minimum étant le maïs fourrage avec 1.6 passage.

Là encore, il faudrait analyser les stratégies de raisonnement des traitements phytosanitaires pour pouvoir en inférer un ordre de grandeur des marges de manœuvre existantes en termes d’augmentation de leur efficacité. L’évaluation du niveau effectif des SE de régulation relativement à la capacité de l’écosystème serait beaucoup plus difficile à réaliser puisqu’il faudrait avoir des informations sur le niveau de régulation potentiel et sur les effets des pratiques phytosanitaires sur ce niveau potentiel. Comme indiqué ci-avant dans la section 10.1.1.5, la production de connaissances sur ces interactions est un front de recherche.

Figure 10-1-27. Nombre de passages total par culture en France en 2011
(Source : enquête Pratiques Culturelles 2011)



Évaluation de la production totale de biens végétaux à partir des plantes cultivées

Le but de cette évaluation est de quantifier et de spatialiser la production totale de biens végétaux en France métropolitaine *via* l'utilisation des données produites par le service statistique du MAAF (SSP). Deux sources statistiques ont été utilisées. D'une part la Statistique Agricole Annuelle (SAA) qui fournit pour chaque année, au niveau département, les surfaces en production, le rendement et la production totale. D'autre part le Recensement Agricole (RA) 2010 pour estimer les surfaces au niveau de chaque Petite région Agricole (PRA).

Compte-tenu des choix faits dans EFESE-écosystèmes agricoles en termes de périmètre, l'évaluation des biens végétaux est centrée sur les productions des systèmes de grandes cultures : céréales, oléagineux, protéagineux, cultures industrielles (betteraves, plantes aromatiques, médicinales et à parfum) et pomme de terre⁶. La production de fourrage par les prairies est évaluée dans la section 10.2. Le tableau 10-1-1 indique les cultures retenues pour l'évaluation, et qui représentent la quasi-totalité de la production de biens végétaux en France, que ce soit en termes de surfaces ou de biomasse. Ces cultures sont destinées à l'alimentation humaine et animale et, de façon plus marginale, à la production d'énergie.

Nous utilisons la SAA pour déterminer la production totale des principaux biens végétaux, indépendamment du mode de valorisation. Les données du RA 2010 ont été utilisées pour estimer la part des surfaces des différents types de cultures au sein des PRA de chaque département⁷. Cette information a été utilisée pour estimer la production annuelle des cultures à la résolution de la PRA, considérant la part de la surface qu'elles occupent au sein de chaque PRA. Ceci conduit à faire l'approximation que la productivité des cultures par unité de surface est la même dans toutes les PRA d'un même département.

Enfin, cette production brute par culture par PRA a été convertie en trois unités : matière sèche (MS), matière azotée totale (MAT) et en énergie (NRJ). Les résultats sont cartographiés en figure 10-1-29. Les coefficients utilisés pour convertir les productions brutes en MS, MAT et énergie sont présentés dans l'annexe 10-A.

⁶ Il existe dans la SAA un thème de « Cultures non alimentaires », qui inclut des jachères industrielles et cultures énergétiques (blé, maïs, colza, tournesol, autres). Toutefois les valeurs reportées ne rendent que partiellement et variablement compte de la production à finalité énergétique. De ce fait, ces données n'ont pas été prises en compte dans EFESE-écosystèmes agricoles.

⁷ Les données ont été retraitées par l'UMR SAD-APT (Inra) pour estimer les valeurs qui étaient soumises au secret statistique au niveau PRA.

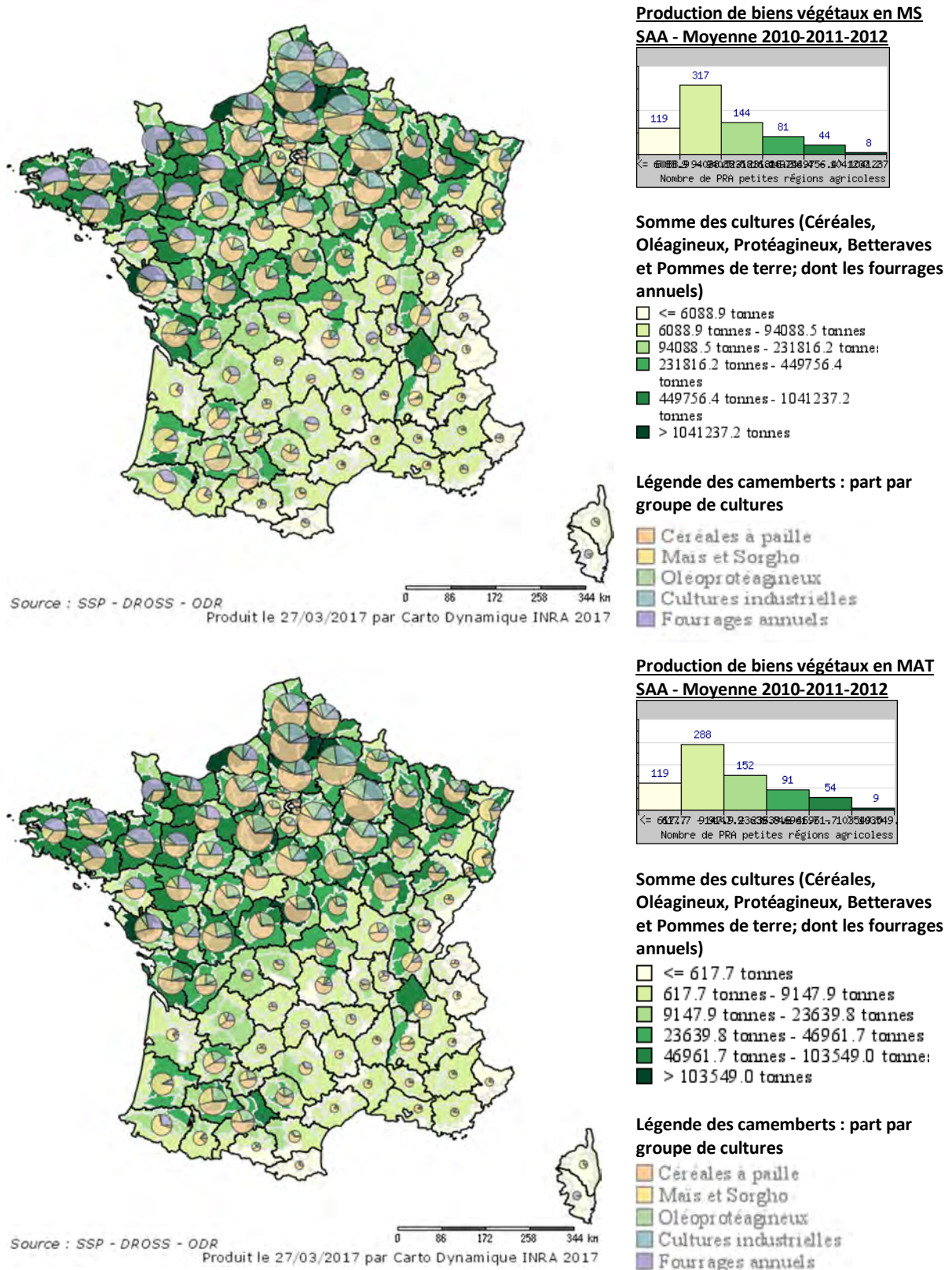
Tableau 10-1-1. Liste des cultures retenues pour l'évaluation de la production de biens végétaux dans EFESE-écosystèmes agricoles

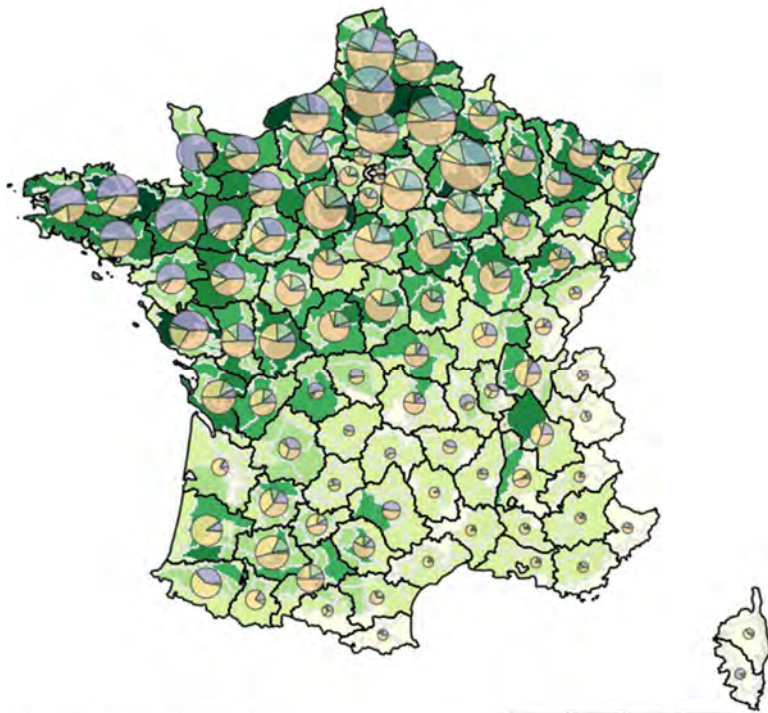
Libellé de la culture retenue pour EFESE-écosystèmes agricoles	Libellé du Produit retenu dans la SAA	Calcul pour Utilisation & MS/MAT/NRJ
Blé tendre	Total blé tendre	x
Blé dur	Total blé dur	x
Orge	Total orge et escourgeon	x
Avoine	Total avoine	x
Seigle	Seigle et méteil	x
Triticale	Triticale	x
Maïs grain et semence	Maïs (grain et semence)	x
Sorgho grain	Sorgho	x
Riz	Riz	x
Mélanges et autres céréales	Mélanges de céréales (hors méteil)	x
Colza	Colza et navette	x
Tournesol	Tournesol	x
Soja	Soja	x
Lin oléagineux	Lin oléagineux	x
Autres oléagineux	Autres oléagineux	x
Pois protéagineux	Pois protéagineux	x
Fèves et fèves	Fèves et fèves	x
Lupin	Lupin doux	x
Légumes secs	Légumes secs	x
Betteraves	Betteraves industrielles	x
Pommes de terre	Pommes de terre	x
Maïs fourrage	Maïs fourrage et ensilage	x
Autres fourrages annuels	Autres fourrages annuels	x
Plantes à parfum, à arôme et médicinales	Plantes à parfum, à arôme et médicinales	Surface et production désagrégées au niveau PRA
Houblon	Houblon en production	Surface et production désagrégées au niveau PRA
Lin textile	Lin textile (roui non battu) (y compris semences)	Surface et production désagrégées au niveau PRA
Tabac	Tabac (sec non fermenté)	Surface et production désagrégées au niveau PRA

Par ailleurs, le Bilan d'approvisionnement national établi par le SSP (Tableau 10-1-2), fournit une information à l'échelle nationale sur les grands types d'usage des différents biens végétaux : semences, pertes, alimentation animale, usages industriels (pour la production de bioéthanol), transformation (huile et tourteaux, féculs, etc.) et consommation humaine (brute). A l'échelle nationale, 43 % du blé tendre, 74 % du maïs grain, plus de 85 % des protéagineux, 87 % de l'orge, plus 95 % des autres céréales et 97 % du lin sont à destination de l'alimentation animale. Seuls le blé dur (86 %), les haricots (100 %), le pois chiche (100 %) et les autres légumes secs (91 %) sont très essentiellement à destination de l'alimentation humaine. L'essentiel du colza (92 %), tournesol (86 %) et du soja (80 %) est transformé en huile. Les tourteaux issus de cette transformation, qui représentent entre la moitié et les deux tiers de ces produits, sont utilisés pour l'alimentation animale. La betterave est utilisée à 21% pour des usages industriels et à 79% pour la transformation en sucre.

Figure 10-1-29. Production de biens végétaux en MS, MAT et énergie pour les principales cultures.
Moyenne 2010-2011-2012.

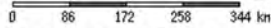
Le fond de carte indique la production totale de biens végétaux (en tonnes de MS ou de MAT, ou en milliers de mégacalories), pour toutes cultures évaluées. Les camemberts représentent, agrégés par département, cette même production totale en fonction du poids relatif de chaque grand groupe de culture. Les seuils des classes suivant la méthode de Jenks qui vise à maximiser la variabilité entre les classes et minimiser la variabilité intra-classe.



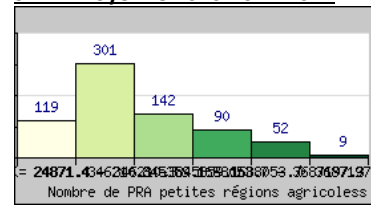


Source : SSP - DROSS - ODR

Produit le 27/03/2017 par Carto Dynamique INRA 2017



Production de biens végétaux en énergie (milliers de mégacalories)
SAA - Moyenne 2010-2011-2012



Somme des cultures (Céréales, Oléagineux, Protéagineux, Betteraves et Pommes de terre; dont les fourrages annuels)

- <= 24871.4 milliers de megacal
- 24871.4 milliers de megacal - 346210.3 milliers de megacal
- 346210.3 milliers de megacal - 845359.1 milliers de megacal
- 845359.1 milliers de megacal - 1688053.7 milliers de megacal
- 1688053.7 milliers de megacal - 3687197.3 milliers de megacal
- > 3687197.3 milliers de megacal

Légende des camemberts : part par groupe de cultures

- Céréales à paille
- Mais et Sorgho
- Oléoprotéagineux
- Cultures industrielles
- Fourrages annuels

Tableau 10-1-2. Répartition des utilisations des principaux biens végétaux évalués dans EFESE-écosystèmes agricoles. Cette répartition a été estimée à partir de la moyenne des bilans d’approvisionnement entre 2009 et 2013

	Semences	Pertes	Alimentation animale	Usages industriels	Dont transformation (alcool)		Transformation (huile, Fécule et Autres)	Dont huile ester méthylique d'huile végétale	Dont huile alimentation animale	Dont tourteau alimentation animale	Consommation humaine (Brute)
					alcool pour carburants	alcool hors carburants					
Blé tendre	4,0%	1,9%	42,7%	16,0%	7,5%	1,9%	0,0%				35,4%
Blé dur	5,2%	1,9%	7,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%				86,0%
Mais grain	1,3%	1,7%	73,9%	17,1%	6,5%	0,0%	2,3%				3,7%
Orge et escourgeon	5,2%	2,1%	86,9%	5,4%	0,0%	0,0%	0,0%				0,5%
Autres céréales	2,4%	0,4%	95,6%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%				1,6%
Seigle	3,4%	0,7%	77,9%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%				18,0%
Avoine, mélanges de céréales d'été, méteil	1,8%	0,4%	96,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%				1,7%
Triticale	2,7%	0,4%	96,9%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%				0,0%
Sorgho	1,1%	0,7%	98,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%				0,0%
Céréales non définies ailleurs	0,0%	0,0%	77,7%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%				22,3%
Colza navette	0,1%	1,2%	6,3%	/			92,4%	33,4%	2,9%	50,4%	0,0%
Tournesol	0,4%	1,4%	11,8%	/			86,4%	6,1%	1,2%	46,7%	0,0%
Soja	0,4%	1,0%	18,9%	/			79,8%	9,6%	0,5%	62,2%	0,0%
Lin	1,2%		98,7%	/			0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Autres oléagineux	2,0%	0,0%	0,0%	/			75,1%				23,3%
Pois total	7,8%	3,2%	86,5%	/			/				2,5%
Pois protéagineux et secs	7,9%	3,3%	87,5%	/			/				1,4%
Pois chiches	0,0%	0,0%	0,0%	/			/				100,0%
Fèves & fèves	9,6%	0,0%	83,0%	/			/				7,4%
Lupin graines	5,9%	0,0%	85,0%	/			/				10,8%
Autres légumes secs	9,9%	0,0%	0,0%	/			/				90,9%
haricots secs consommation	0,0%	0,0%	0,0%	/			/				100,0%
Pdt total	5,9%	21,9%	4,5%	0,0%			16,4%				51,4%
Riz paddy	3,0%	1,2%	8,4%	/			/				87,4%
Betteraves	0,0%	0,0%	0,0%	21,5%			78,5%				0,0%

Évaluation de la part de la production de biens végétaux permise par les SE de fourniture en azote et de restitution de l'eau pour un état initial de l'écosystème donné

Nous présentons ci-après les premiers résultats préliminaires d'EFESE-écosystèmes agricoles sur l'estimation de la part de la production de biens végétaux dans les écosystèmes de grandes cultures permise par les SE de fourniture en azote et de restitution de l'eau. La stratégie d'analyse et les résultats présentés ci-après visent à **poser les « premières pierres » d'une démarche conceptuelle et méthodologique et à fournir des premiers ordres de grandeur**. Ces résultats sont donc à utiliser avec précaution.

Pour conduire l'analyse nous avons utilisé deux types de résultats de simulations réalisées avec le modèle STICS (voir Annexe 8-A) :

- les simulations des systèmes de culture « actuels » dans des unités pédoclimatiques EFESE-écosystèmes agricoles c.-à-d. en prenant en compte les pratiques de fertilisation observées à l'échelle régionale, l'irrigation du maïs déclenchée automatiquement par le modèle pour couvrir 85 % des besoins en eau de la plante, l'enfouissement des résidus et avec implantation d'un couvert intermédiaire avant culture de printemps (à l'exception des précédents maïs et betterave) dans les zones vulnérables,
- les simulations sans intrants, c.-à-d. sans fertilisation et sans irrigation et sans enfouissement des résidus de culture, avec la même logique pour les couverts intermédiaires. Ce deuxième jeu de simulation vise à simuler le fonctionnement d'un écosystème agricole considérant une configuration donnée c.-à-d. une distribution spatiotemporelle de couverts végétaux (ici une séquence de culture).

Pour prendre en compte l'effet des variabilités climatiques intra et interannuelles, toutes les simulations simulent des enchaînements de systèmes de culture sur les trente années climatiques de 1984 à 2013 au sein des unités pédoclimatiques EFESE-écosystèmes agricoles. Autrement dit, elles simulent des enchaînements de séquences de culture dans des situations pédoclimatiques, sans et avec intrants.

L'hypothèse qui sous-tend l'analyse est que la comparaison des rendements simulés dans ces deux types de simulations permet d'estimer la part de la production permise par l'écosystème agricole considérant les caractéristiques, les propriétés et l'état organique initial des sols (teneur en matière organique dans les sols), le climat des trente années de simulation et les pratiques de fertilisation, d'irrigation et enfouissement des résidus de culture simulés dans le premier jeu de simulation. La part de la production permise par les SE de fourniture en azote et de restitution de l'eau est estimée *via* le calcul de la moyenne, sur la période de simulation, des ratios de rendements sans et avec intrants soit pour chaque culture (moyenne des ratios des couples culture-année par culture), soit du ratio moyen de toutes cultures confondues (moyenne des ratios de tous les couples culture-année)⁸.

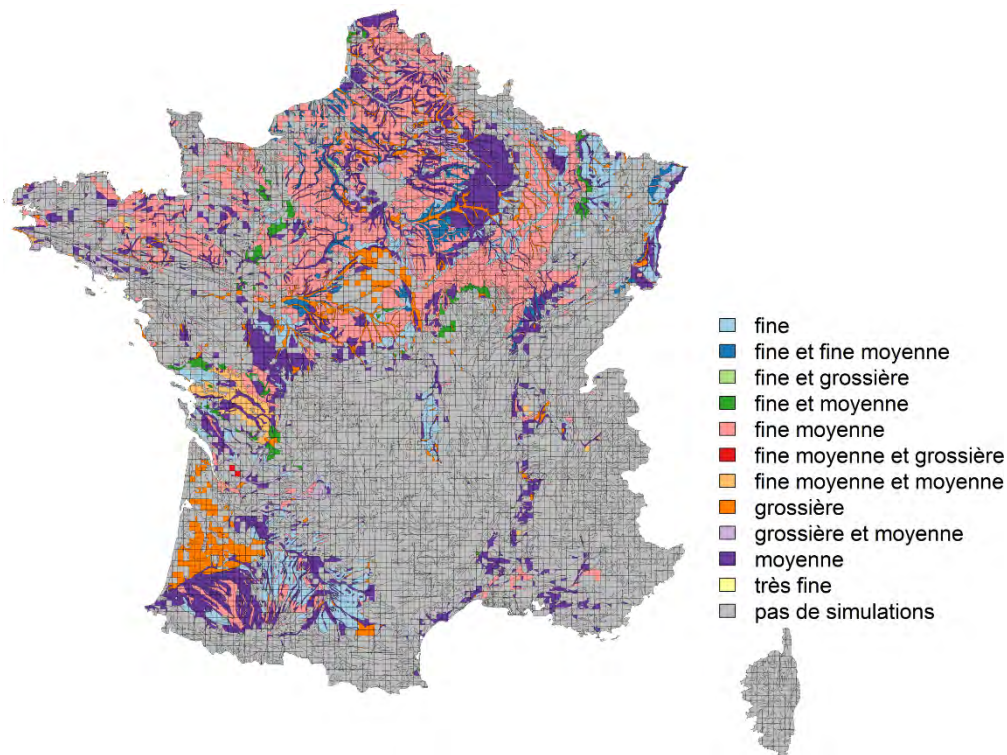
Il est important de rappeler que **le modèle STICS ne simule pas les effets des bioagresseurs des cultures et des pratiques phytosanitaires**. Aussi, l'estimation réalisée ne prend en compte que les effets comparés de la simulation des interactions entre SE liés aux cycles du carbone, de l'azote et de l'eau et les pratiques de fertilisation, irrigation et gestion des résidus de culture.

Nous présentons d'abord les résultats pour les principales cultures simulées puis les résultats à l'échelle de la rotation culturale. Considérant le caractère préliminaire de ces résultats, seuls les grandes tendances en termes de distribution spatiale et ordre de grandeur sont présentés. Les résultats présentés à l'échelle des UPC sont issus d'un changement d'échelle : les résultats par combinaison [système de culture x sol] sont pondérés par le poids des séquences de culture, des types de fertilisation et des types de sol au sein des UPC. Nous analysons la variabilité des résultats en fonction des types de climat et de texture des sols (Figures 10-1-30 et 10-1-31) et des caractéristiques des séquences de culture (Cf. Annexe 8-A).

La figure 10-1-32 présente la part de la production permise par les SE de fourniture en azote et de restitution de l'eau pour le blé tendre, le colza, le tournesol, le maïs grain, le maïs fourrage et la betterave sucrière. Du fait du faible nombre de simulations, les résultats concernant le pois ne sont pas présentés.

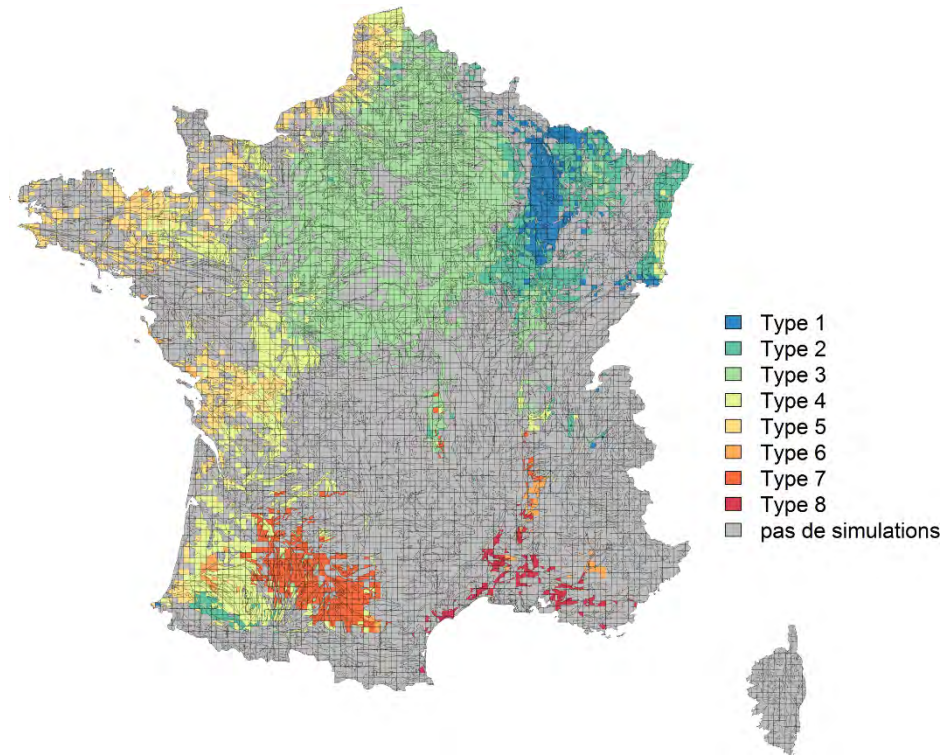
⁸ Les couples culture-année pour lesquels le rendement sans intrant était supérieur au rendement avec intrant ont été exclus de l'analyse.

Figure 10-1-30. Cartes et description des textures de sol dominantes par UPC dans lesquelles des simulations de systèmes de grandes cultures sont réalisées



Libellé	Caractéristiques
Type 1 - grossier	argile < 18 % et sable > 65 %
Type 2 - moyen	18% < argile < 35% et sable > 15%, ou argile < 18% et 15% < sable < 65%
Type 3 – fin - moyen	argile < 35 % et sable < 15 %
Type 4 – fin	35 % < argile < 60 %
Type 5 – très fin	argile > 60 %

Figure 10-1-31. Cartes et description des climats dominants par UPC dans lesquelles des simulations de systèmes de grandes cultures sont réalisées.

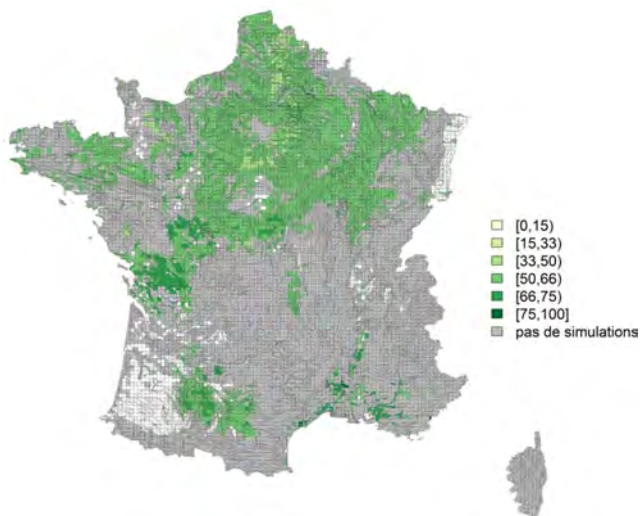


Numéro de climat	Libellé
Type 1	climats de montagne
Type 2	climat semi-continentale et climat des marges montagnardes
Type 3	climat océanique dégradé des plaines du Centre et du Nord
Type 4	climat océanique altéré
Type 5	climat océanique franc
Type 6	climat méditerranéen altéré
Type 7	climat du Bassin du Sud-Ouest
Type 8	climat méditerranéen franc

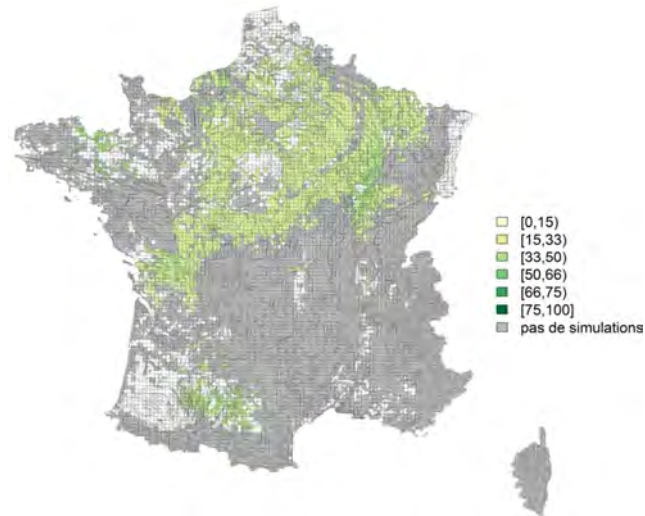
Figure 10-1-32. Distribution spatiale de la part de la production (%) permise par les SE de fourniture en azote et de restitution de l’eau pour le blé tendre (BT), le colza (Co), le tournesol (To), le maïs grain (MG), le maïs fourrage (MF) et la betterave sucrière (BS)

Les unités pédoclimatiques EFESE-écosystèmes agricoles en blanc correspondent aux unités dans lesquelles la culture considérée n’est pas présente dans les systèmes de culture simulés. Les unités en gris foncé représentent les unités pédoclimatiques dans lesquelles il n’y pas eu de simulation de grandes cultures.

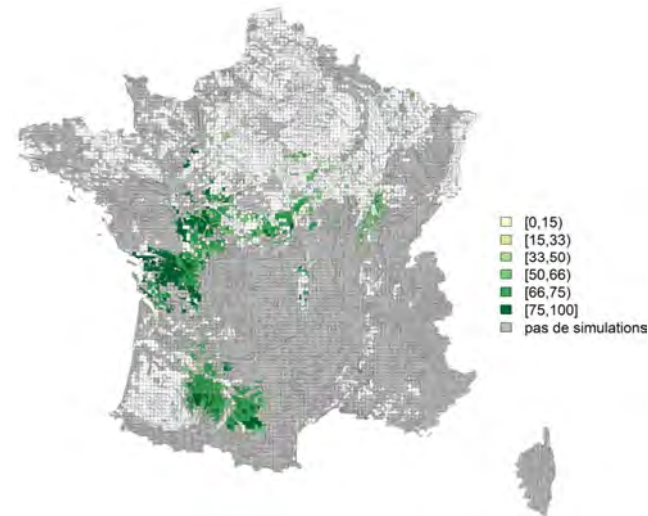
Blé tendre



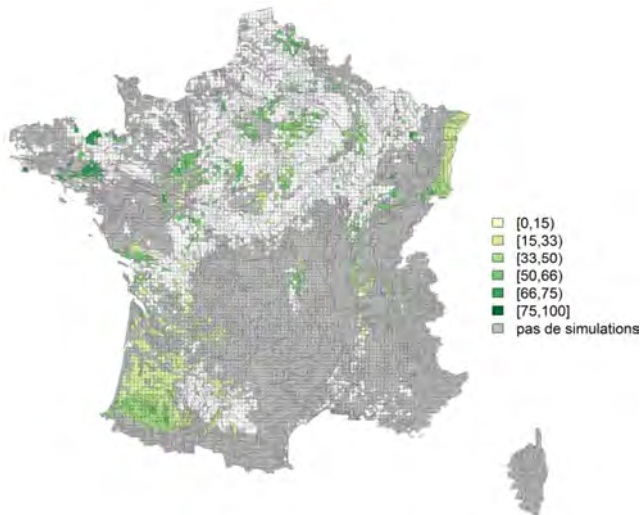
Colza



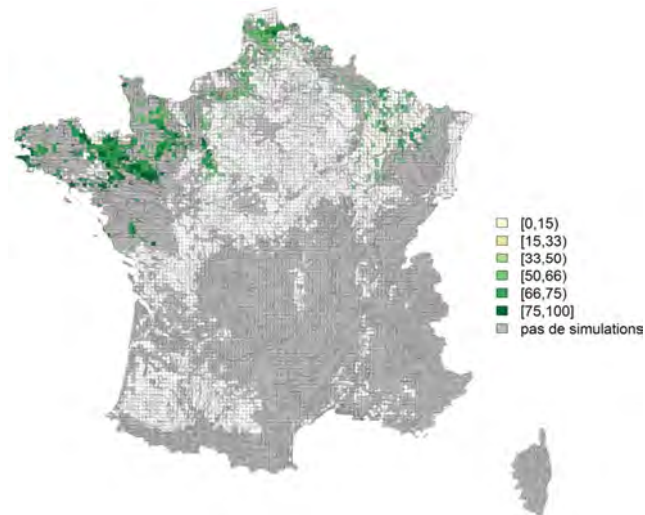
Tournesol



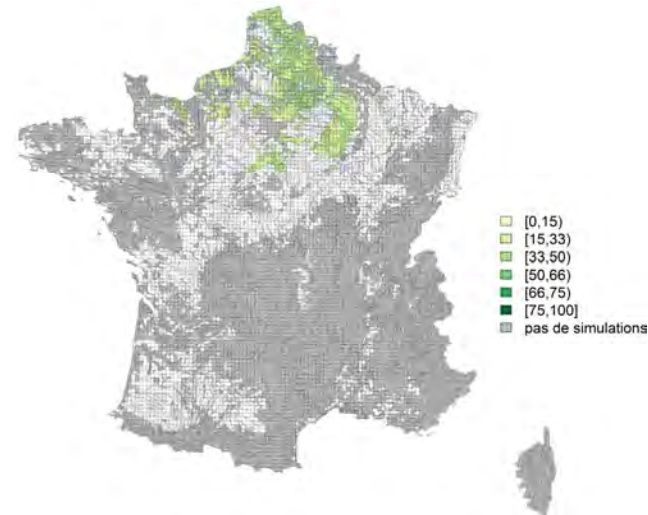
Maïs grain



Maïs fourrage



Betterave sucrière



L'analyse des résultats à l'échelle des simulations (systèmes de culture x type de sol) laisse entendre que :

- pour le **blé tendre**, la part de la production permise par l'écosystème agricole est de l'ordre de 55 à 65 % suivant les climats. L'analyse des résultats par classe de climat montre que les niveaux moyens les plus élevés de la part de production imputable aux SE de régulation de l'azote et de l'eau sont observés sous les climats 6 et 7 (60 %) et le climat 8 (65 %). La variabilité est du même ordre de grandeur dans les différents climats, et légèrement réduite pour le climat 8. Les effets des climats méditerranéens (6 et 8) et du Sud-Ouest (7) pourraient être liés à un potentiel de rendement plus faible dans ces zones climatiques que dans celles du grand bassin céréalier français. En effet, un même niveau de fourniture d'azote minéral et de restitution de l'eau permet de couvrir une part d'autant plus élevée des besoins des cultures que ces besoins (potentiel de rendement) sont faibles. Les ratios moyens les plus élevés sont observés dans les sols grossiers et les plus fins. Là encore, l'effet de ces types de sol grossiers pourrait être lié à un potentiel plus faible dans ces situations. Si les caractéristiques des séquences de cultures (longueur de la rotation) ne semblent pas discriminer les valeurs, la part de la production permise par les SE de régulation de l'azote et de l'eau tend à être d'autant plus importante que le taux de couvert intermédiaire (CI) est faible (médiane de 55-60 % avec un faible taux de CI et d'environ 50 % pour les taux les plus importants). L'origine de cet effet, qu'il faudrait analyser au regard des caractéristiques des différents systèmes de culture concernés, reste à analyser. Enfin, le fait que le blé soit simulé sans irrigation dans les systèmes actuels favorise un plus haut niveau de résultat (c.-à-d. estimation d'une plus grande part de la production imputable aux SE de régulation de l'azote et de l'eau). En effet, l'irrigation du blé, de plus en plus répandue en France, surtout pour le blé dur, peut conduire à une augmentation significative du rendement dans les régions à déficit hydrique marqué. Telle qu'estimée ici (ratio entre les rendements simulés sans et avec intrants), on peut faire l'hypothèse que la part de la production permise par les SE de régulation de l'azote et de l'eau serait plus faible si la situation de référence (systèmes actuels avec intrants) prenait en compte l'irrigation du blé ;

- pour le **colza**, la part de la production permise par l'écosystème agricole est de l'ordre de 25 à 35 % suivant les climats avec un léger effet positif des climats 6 et 7 (35%) et dépressif du climat 3 (25 %). Les effets du type de sol sont moins marqués que pour le blé, avec un léger dépressif sur les sols de type 4 (25%). Le même type d'hypothèses peut être émis sur ces effets des climats et des sols que pour le blé. Le niveau beaucoup plus faible que pour le blé pourrait être lié au stress azoté plus marqué pour le colza que pour le blé du fait de ses besoins plus élevés. Il n'y a pas eu d'effet caractéristique des séquences de cultures et des couverts intermédiaires clairement identifiés ;

- pour le **tournesol**, la part de la production permise par l'écosystème agricole est de l'ordre de 60 à 75 % suivant les climats avec un effet positif des climats 3 et 7 (environ 65 %) et encore plus marqué des climats 4, 5 et 6 et 8 (70 à 75%). On peut noter un effet dépressif des sols grossiers (une peu moins de 65 %) et un effet positif des sols fins (type 4 : 75 %). Des taux de céréale à paille entre 50 et 70 % dans la séquence de cultures sont associés avec les niveaux de résultat les plus élevés (70 à 75 %). Il est alors question ici de rotations de type blé-(blé)-tournesol ou blé-colza-blé-tournesol. Pour aller plus loin il serait nécessaire d'analyser la distribution des rotations de cultures dans les différentes zones climatiques. Les niveaux élevés atteints pour cette culture sont corroborés par les faibles niveaux d'apport de fertilisation azotée. Plus généralement, le tournesol est une des grandes cultures, non-légumineuse, sur laquelle les apports d'intrants exogènes sont relativement faibles (chapitre 6). Comme pour le blé, le fait que le tournesol soit simulé sans irrigation dans les systèmes actuels favorise un plus haut niveau de résultat ;

- pour le **maïs grain**, le niveau moyen de part de la production imputable aux SE de régulation de l'azote et de l'eau est très variable d'un type de climat à un autre. Il est autour de 55 à 60 % dans les types de climats 1, 3 et 5 (montagne, océanique dégradé et océanique franc), autour de 45 % dans le climat 2 (marges de montagne), un peu plus de 30 % dans le climat 6 (méditerranéen altéré) et autour de 20 % dans les climats 7 et 8 (du Sud-Ouest et méditerranéen franc). La variabilité intra zone climatique est d'autant plus élevée que les résultats (en %) sont faibles. Les stress liés au déficit hydrique climatique moyen en été et à sa variabilité interannuelle semblent donc être les principaux facteurs explicatifs de cette variabilité. Ce constat est à rapprocher de celui de la distribution majoritaire du maïs grain dans les zones les plus chaudes, et aussi souvent les moins arrosées en été, et, par voie de conséquence, des pratiques d'irrigation mises en œuvre dans ces zones climatiques (grand sud-ouest, centre et Alsace). Aucun effet sol majeur n'a été identifié. Des taux de céréale à paille et de couverts intermédiaires plus élevés sont associés à des résultats plus élevés. Cependant, là encore, ces constats seraient à analyser à la lumière de la distribution des séquences de cultures et de couverts intermédiaires dans les différentes zones climatiques (possible confusion des effets séquences de couverts végétaux et climatiques du fait d'une distribution particulière de ces séquences) ;

- pour le **maïs fourrage**, contrairement au maïs grain, la part de la production permise par l'écosystème agricole est peu variable et de l'ordre de 60 à 70 % avec des niveaux légèrement plus élevés sous les climats 4, 5, 6 (océaniques et méditerranéen altérés) qui répondent légèrement mieux aux besoins du maïs fourrage. Ces résultats sont directement liés à la distribution spatiale du maïs fourrage qui est très concentré dans les zones climatiques océaniques, aux besoins en eau légèrement moindres du maïs fourrage relativement au maïs grain du fait d'un cycle de végétation plus court. Aucun autre effet majeur n'a été identifié pour cette culture ;
- pour la **betterave**, la part de la production permise par l'écosystème agricole est peu variable en fonction du climat du fait, entre autres, de sa forte concentration dans la zone nord de la France. Elle se situe entre 35 et 40 %. Considérant les zones climatiques dans lesquelles elle est principalement cultivée, il semble que, comme pour le colza, le principal déterminant de ce niveau de résultat soit le niveau de fourniture en azote par l'écosystème agricole. Aucun autre effet majeur n'a été identifié pour cette culture.

A l'échelle de la rotation, la part de la production permise par l'écosystème agricole est de l'ordre de 50 % dans les climats 1 à 4, de 55 à 60 % dans les climats 5 à 7 et plus de 65 % dans le climat 8 (Figures 10-1-33). Par construction ces résultats sont directement liés à la distribution spatiale des différentes cultures et à leur distribution temporelle dans les séquences de culture. La variabilité est beaucoup plus marquée au sein des zones climatiques 4, 6 et 7, zones de production de maïs grain, que dans les autres zones climatiques.

Figure 10-1-33. Distribution spatiale de la part de la production (%) permise par les SE de fourniture en azote et de restitution à l'échelle de la rotation

Les UPC grisées représentent les UPC dans lesquelles il n'y pas eu de simulation de grandes cultures.

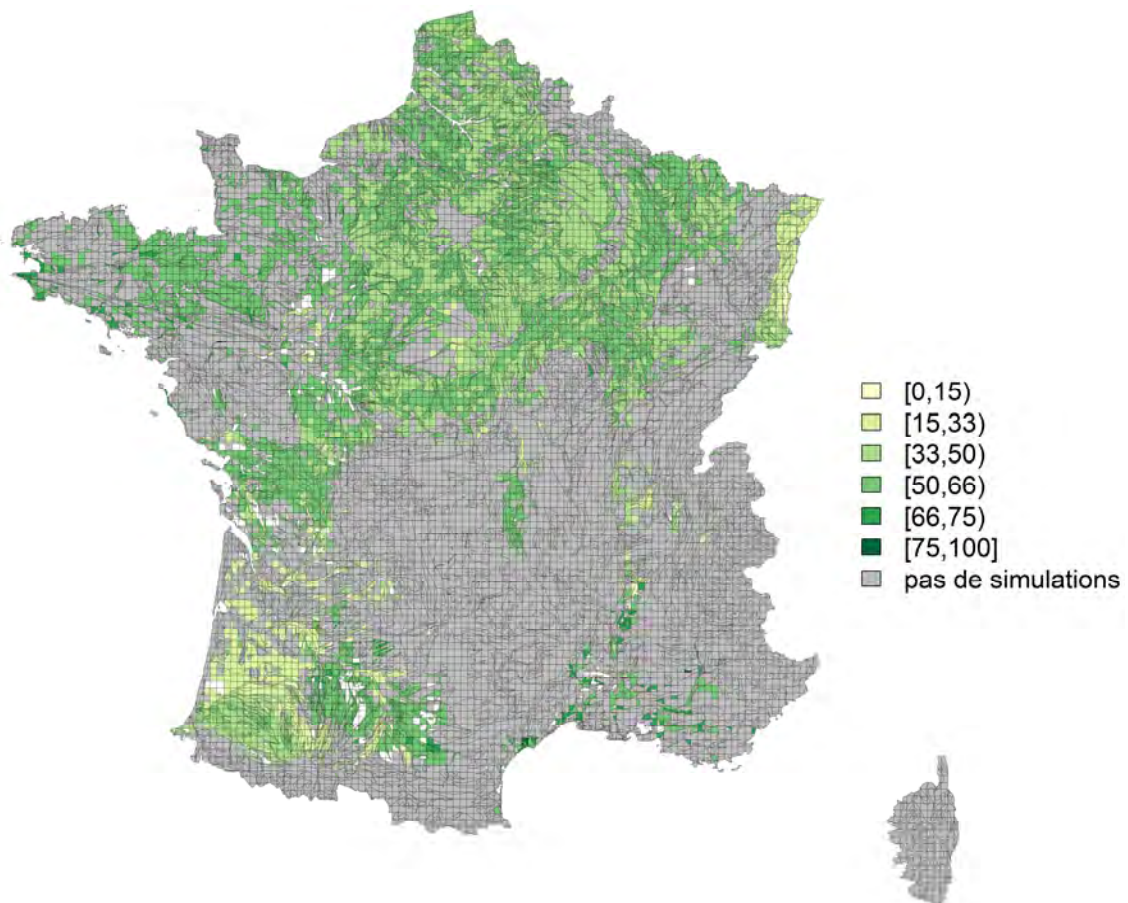
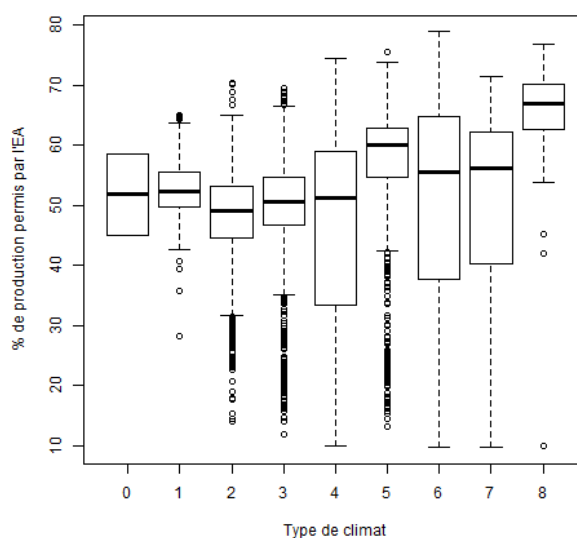


Figure 10-1-34. Distribution des résultats d'évaluation de la part de la production permise par les SE de fourniture en azote et de restitution de l'eau par type de climat à l'échelle des UPC



D'un point de vue méthodologique, il est important de noter que, **dans l'ensemble, ces résultats doivent être sous-estimés**. En effet, comme indiqué et discuté dans l'annexe 8-A, les simulations sans intrants conduisent à une sous-estimation graduelle du potentiel de SE de fourniture en azote au fur et à mesure des années de simulation et donc à une sous-estimation du niveau potentiel de ce SE considérant l'état initial retenu dans le plan de simulation en terme de taux et qualité (rapport C/N) de matière organique dans le sol. Aussi, par construction, le ratio de rendements simulés sans intrants et avec intrants tend à diminuer au fil des années de simulation. Les options de plan de simulation discutées dans l'annexe 8-A pourraient permettre de résoudre ce biais de calcul.

10.1.2.3. Perspectives de recherche

Deux grands types de perspectives de recherche peuvent être identifiées ici : à court terme dans la continuité des travaux et à moyen et long terme pour développer ceux-ci.

A court terme, il est nécessaire de consolider les résultats sur la part de la production agricole permise par les SE de fourniture en azote et de restitution de l'eau. Ainsi, il serait nécessaire de :

- développer des analyses statistiques (multivariée, de variance et régression multiples) sur les relations entre part de la production permise par l'écosystème, déterminants biophysiques et facteurs exogènes. L'enjeu ici est d'essayer de « détricoter » les effets et les interactions entre [type de sol x type de climat x type de séquences x pratiques agricoles] afin de clarifier la nature des relations dominantes.
- analyser la dynamique de l'état organique des sols dans les simulations sans et avec intrant et leurs effets sur les niveaux de rendement permis par les SE de fourniture en azote et de l'eau afin d'analyser les effets relatifs de ces dynamiques sur l'évaluation de la part de la production permise par l'écosystème,
- analyser l'effet des légumineuses dans les séquences de culture qui en comporte voire réaliser de nouvelles simulations intégrant plus de légumineuses pour évaluer leurs effets sur les résultats,
- analyser plus finement les effets des couverts intermédiaires sur la dynamique des SE de fourniture en azote et de l'eau dans les deux jeux de simulation (sans et avec intrants)
- analyser les interactions entre les SE liés aux cycles du carbone, de l'azote et de l'eau pour identifier les antagonismes existant en fonction des situations de production et identifier des configurations d'écosystèmes agricoles et des pratiques exogènes permettant de les réduire voire de lever ces antagonismes et de favoriser les synergies entre SE,
- analyser les cas particuliers d'années de simulation pour lesquels les rendements sans intrant sont supérieurs à ceux avec intrant afin d'en expliquer le comportement,
- ...

A moyen et long terme, il serait nécessaire d'étendre l'analyse à des systèmes alternatifs basés sur une biodiversité planifiée dans le temps et l'espace plus importante et de prendre en compte les régulations

biologiques et les pratiques phytosanitaires. Pour cela, il sera nécessaire de développer des modèles permettant de simuler :

- les interactions entre espèces/variétés au sein de l'espace cultivée voire au sein de la parcelle (ex. interaction entre espèces annuelles et formations ligneuses) concernant la compétition pour la lumière, les nutriments et l'eau et leurs effets sur le cycle du carbone,
- les effets de techniques de non labour, seules ou combinées avec des pratiques de couverture du sol et de diversification des rotations, sur les cycles du carbone, de l'azote et l'eau,
- les dynamiques des bioagresseurs, des régulations biologiques et des dommages et l'effet des phytosanitaires sur ceux-ci considérant la biodiversité planifiée dans la parcelle et la matrice paysagère.

10.1.3. Evaluation économique de la part de la production végétale permise par les SE de fourniture en azote et de restitution d'eau aux plantes cultivées

10.1.3.1. Stratégie d'évaluation retenue

L'évaluation économique de la valeur de la part de la production permise par les SE de fourniture en azote et de stockage et restitution d'eau aux plantes cultivées est basée sur la logique générale suivante :

Valeur économique annuelle par culture = part moyenne de la production permise par les SE x niveau moyen de rendement sur les années 2010-2012 x surface moyenne sur les années 2010-2012 x prix moyen sur les années 2010-2012.

Aussi, l'évaluation économique a été réalisée en cinq grandes étapes :

(i) estimation d'un niveau moyen de part de la production permise par les SE par culture et par unité pédoclimatique via une procédure de changement d'échelle prenant en compte le poids relatif des simulations dans l'UPC (correspond aux résultats présentés dans la section précédente).

(ii) estimation des surfaces et des rendements moyens sur la période 2010 à 2012 par culture par UPC sur la base des surfaces des RPG annuels et des rendements annuels départementaux AGRESTE (utilisés pour estimer le niveau de production totale en section 10.1.2.2).

(iii) estimation du prix moyen par culture. Pour chaque culture considérée, les prix ont été estimés par calcul du prix moyen sur les trois années 2010, 2011, 2012 à partir de la base de données FAOSTAT (comme pour l'évaluation économique du SE de pollinisation des espèces cultivées). Les surfaces de blé dur ont été assimilées à des surfaces de blé tendre en terme de ratio de production permise par les SE (Cf Annexe 8-A) et de prix (pas de distinction entre différents types de blé dans la base FAOSTAT). La valeur économique du maïs fourrage a été estimée en relatif du maïs grain via l'utilisation d'un coefficient d'un demi (0,5)⁹ pour traduire les niveaux moyens de rendement exprimés en tonne de matière sèche par hectare (t MS/ha) en équivalent tonne de grain de maïs par ha (t/ha) puis en appliquant le prix (€/t) du maïs grain. Les données sur le prix moyen de la culture de pois n'étant pas disponible dans le référentiel FAO cette culture n'a pas été considérée ci-après. Elle représente en moyenne, sur la période 2010-2012, environ 2% de la surface en grandes cultures et cultures industrielles.

(iv) estimation de la valeur économique de la part de la production permise par les SE par culture par UPC par application de la formule présentée en introduction de cette section.

(v) estimation de la valeur économique de la part de la production permise par les SE par culture pour toutes les surfaces de cette culture en France métropolitaine. Dans cette procédure, pour chaque culture simulée (Cf. tableau ci-dessous) la valeur de la part de la production permise par les SE estimé en étape (iv) est extrapolée, proportionnellement, à l'ensemble de la surface de la culture en France c.-à-d. aux surfaces non comprises dans les UPC simulées. Les surfaces utilisées ici correspondent à la surface totale moyenne sur 2010-2012 France entière par culture (moyenne des surfaces des RPG annuels). La surface totale d'extrapolation

⁹ [http://www.bretagne.synagri.com/ca1/PJ.nsf/TECHPJPARCLEF/27640/\\$File/Fiche-Ma%C3%AFs-fourrage-sur-pied-indications%20de%20prix2016-09-08.pdf?OpenElement](http://www.bretagne.synagri.com/ca1/PJ.nsf/TECHPJPARCLEF/27640/$File/Fiche-Ma%C3%AFs-fourrage-sur-pied-indications%20de%20prix2016-09-08.pdf?OpenElement)

considérée ici est de 13 214 857 d'ha alors que la surface RPG moyenne de grandes cultures (y c. de cultures industrielles) France entière sur 2010-2012 est de 14 811 520 ha. La surface considérée dans cette évaluation économique correspond donc à plus de 89% de la surface moyenne sur 2010-2012 de grandes cultures en France métropolitaine.

10.1.3.2. Analyse des résultats de l'évaluation économique

Les résultats de l'évaluation économique sont présentés dans le tableau 10-1-3. Ils correspondent à un premier ordre de grandeur de la valeur économique de la part de la production permise par les SE de fourniture en azote et de restitution de l'eau pour les surfaces d'écosystèmes agricoles couvertes par les principales grandes cultures en France et la betterave sucrière, et doivent être analysés avec précaution. A l'échelle de la France, ils sont d'autant plus incertains que la surface RPG d'une culture donnée dans les UPC simulées est faible relativement à la surface totale de cette culture en France. En effet, la qualité de l'extrapolation dépend de la représentativité du jeu de données simulées relativement à l'ensemble des surfaces de culture. Ainsi, l'évaluation sur les surfaces totales de maïs fourrage est particulièrement incertaine puisque les surfaces de ces cultures dans les UPC simulées représentent une part minoritaire de la surface totale de celles-ci : 31 % des surfaces totales. Les évaluations pour le maïs grain et le tournesol sont elles aussi à analyser au regard de la représentativité des surfaces simulées (53 % des surfaces totales pour ces deux cultures). Ces faibles représentativités sont liées au fait que ces cultures sont faiblement représentées dans les séquences dominantes (en termes de surface) par UPC qui ont été simulées avec STICS dans EFESE-écosystèmes agricoles.

La valeur annuelle totale (toute culture) de la part moyenne de la production permise par les SE de fourniture en azote et de restitution de l'eau est de l'ordre de 9,8 milliards d'euros pour les 89% des surfaces de grandes cultures et cultures industrielles de France métropolitaine sur la période 2010 à 2012. Elle représente **50 % de la valeur moyenne de la production totale pour les surfaces considérées** (valeur totale de production = 19,6 milliards d'euros).

Tableau 10-1-3. Valeurs annuelles moyennes de la part de la production permise par les SE de fourniture en azote et restitution de l'eau à l'échelle de la France entière estimées pour sept cultures

La part moyenne de la production permise par les SE de fourniture en azote et de restitution de l'eau est donnée à titre indicatif par type de culture. Voir explication de la procédure de calcul dans la section 10.1.2.1.

Pour chaque culture, la représentativité de la surface prise en compte dans le dispositif de simulation relativement à la surface totale de la culture à l'échelle de la France entière a été calculée en divisant la surface occupée par la culture dans les UPC où elle est simulée par la surface totale de la culture (connue via le Registre parcellaire graphique).

Les données sur le prix moyen de la culture de pois n'étant pas disponible dans le référentiel FAO, cette culture n'a pas été considérée ci-après. Elle représente en moyenne, sur la période 2010-2012, environ 2 % de la surface en grandes cultures et cultures industrielles.

Les valeurs présentées dans ce tableau fournissent des premiers ordres de grandeur qu'il faut analyser au regard des hypothèses et des méthodes d'évaluation mobilisées.

Culture :	Part moyenne de la production permise par les SE azote et eau (%)	Surface "UPC" de la culture = surface occupée par la culture dans les UPC où elle est simulée (ha ; moyenne 2010-12)	Prix moyen (€/t ; moyenne 2010-12)	Valeur de la part moyenne de la production permise par les SE azote et eau (M€/an)	Surface totale de la culture = surface occupée par la culture à l'échelle France entière (ha ; moyenne 2010-12, extrapolation)	Valeur moyenne de la part de la production permise par les SE azote et eau à l'échelle de la France métropolitaine (M€/an)	Valeur totale moyenne de la production agricole à l'échelle de la France métropolitaine (M€/an)	Représentativité des surfaces prises en compte dans le dispositif de simulation = surface "UPC" / surface totale
Betterave sucrière	34 %	302 335	35,4	315 528 826 €	437 165	456 243 505 €	1 372 906 610 €	69 %
Blé	58 %	3 958 377	200,4	3 240 365 245 €	6 006 826	4 917 244 391 €	8 605 445 592 €	66 %
Orge	58 %	1 119 855	179,8	743 030 998 €	1 548 366	1 027 351 262 €	1 794 341 505 €	72 %
Colza	28 %	1 083 475	434,8	419 021 310 €	1 590 907	615 264 964 €	2 319 538 281 €	68 %
Maïs fourrage	67 %	385 833	98,0	333 436 942 €	1 264 859	1 093 092 747 €	1 588 634 058 €	31 %
Maïs grain	41 %	867 926	195,9	619 542 658 €	1 643 784	1 173 364 973 €	3 128 829 857 €	53 %
Tournesol	68 %	383 282	445,1	285 900 233 €	722 950	539 268 350 €	756 806 852 €	53 %
TOTAL	/	8 101 082	/	5 956 826 211 €	13 214 857	9 821 830 191 €	19 566 502 755 €	/

Les surfaces de blé dur ont été assimilées à des surfaces de blé tendre en terme de ratio de production permise par les SE et de prix.

Les surfaces d'orge ont été assimilées à des surfaces de blé tendre en terme de ratio de production permise par les SE.

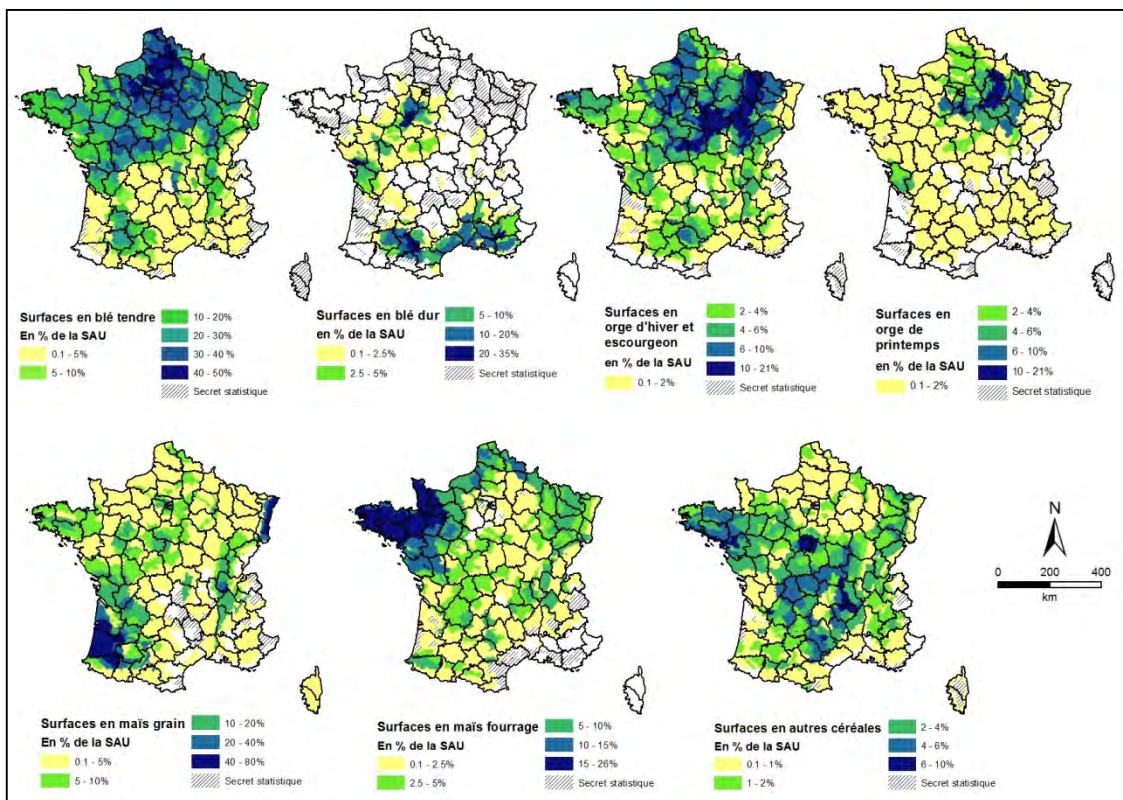
La valeur économique du maïs fourrage a été estimée en relatif du maïs grain *via* l'utilisation d'un coefficient (0,5) pour traduire les niveaux moyens de rendement exprimés en tonne de matière sèche par hectare (t MS/ha) en équivalent tonne de grain de maïs par ha (t/ha), puis en appliquant le prix (€/t) du maïs grain.

Complément : distributions spatiales des principales cultures en France en 2010

1.1. Les cultures céréalières et maïs fourrage

Principale culture pratiquée en France, le blé occupe 18,2% en 2010, soit presque 5 Mha. Le blé se cultive dans toutes les régions françaises, mais c’est dans les régions céréalières du nord de la France qu’il prédomine en occupant plus de 40% de la SAU (Figure).

Figure 1 - Part des surfaces en céréales et maïs fourrage dans la SAU par région agricole en 2010 - Source : Recensement Agricole



Les surfaces en blé dur sont beaucoup plus restreintes et atteignent 506 000 ha, soit 1.8% de la SAU en 2010. Elles sont également beaucoup plus localisées, principalement dans deux zones en France (Provence et Midi-Pyrénées d’une part et d’autre part dans une partie du bassin parisien, notamment le sud de la Beauce). Une troisième implantation se développe depuis les années 2000 en Vendée et Charente-Maritime.

En 2010, l’orge et l’escourgeon, figurent au 4^{ème} rang des cultures françaises, derrière le blé, les prairies temporaires et le maïs grain et occupent près de 1,5 Mha, soit 5.8% de la SAU française. L’orge d’hiver représente les 2/3 des surfaces en orge. Cette culture est présente dans toute la France, mais on peut remarquer que les surfaces en orge d’hiver sont surtout concentrées (entre 10 et 21% de la SAU) le long d’un croissant allant des plateaux du Barrois et de Langres au nord-est jusqu’à la Champagne berrichonne du centre de la France. L’orge de printemps est également répartie sur une grande partie du territoire français mais n’est vraiment très présent (> à 10%) que dans quelques régions agricoles où s’est développée une filière d’orge brassicole de qualité (Champagne crayeuse et Gâtinais). Il est également très présent (entre 6 et 10% de la SAU) sur les plateaux du Barrois et de Bourgogne, dans le Pays-Haut lorrain et la Beauce.

C’est le maïs grain (et semence) qui est devenu, depuis la fin des années 1980, la principale céréale cultivée en France derrière le blé avec 1.6 Mha et près de 6% de la SAU. Même s’il est présent presque partout en France, sa distribution spatiale est particulièrement contrastée. Il dépasse en effet 40% de la SAU dans les Landes, dans

la Plaine d’Alsace, ainsi que dans les Dombes. Il est bien implanté également en Bretagne, dans la vallée du Rhône, en Sologne mais également en périphérie parisienne et le long de la côte atlantique.

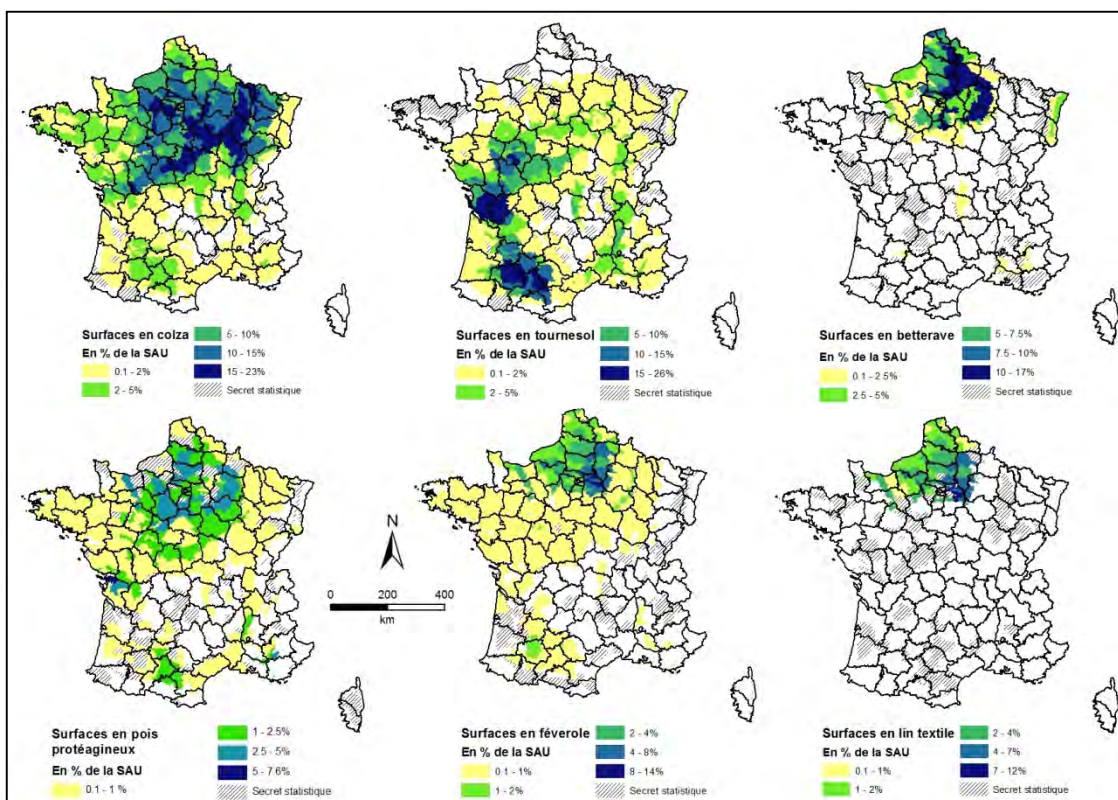
Le maïs fourrage est la deuxième culture fourragère de France avec ses 1.4Mha (environ 5% de la SAU), essentiellement répartis sur le nord de la France le long d’une couronne englobant toutes les régions périphériques du bassin parisien allant de la Bretagne au Jura, en passant par la Normandie, le Nord-Pas-de-Calais, les Ardennes et la Lorraine. Il est donc caractéristique de toutes les régions d’élevage, mais beaucoup plus de celles de l’ouest. En effet, il dépasse 10% et fréquemment 15% de la SAU dans toute la Bretagne et Pays de Loire, tandis qu’il reste inférieur à 10% dans les régions d’élevage de l’est.

Enfin, les autres céréales (avoine, seigle, triticale), également appelées céréales secondaires, représentent environ 500 000 ha en France (1.8% de la SAU). Les surfaces qui se maintiennent aujourd’hui sont liées à la présence de l’élevage qui permet un débouché pour le triticale en autoconsommation (Bretagne, Sologne, Grands Causses, Monts du Forez).

1.2. Les cultures dites « industrielles »

Principale plante industrielle cultivée, le colza occupe 1.46 Mha soit 5.4% de la SAU française. Il est présent sur presque tout le territoire, mais particulièrement dans la moitié nord de la France où il occupe plus de 5% de la SAU, à l’exception de la Bretagne, de l’Alsace et du Nord-Pas-de Calais (Figure). A l’instar de l’orge d’hiver, il est particulièrement présent sur les « petites terres à cailloux » des plateaux du Barrois au Nord-Est en formant un croissant jusqu’à la Champagne berrichonne où il dépasse souvent 15% de la SAU. Mais il est également très présent sur le reste du bassin parisien, notamment en Beauce et sur le Plateau d’Evreux Saint-André.

Figure 2 - Part des surfaces en cultures industrielles dans la SAU par région agricole en 2010 - Source : Recensement Agricole



Le tournesol est la deuxième culture industrielle derrière le colza avec ses presque 700 000 ha (2.5% de la SAU). Sa localisation apparaît complémentaire de celle du colza puisqu’il occupe de vastes surfaces en Midi-Pyrénées et en Poitou-Charentes, où il dépasse 10% de la SAU.

Avec ses 400 000 ha (soit 1.4% de la SAU française) en 2010, les surfaces en betterave industrielle varient peu au cours du temps grâce au système de quota dont elle bénéficie. Cette culture est essentiellement inféodée aux plateaux limoneux du nord de la France, ainsi qu'à la Champagne Crayeuse et au Gâtinais, où elle dépasse 10% de la SAU. Mais elle est également présente de manière significative (>5% de la SAU) en Beauce, en Normandie (Plaine de Caen, Pays de Caux) ainsi qu'en Plaine d'Alsace.

Le pois protéagineux n'occupe plus que 240 000 ha en 2010¹⁰, soit 0.8% de la SAU. Sa localisation est essentiellement concentrée sur le bassin parisien (notamment Champagne crayeuse, Beauce et Plaine de Caen), mais quelques implantations secondaires se développent en Poitou-Charentes et en Midi-Pyrénées (Lauragais).

La féverole, arrivée en substitution du pois, tend à se rapprocher du pois protéagineux en termes de surfaces cultivées (autour de 150 000 ha), en particulier en 2010 avec le plan Protéagineux qui lui a permis de doubler ses surfaces (généralement situées autour de 60 à 80 000 ha sur la période 2002-2015). Toutefois, elle reste une culture marginale, même si elle peut être localement assez répandue (> 4% de la SAU), notamment en Brie ainsi qu'en Normandie et en Picardie.

Enfin, le lin textile concerne de faibles surfaces (55 000 ha en 2010), qui sont très localisées car essentiellement implantées le long du littoral de la Manche en Normandie, Picardie et Nord Pas-de-Calais. Mais les surfaces les plus importantes se sont développées en Brie, ainsi que sur les plateaux limoneux de l'Aisne et de l'Oise (> à 4% de la SAU).

1.3. Les cultures fourragères et cultures spécialisées

Les prairies temporaires arrivent en deuxième position derrière le blé en termes de surfaces cultivées en France avec 3.2 Mha et près de 12% de la SAU. Elles sont présentes sur tout le territoire mais sont particulièrement développées dans certaines régions d'élevage de l'ouest, le long d'un croissant qui part de la Bretagne et des Pays de Loire et qui se poursuit jusque dans le Limousin, le Ségala et les Grands Causses (Figure). Dans ces régions, les surfaces en prairies temporaires dépassent 20%, et peuvent atteindre 60% de la SAU.

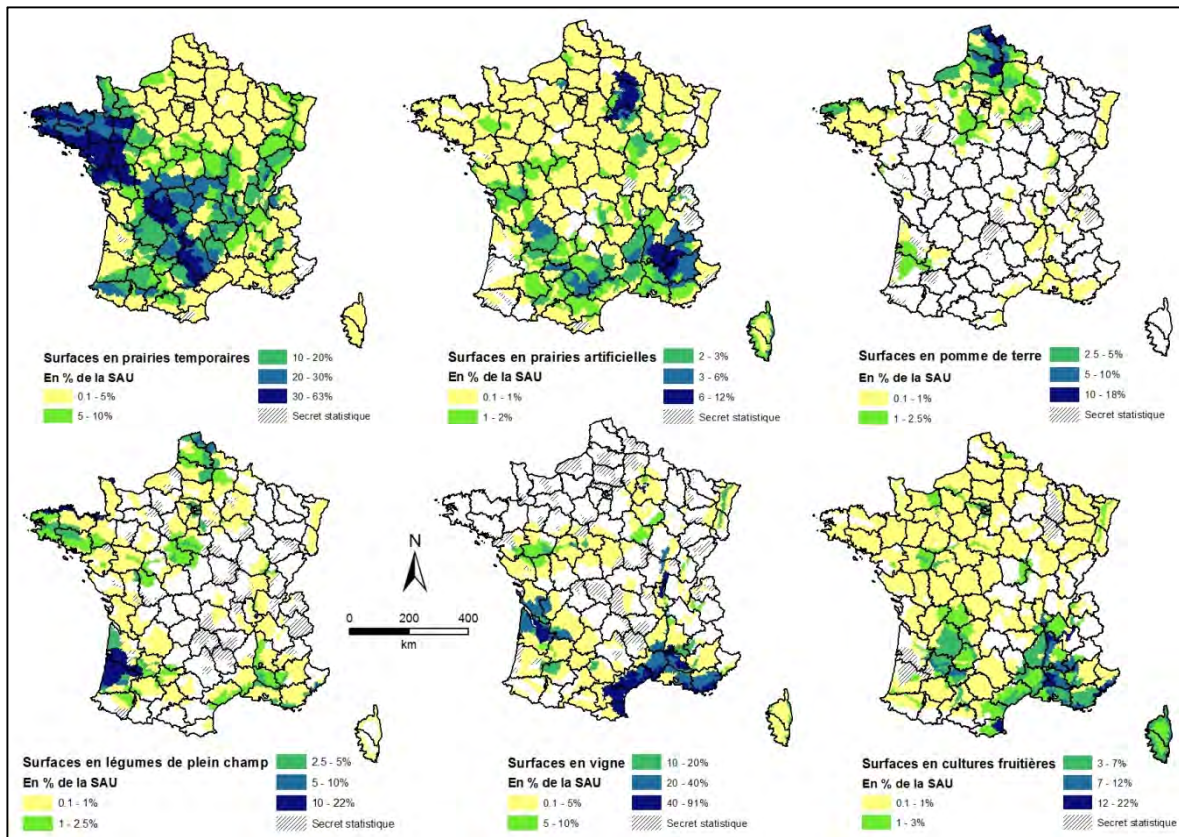
Les prairies artificielles restent encore à l'heure réparties sur l'ensemble du territoire mais ne représentent plus, en 2010, que 280 000 ha soit 1% de la SAU française. Elles restent encore significativement présentes – entre 6 et 12% de la SAU) en Champagne crayeuse, où elles se maintiennent grâce à la filière de déshydratation de la luzerne pour l'alimentation animale, mais également dans une partie de la Drôme et des Hautes-Alpes (Diois, Baronnies) où elle serait produite par les éleveurs pour être consommée directement par les troupeaux. On la retrouve également, mais de manière plus diffuse, dans certaines régions agricoles du sud et de l'ouest de la France (Tarn, Aveyron, Dordogne).

Les pommes de terre représentent environ 150 000 ha dans la SAU française, soit 0.5% de la SAU en 2010. Les principales régions productrices sont le Nord-Pas-de-Calais et la Picardie, où les surfaces dépassent localement 10% de la SAU (Santerre, région de Lille), mais on en retrouve également des surfaces importantes en Pays de Caux, Champagne crayeuse, Beauce, ainsi que le long du littoral nord de la Bretagne.

Les légumes de plein champ représentent environ 200 000 ha en France en 2010. Ces surfaces se retrouvent essentiellement en Bretagne (côte du Morbihan) et dans le Cotentin, autour de Paris, dans le nord de la France, en Sologne et en Provence. Mais les plus grandes surfaces se trouvent dans les Landes.

Figure 3 - Part des surfaces en cultures fourragères et cultures spécialisées dans la SAU par région agricole en 2010 - Source : Recensement Agricole

¹⁰ Les données SAA montrent que les surfaces en pois et féverole présentes en 2010 sont ponctuellement plus élevées (environ x2) cette année-là en raison du plan Barnier de relance des protéagineux. Les valeurs 2010 ne sont donc pas représentatives de la période 2008-2015.



En 2010, les surfaces en vigne occupent près de 800 000 ha, soit près de 3% de la SAU. Leur implantation suit la répartition des grands vignobles français: au nord, Alsace, Champagne, Pays de Loire, Bourgogne et au sud, les plus grandes surfaces, Bordeaux, Côtes du Rhône, Provence et Languedoc-Roussillon, où ces surfaces dépassent 20, voire 40% de la SAU.

Les cultures fruitières représentent des surfaces faibles (environ 190 000 ha) et réparties de manière diffuse sur l'ensemble du territoire. Les régions où ces cultures sont significatives (> à 7% de la SAU) se retrouvent essentiellement le long de la vallée du Rhône, de la vallée du Grésivaudan, du littoral niçois et dans la Plaine du Roussillon, mais on en retrouve également des surfaces importantes dans le Tarn-et-Garonne, le Lot-et-Garonne et la Dordogne ainsi que tout le long du littoral méditerranéen et en Corse. Au nord, c'est autour de l'agglomération parisienne et le long de la vallée de la Loire que les surfaces sont les plus importantes.

2. Fertilisation organique et minérale par culture et par région

Figure 4 - Part de surface ayant reçu une fertilisation organique par culture et par région
(Source : Enquête Pratiques Culturelles sur grandes cultures)

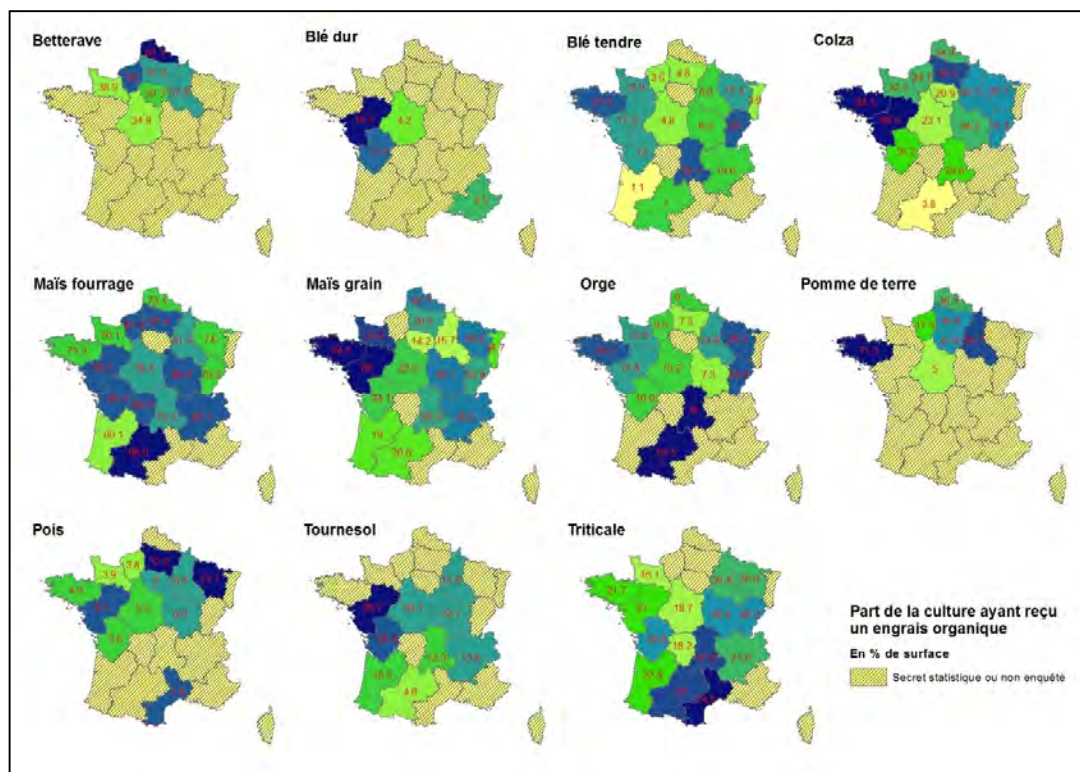


Figure 5 - Part de surface ayant reçu une fertilisation minérale par culture et par région en 2011
(Source : Enquête Pratiques Culturelles sur grandes cultures)

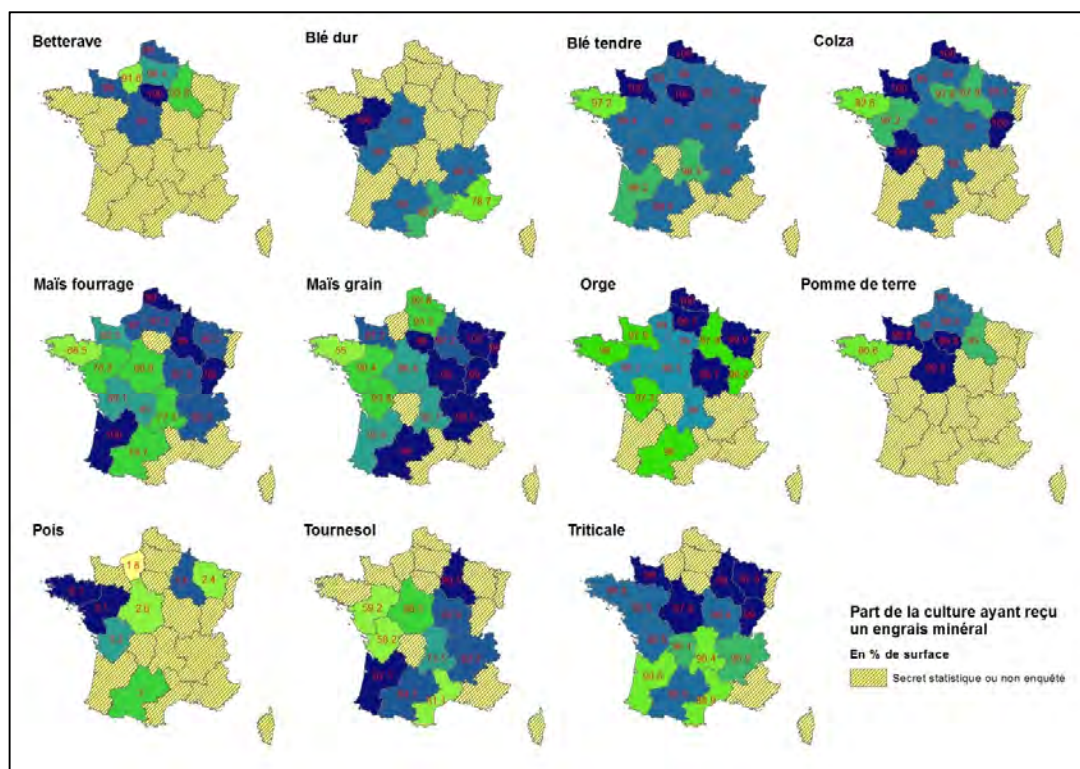


Figure 6 - Dose moyenne d'azote minéral reçue par culture et par région en 2011 - sur les parcelles en ayant reçu (Source : Enquête Pratiques Culturelles sur grandes cultures)

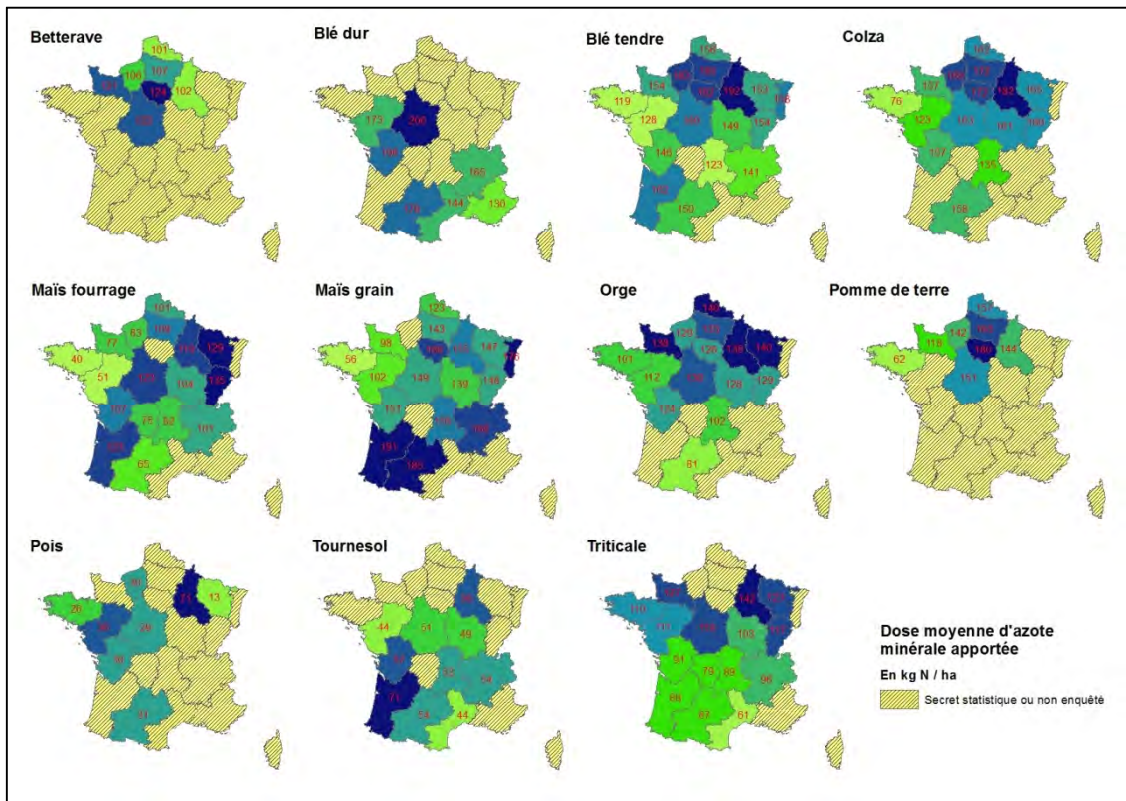
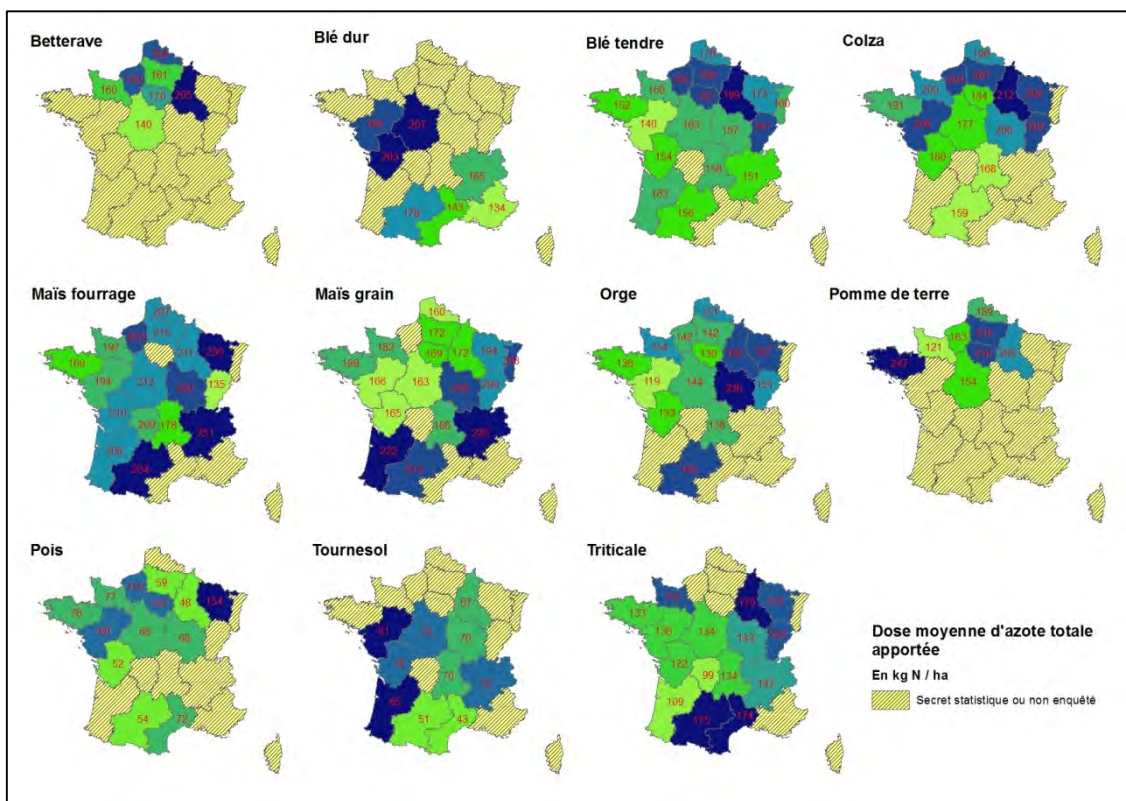


Figure7 - Quantité d'azote totale (organique et minérale) moyenne apportée par culture et par région en 2011 (sur les parcelles en ayant reçu) (Source : Enquête Pratiques Culturelles sur grandes cultures)



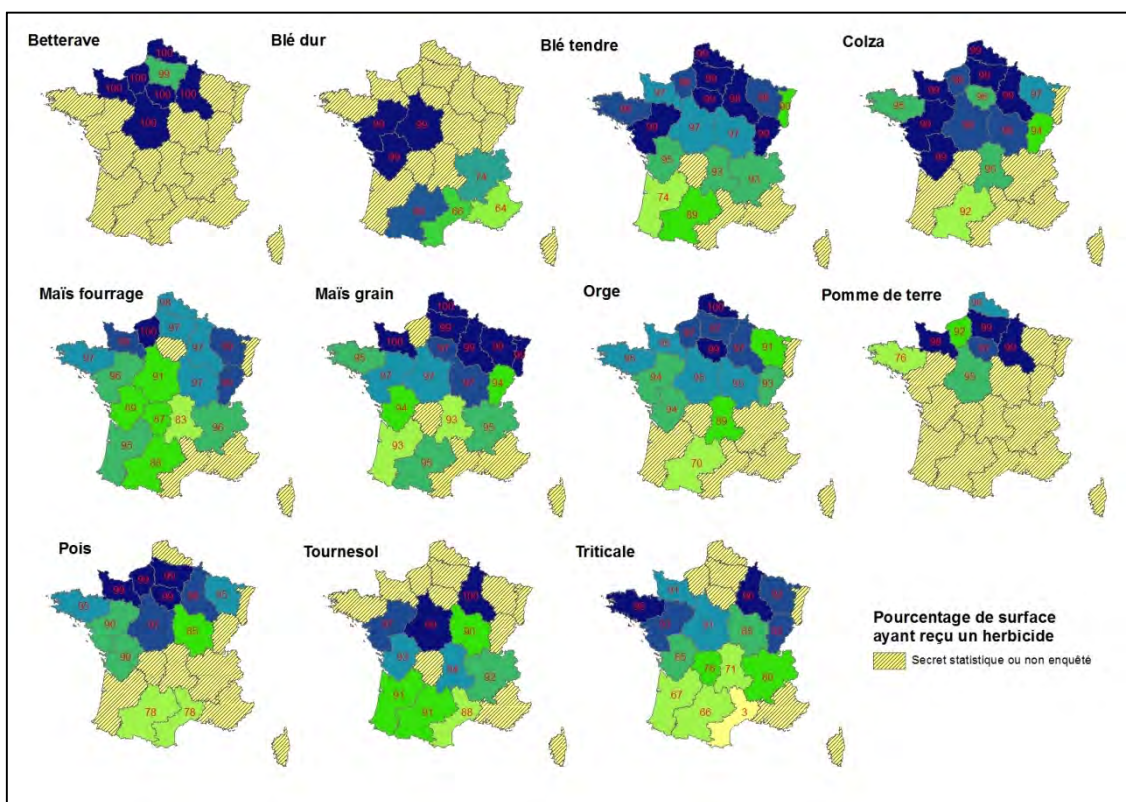
3. Pratiques phytosanitaires en France

3.1. Les traitements herbicides

En moyenne nationale, les pourcentages de traitement herbicides ne sont pas très différenciés entre cultures car ils se situent entre 99 et 100% de surfaces traitées (à l'exception du triticale avec 98%).

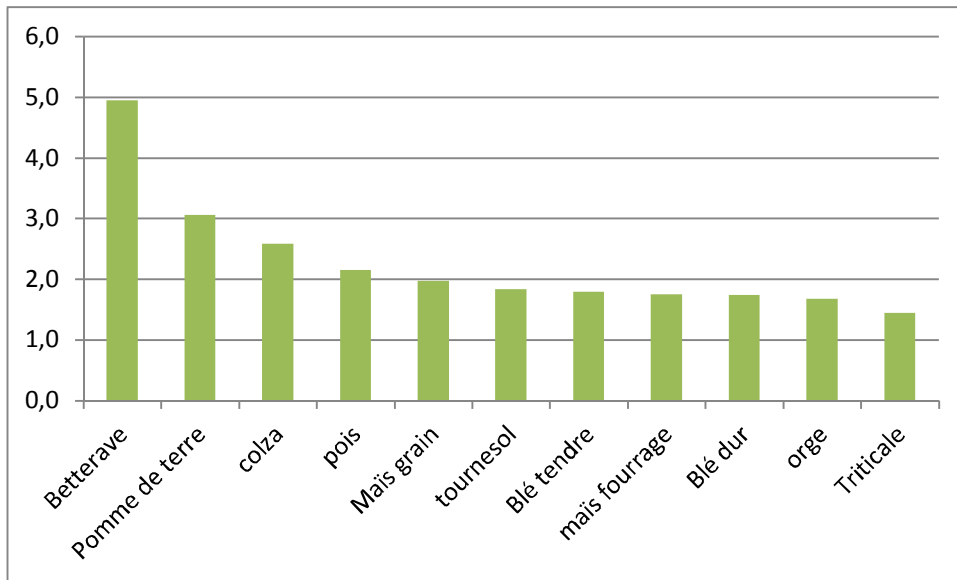
En observant la distribution de ces pratiques de désherbage à la maille régionale, il s'avère que ces pratiques sont beaucoup moins homogènes à l'échelle de la France. Pour toutes les cultures dont l'extension spatiale est suffisamment large, on remarque un gradient nord-sud important : les régions les plus fréquemment traitées sont situées au nord de la France.

Figure 8 - Pourcentage de surface ayant reçu un traitement herbicide par culture et par région en 2011
(Source : enquête Pratiques Culturelles sur grandes cultures 2011)



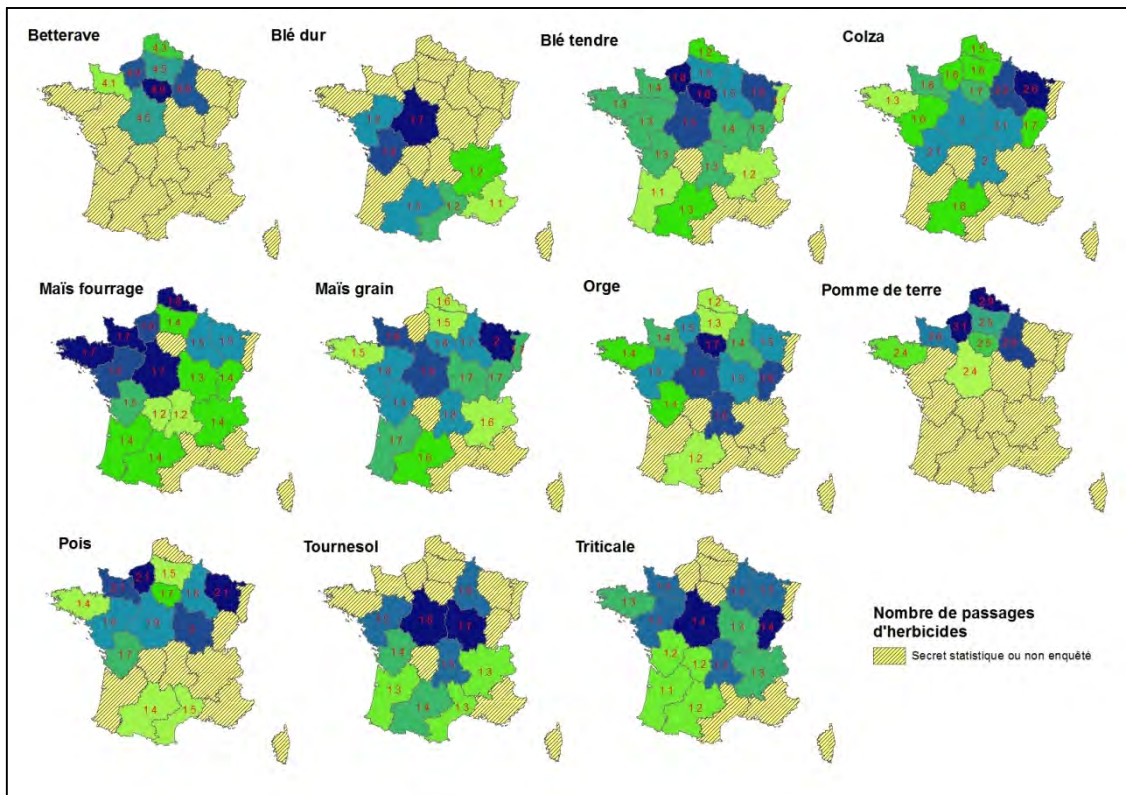
En termes de nombre de passages d'herbicides, il y a beaucoup plus de contrastes entre cultures : la betterave est de loin la culture la plus traitée (avec 4.9 passages), suivie de la pomme de terre (3.1), du colza (2.6). Hormis le triticale qui ne reçoit en moyenne qu'1.4 passage, les autres cultures reçoivent en moyenne entre 1.7 et 2.1 passages d'herbicides.

Figure 9 - Nombre de passages d'herbicides par culture en France en 2011
(Source : enquête Pratiques Culturelles sur grandes cultures 2011)



Au niveau régional, les distributions sont plus nuancées que le simple gradient nord-sud décrit précédemment pour le pourcentage de surface traitée.

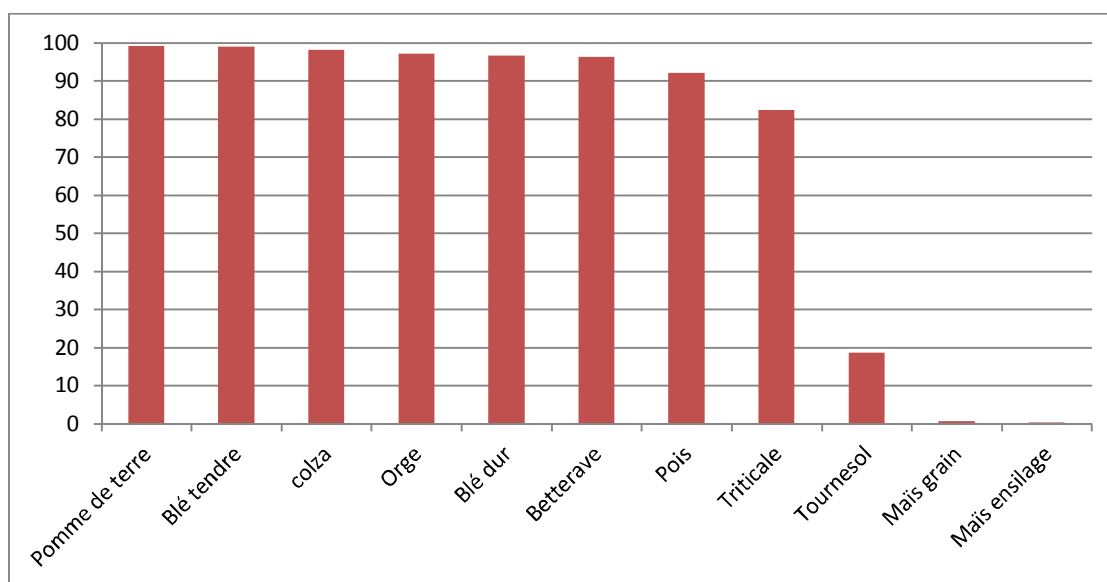
Figure 10 - Nombre de traitements herbicides par culture et par région en 2011
(Source : enquête Pratiques Culturelles sur grandes cultures 2011)



3.2. Les traitements fongicides

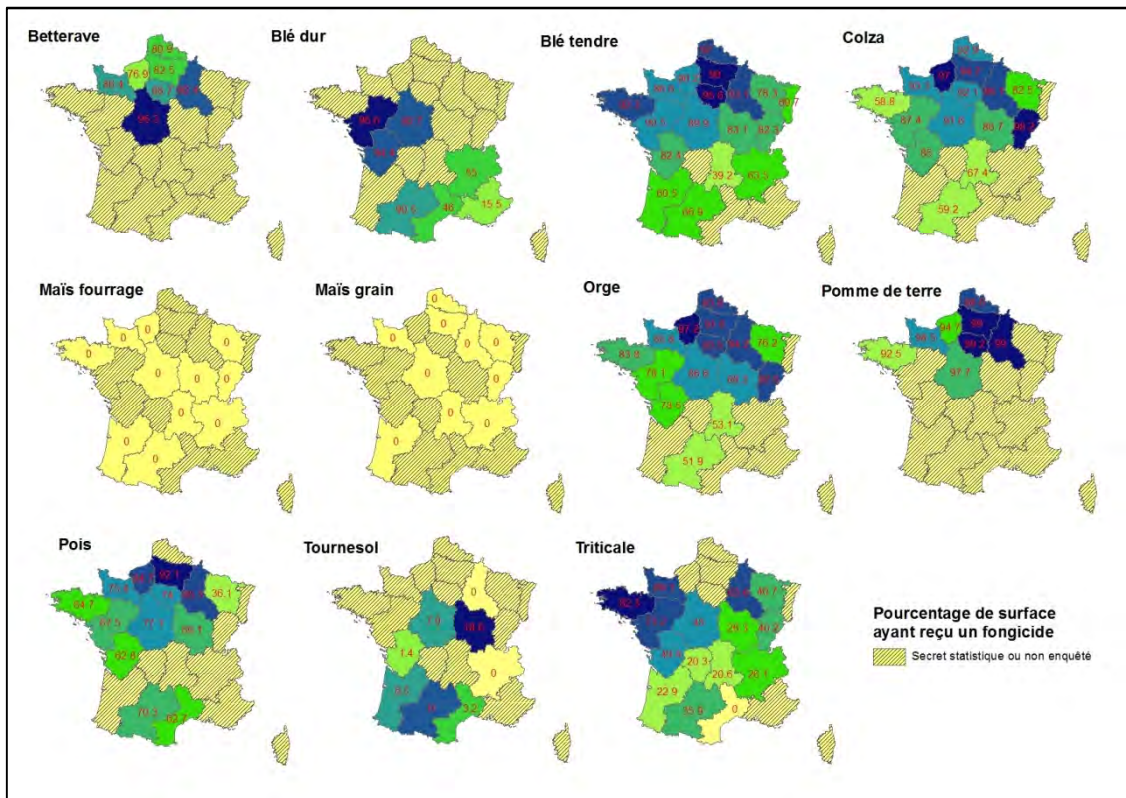
Les traitements fongicides concernent un peu moins de cultures que les traitements herbicides puisque le maïs n'en reçoit pas, le tournesol très peu (19% des surfaces en France environ) et ces traitements ne sont pas systématiques sur le triticale (82% de surfaces traitées) et le pois (92%). En revanche, il dépasse 96% des surfaces sur toutes les autres cultures.

Figure 11 - Pourcentage de surfaces ayant reçu un fongicide par culture en France en 2011
(Source : enquête Pratiques Culturelles sur grandes cultures 2011)



En termes de distribution spatiale, on remarque à nouveau un gradient nord-sud marqué : les régions du nord de la France recourent plus régulièrement aux traitements fongicides. Seul le tournesol montre une distribution plus contrastée avec aucune surface traitée en Champagne et Rhône-Alpes. A noter également que le colza est plus traité en Haute-Normandie et Franche-Comté.

Figure12 - Pourcentage de surface ayant reçu un traitement fongicide par culture et par région en 2011
(Source : enquête Pratiques Culturelles sur grandes cultures 2011)



En termes de nombre de passages, la pomme de terre est de loin la culture la plus traitée avec en moyenne 13.6 passages de fongicides. Viennent ensuite les céréales, le colza, la betterave et le pois avec 2 passages et plus. Le triticale n’en reçoit qu’1.5 en moyenne et le tournesol un (aucun pour le maïs).

Figure 13 - Nombre de passages de fongicides par culture en France en 2011
(Source : enquête Pratiques Culturelles sur grandes cultures 2011)

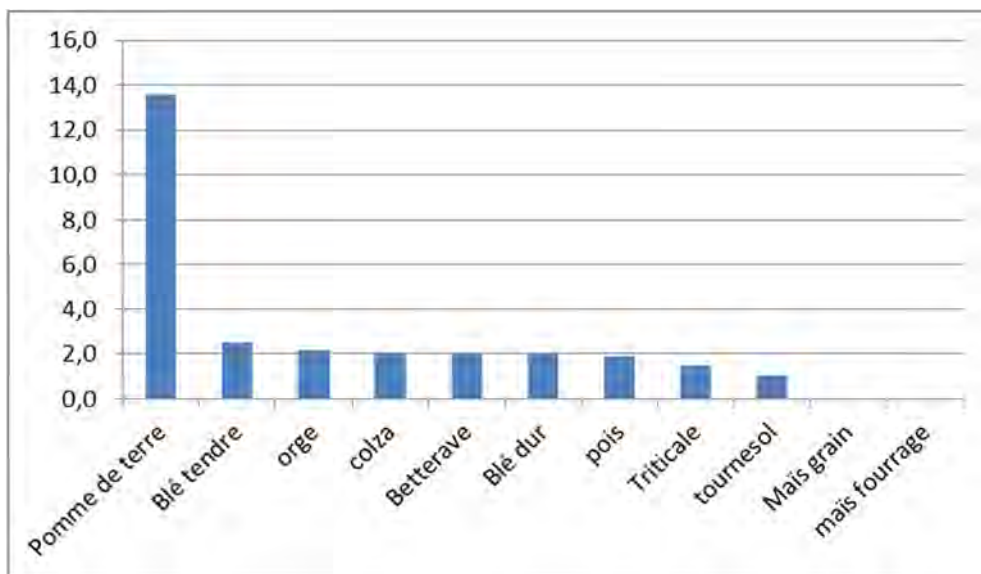
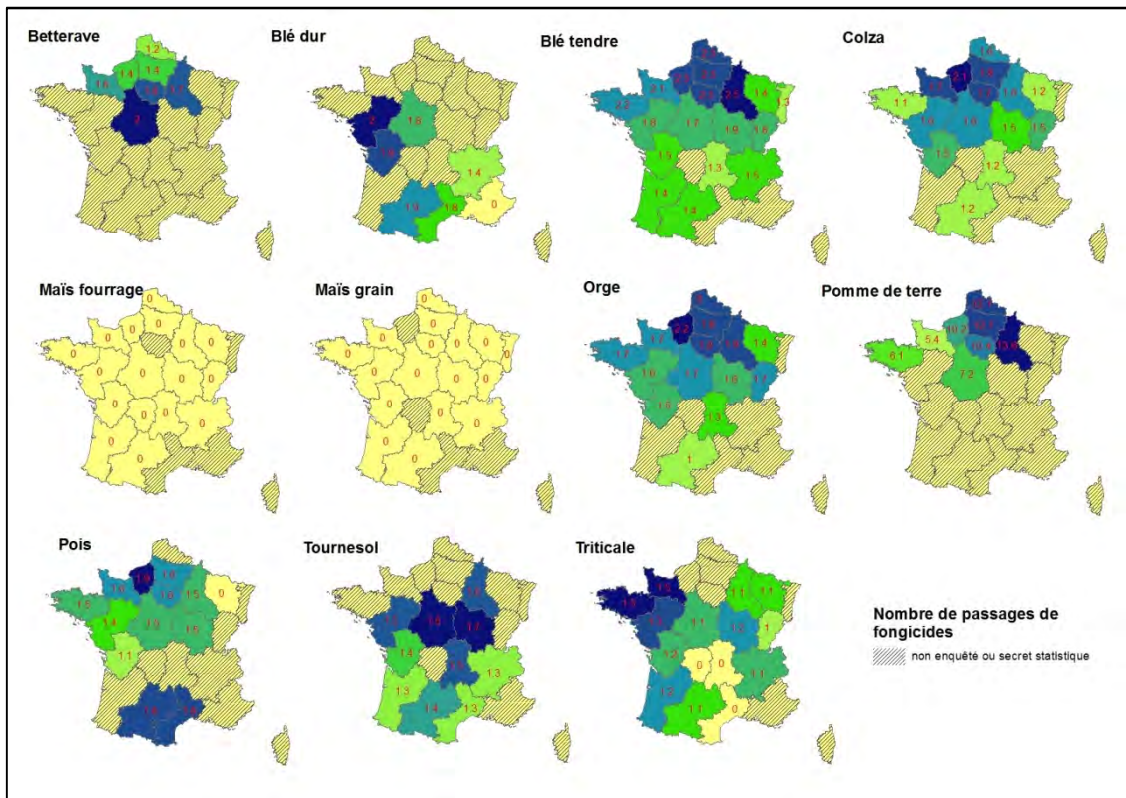


Figure 14 - Nombre de passages de fongicides par culture et par région en 2011
(Source : enquête Pratiques Culturelles sur grandes cultures 2011)



3.3. Les traitements insecticides

Figure 15 - Pourcentage de surfaces ayant reçu un insecticide par culture en France en 2011
(Source : enquête Pratiques Culturelles sur grandes cultures 2011)

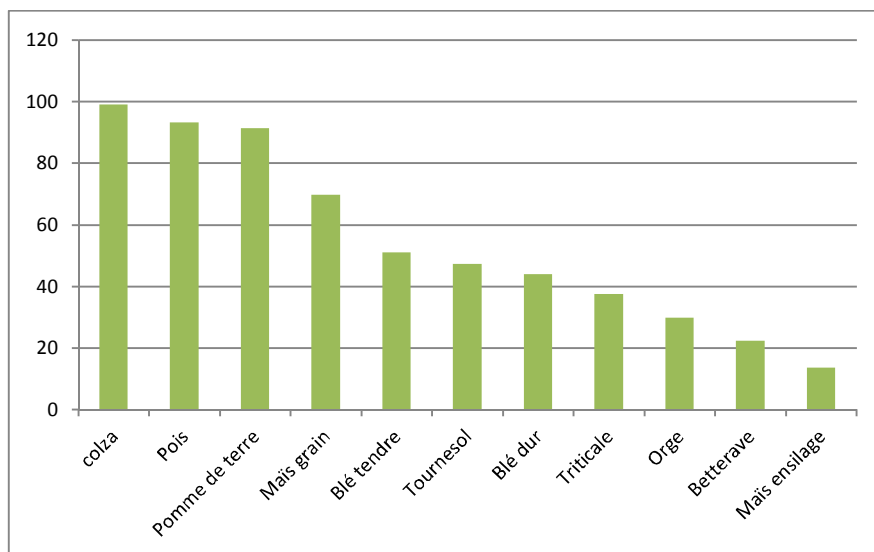


Figure 16 - Pourcentage de surface ayant reçu un traitement insecticide par culture et par région en 2011
(Source : enquête Pratiques Culturelles sur grandes cultures 2011)

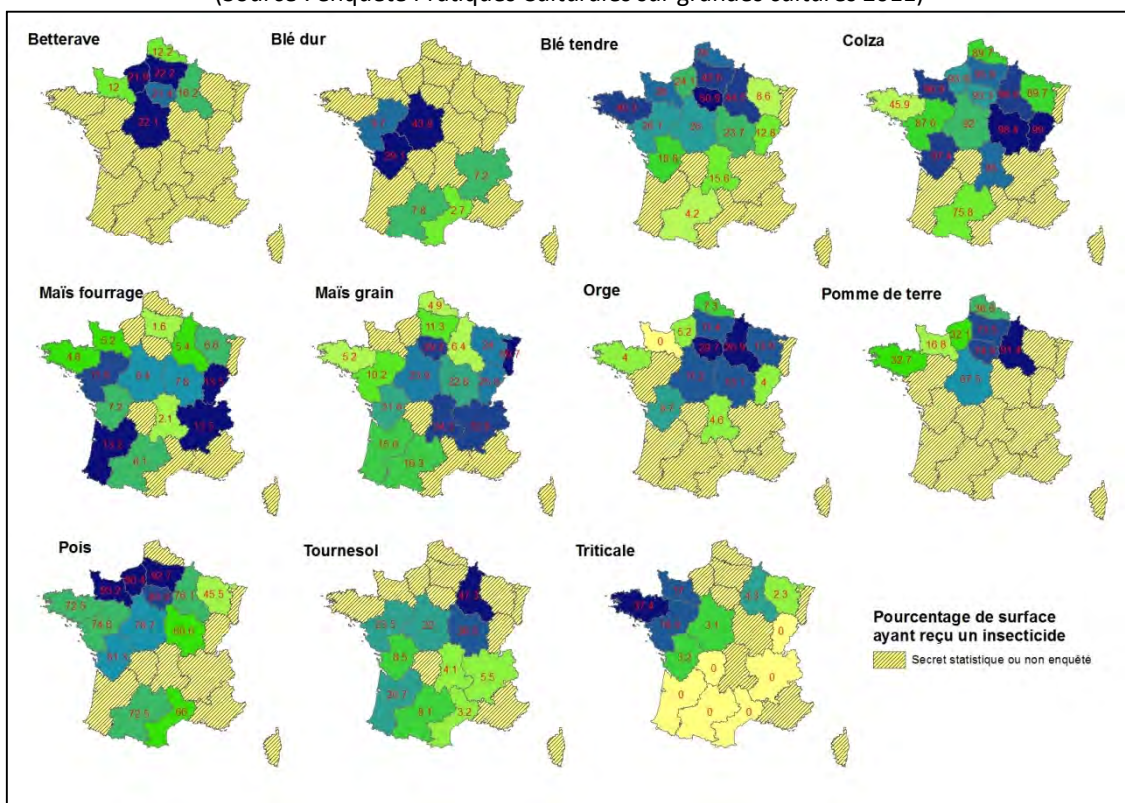


Figure 17 - Nombre de passages d'insecticides par culture en France en 2011
(Source : enquête Pratiques Culturelles sur grandes cultures 2011)

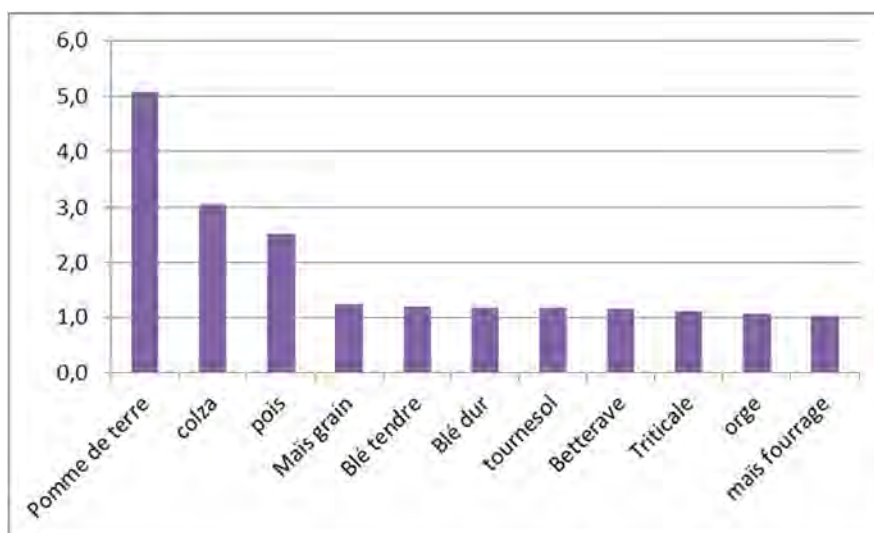
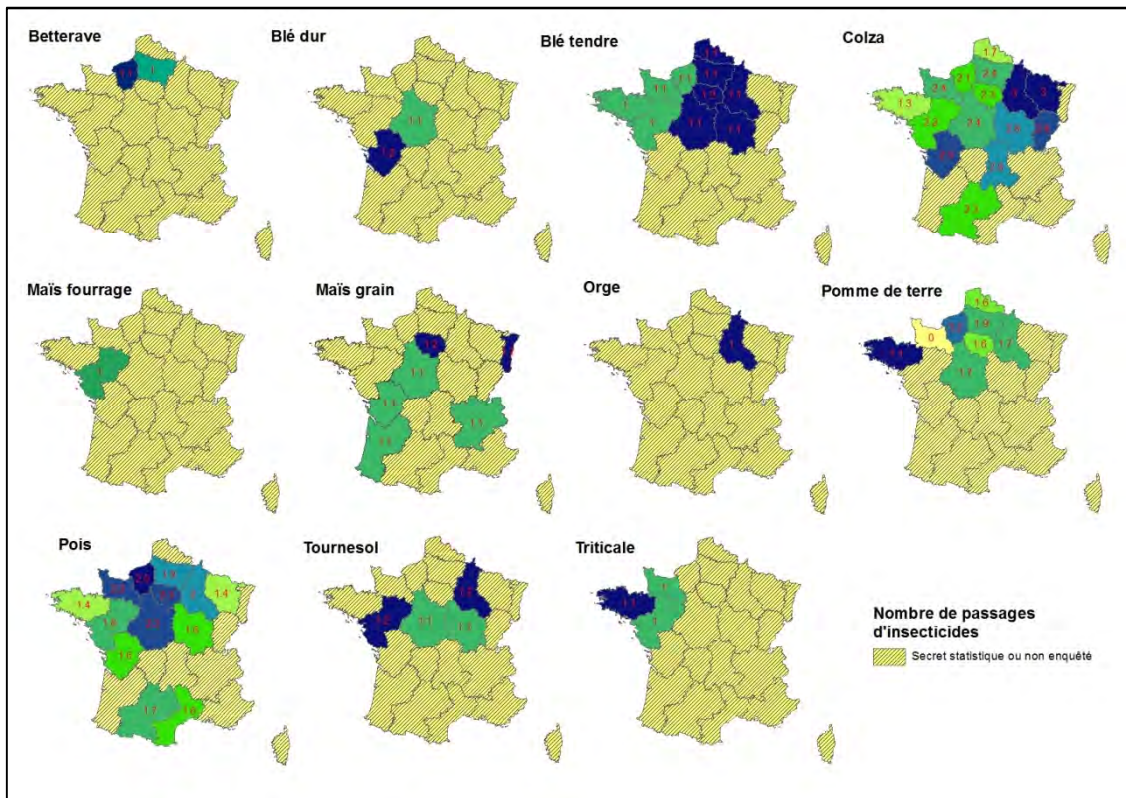


Figure 18 - Nombre de passages d'insecticides par culture et par région en 2011
(Source : enquête Pratiques Culturelles sur grandes cultures 2011)



3.4. Les traitements molluscicides

Figure 19 - Pourcentage de surfaces ayant reçu un molluscicide par culture en France en 2011
(Source : enquête Pratiques Culturelles sur grandes cultures 2011)

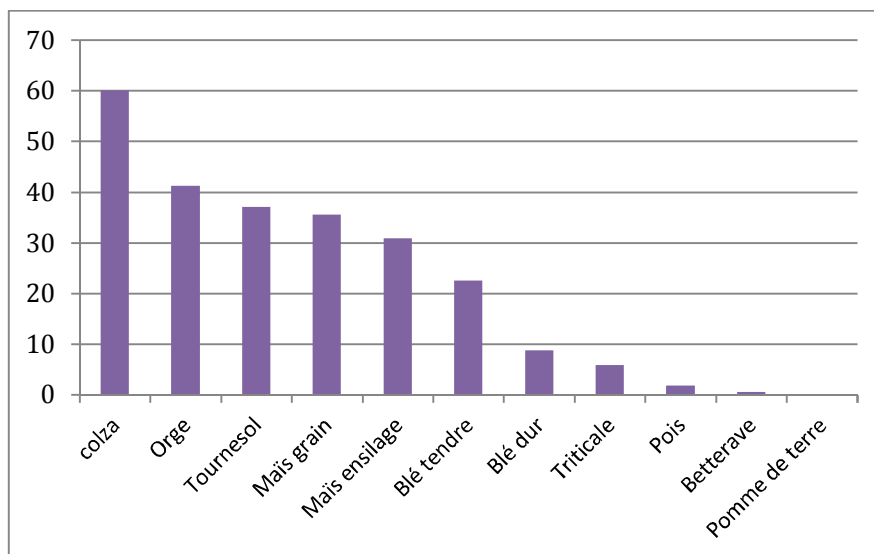


Figure 20 - Pourcentage de surface ayant reçu un traitement molluscicide par culture et par région en 2011
(Source : enquête Pratiques Culturelles sur grandes cultures 2011)

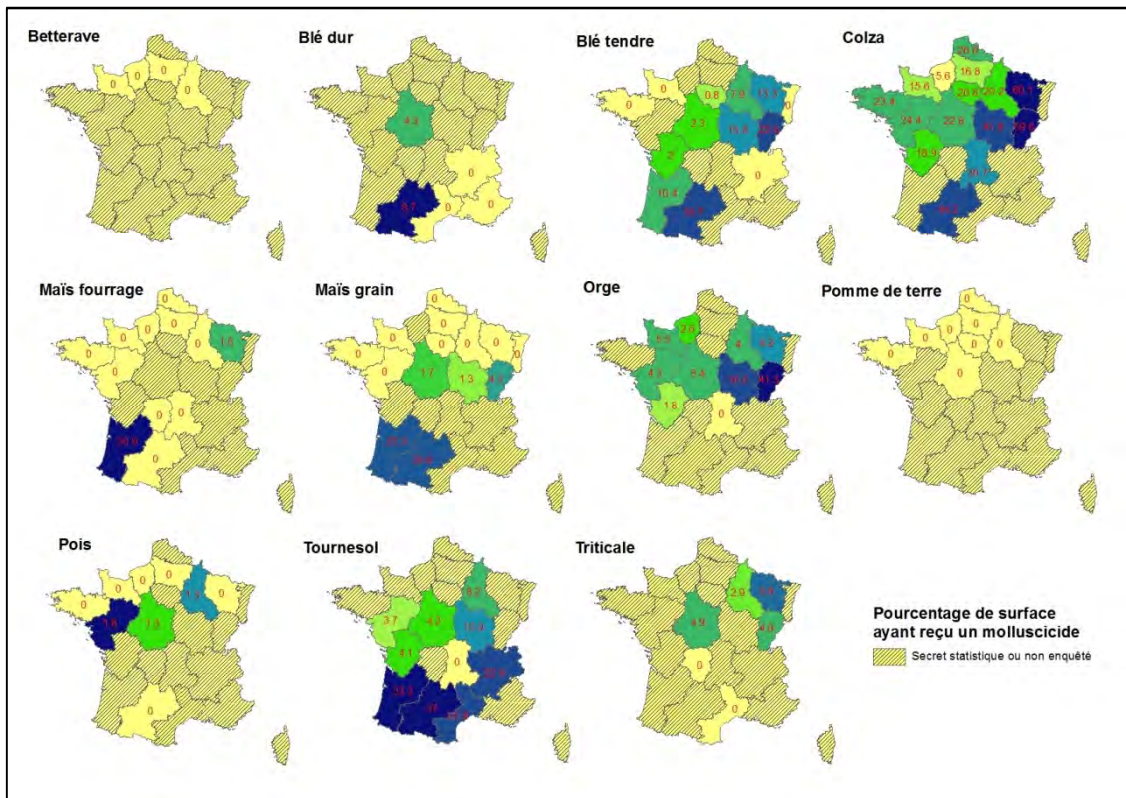


Figure 21 - Nombre de passages de molluscicides par culture en France en 2011
(Source : enquête Pratiques Culturelles sur grandes cultures 2011)

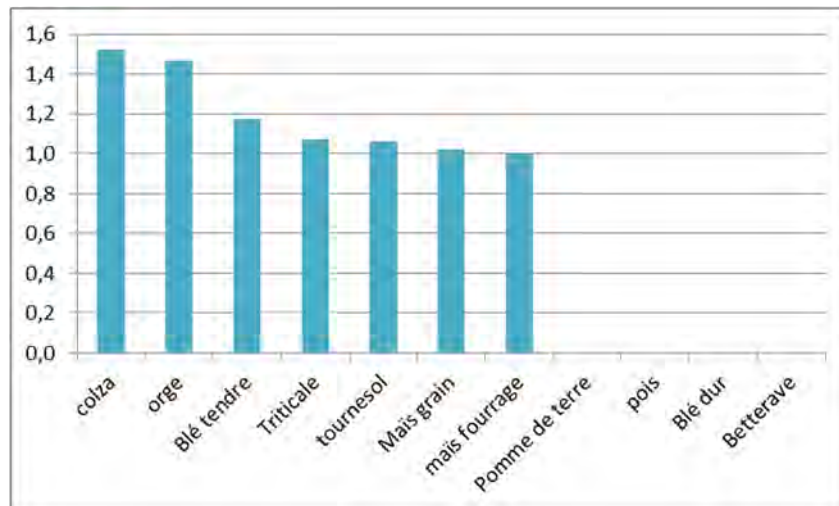
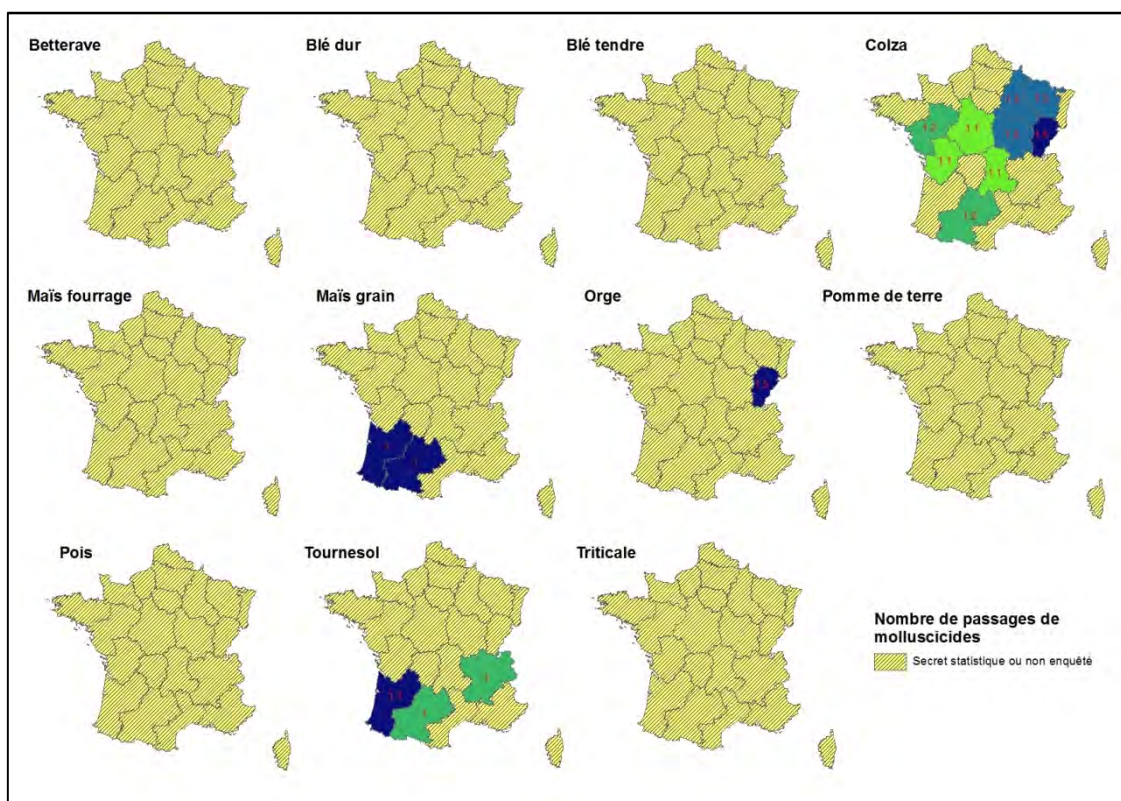


Figure 22 - Nombre de passages de molluscicides par culture et par région en 2011
(Source : enquête Pratiques Culturelles sur grandes cultures 2011)



3.5. Les traitements de régulation de croissance

Figure 23 - Pourcentage de surfaces ayant reçu un régulateur de croissance par culture en France en 2011
(Source : enquête Pratiques Culturelles sur grandes cultures 2011)

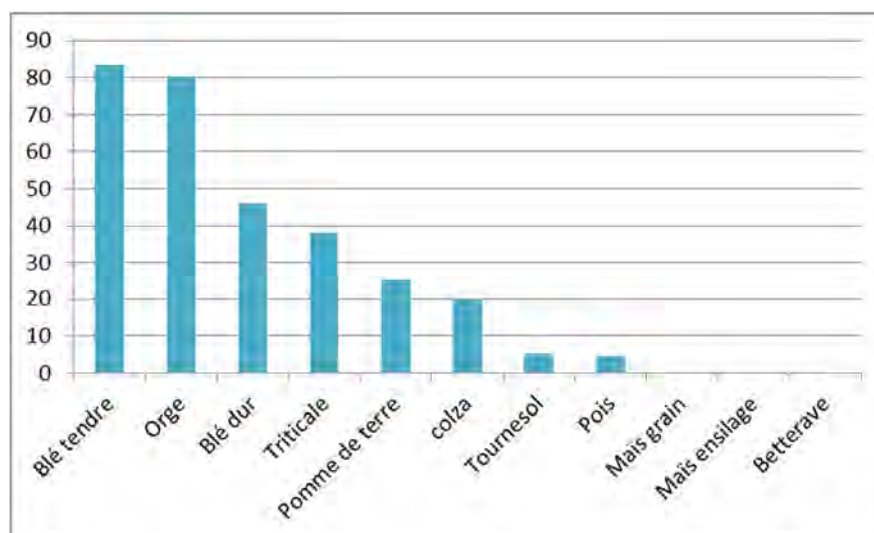


Figure 24 - Pourcentage de surface ayant reçu un régulateur de croissance par culture et par région en 2011
(Source : enquête Pratiques Culturelles sur grandes cultures 2011)

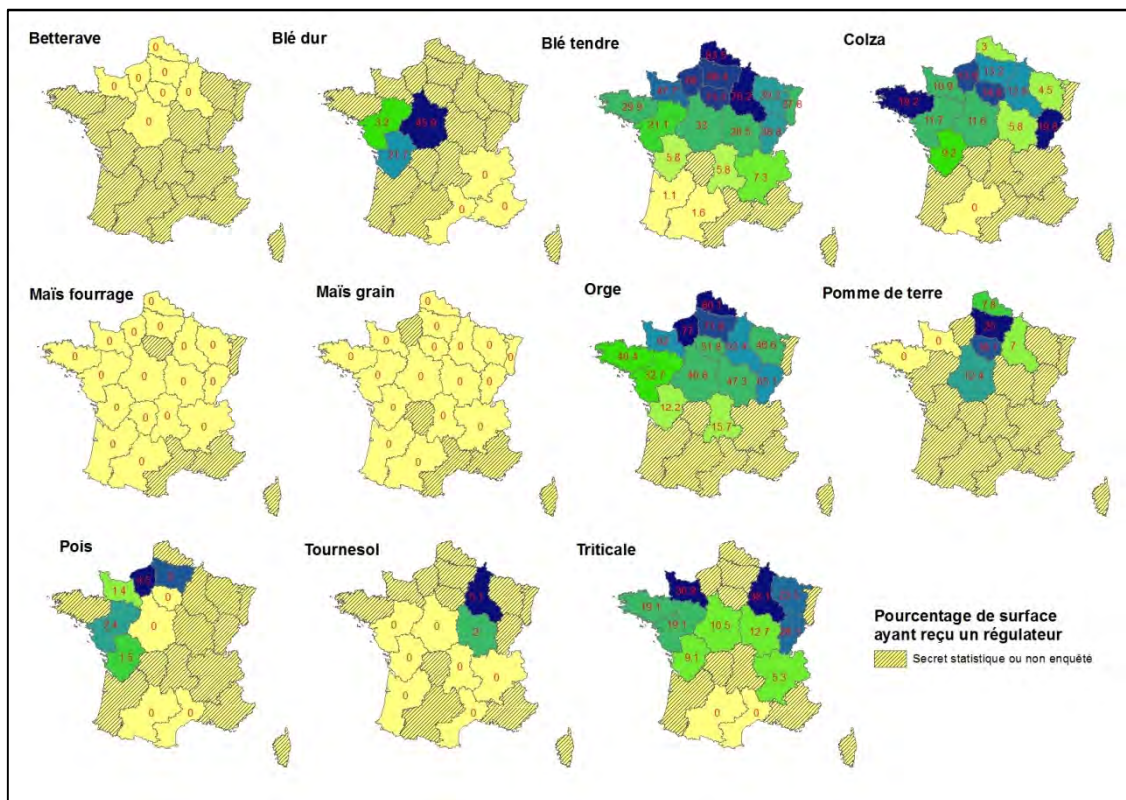


Figure 25 - Nombre de passages de régulateurs de croissance par culture en France en 2011
(Source : enquête Pratiques Culturelles sur grandes cultures 2011)

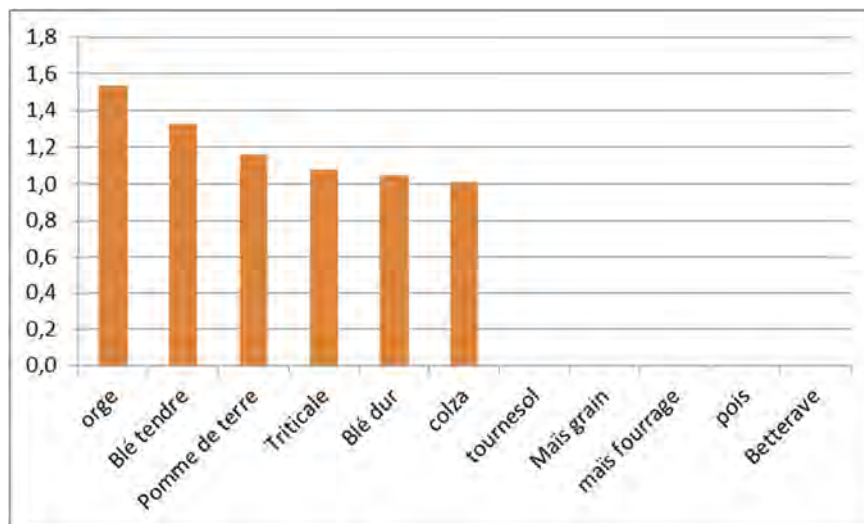
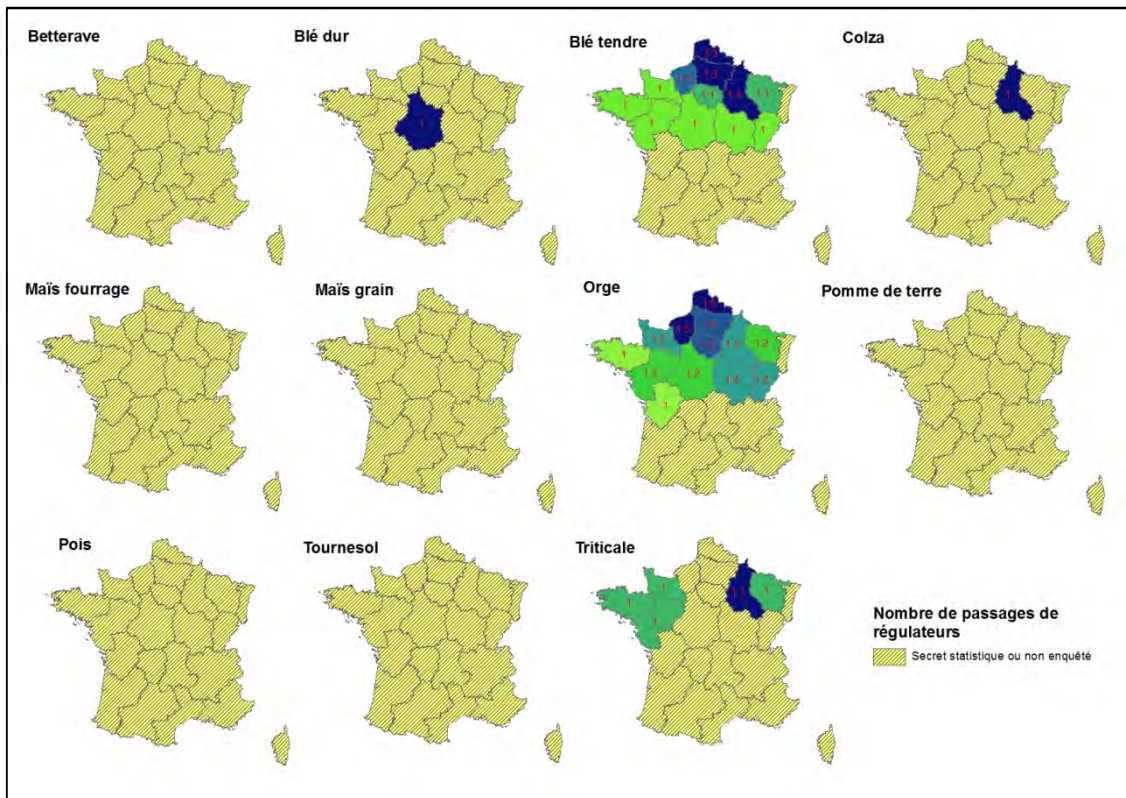


Figure 26 - Nombre de passages de régulateurs de croissance par culture et par région en 2011
 (Source : enquête Pratiques Culturelles sur grandes cultures 2011)



10.2. Production de fourrages par les surfaces en herbe

Expert coordinateur : Michel Duru

Contributeur scientifique : Olivier Therond

10.2.1. Spécification biophysique

10.2.1.1. Dénomination précise et nature du bien agricole

Les surfaces en herbe utilisées pour la production de fourrages recouvrent une très grande diversité de niveaux d'anthropisation (végétations « naturelles » ou semées), de milieux (plaine, montagne, zones sèches ou humides, zones labourables ou non labourables), de degré de pérennisation (couverts pérennes ou en rotation avec des cultures), de conduites (fauche à une date précoce ou tardive, pâture en flux tendu ou avec report sur pied¹; présence ou absence de fertilisation, d'irrigation...). Les espèces herbacées peuvent être associées à des espèces ligneuses de manière intentionnelle (pré-vergers, haies, arbres isolés) ou non (parcours, landes). Les parcours peuvent contribuer largement à l'alimentation des troupeaux, en particulier en régions périméditerranéennes où les conditions pédoclimatiques sont peu favorables à la pousse de l'herbe (Guérin *et al.*, 2009).

Les prairies et parcours sont utilisés par une diversité d'herbivores d'élevage (bovins, ovins, caprins, équins), élevés pour le lait, la viande ou la production d'animaux destinés à la reproduction, aux sports ou aux loisirs. Les fourrages issus de ces prairies peuvent constituer la base de l'alimentation pour ces animaux. Ils peuvent être utilisés de manière directe lorsque les animaux sont conduits au pâturage, ou bien de manière indirecte lorsque l'herbe est fauchée, directement apportée aux animaux (affouragement « en vert ») ou conservée sous forme de foin, d'enrubanné ou d'ensilage, puis distribuée aux animaux (le plus souvent en bâtiment). Les prairies et parcours, en particulier dans le cas de végétations spontanées, fournissent également une ressource alimentaire et/ou un habitat à une diversité d'espèces animales (oiseaux, insectes, mammifères) (Sabatier *et al.*, 2014).

Une autre utilisation du fourrage des prairies, consistant à récolter la biomasse en vue de la production d'énergie, soit par combustion, soit par méthanisation, soit par transformation en bio-éthanol se développe actuellement (Melts *et al.*, 2014). Si cette utilisation est encore marginale en France, de nombreux pays de la partie septentrionale de l'Europe (UK, Allemagne, Danemark, Benelux, Pologne...) commencent à promouvoir cette valorisation. Cet usage, s'il est mis en œuvre à surface en herbe constante, entre généralement en compétition directe avec les usages pour l'alimentation des herbivores d'élevage, ou la conservation de la biodiversité. Les prairies à vocation énergétique sont généralement très intensifiées et à très faible richesse floristique et faunistique (Alder, 2013).

¹ Exploitation de l'herbe tardive à un moment où la croissance est très faible ou nulle, par exemple pousse de printemps utilisée en été, ou d'automne utilisée en hiver.

Différentes catégories de surfaces en herbe sont différenciées dans les statistiques agricoles françaises (surface en ha, Agreste²):

- Surfaces toujours en herbe (STH) peu productives (présence de ligneux sur moins de 10 % de la surface) : parcours, landes, alpages (2 478 000 ha)
- STH productive : Prairies naturelles ou semées depuis plus de 6 ans assimilées à des prairies permanentes (6 881 000 ha)
- Prairies temporaires de graminées ou graminées et légumineuses (moins de 6 ans) : (3 089 000 ha)
- Prairies artificielles (légumineuses, typiquement la luzerne) : (227 000 ha)

Si les STH peu productives représentent un peu plus de 20% des surfaces de prairies, elles ne contribuent qu'à moins de 5% des ressources fourragères provenant des surfaces en herbe (Devun et Legarto, 2011). Leur surface a régressé d'environ 10% entre 1998 et 2008 (voir tableau 10-2-1).

Au cours de la même période, la STH productive a peu évolué, alors que la surface en prairies temporaires a significativement augmentée.

Si les prairies temporaires occupent une surface trois fois plus faible que les STH productives, elles sont plus productives que ces dernières relativement à leur superficie : elles produisent environ autant de ressources fourragères que la moitié des ressources issues des STH productives (voir tableau 10-2-2).

La surface en prairies artificielles a diminué d'un peu plus de 10% entre les périodes 1996-2000 et 2006-2009 (Tableau 10-2-1).

Tableau 10-2-1. Evolution des surfaces fourragères en France (Devun et Legarto, 2011)

Source : Agreste ; métropole

La diminution des surfaces fourragères pluriannuelles a été plus faible que celle des surfaces en fourrages annuels

Type de fourrage	Moyennes annuelles par période (1 000 ha)			Année 2006*	
	1996 à 2000	2001 à 2005	2006 à 2009	(1 000 ha)	(%)
STH peu productive	2 846	2 560	2 521	2 524	17,1
STH productive	7 484	7 482	7 420	7 400	} 71,4
Prairies temporaires	2 558	2 651	2 784	2 743	
Prairies artificielles	407	380	367	372	
Total surfaces prairies pluriannuelles	13 295	13 073	13 092	13 039	
Fourrages annuels (dont maïs fourrage)	1 772 (1 453)	1 750 (1 450)	1 656 (1 388)	1 644 (1 370)	11,2
Racines, tubercules fourragers, choux	54	44	40	41	< 0,5
Total surfaces fourragères	15 121	14 867	14 788	14 724	100

* Année où l'enquête sur les pratiques culturales a été réalisée (Agreste, 2010) et dont les résultats ont servi aux estimations des modes de récolte présentés dans le tableau 4.

Tableau 10-2-2. Evolution des ressources fourragères en France (Devun et Legarto, 2011)

(1000 t MS et % ; source : Agreste ; métropole)

Lors de la décennie passée, la STH contribue à produire, de façon relativement stable, la moitié de la production fourragère française. La part des prairies temporaires augmente au détriment de celle des fourrages annuels.

Type de fourrages	Production moyenne annuelle de fourrages par période			Année 2006
	1996 à 2000	2001 à 2005	2006 à 2009	(1 000 t MS) (%)
STH peu productive	3 413 (4%)	3 048 (4%)	3 240 (4%)	3 190 (3,5%)
STH productive	41 533 (47%)	37 360 (45%)	44 192 (48%)	43 843 (45%)
Prairies temporaires	19 344 (22%)	18 077 (22%)	23 623 (26%)	21 289 (24%)
Fourrages annuels (dont maïs fourrage)	19 303 (22%) (17 343) (20%)	19 185 (23%) (17 457) (21%)	18 714 (20%) (17 368) (19%)	17 968 (20%) (16 477) (18%)
Totalité des fourrages produits	87 872 (100%)	82 526 (100%)	92 202 (100%)	89 935 (100%)

² <http://agreste.agriculture.gouv.fr/donnees-de-synthese/statistique-agricole-annuelle-saa/>

Notons qu'il peut y avoir un écart entre la réalité et les déclarations. A titre d'exemples : a) des prairies permanentes (PP) déclarées en prairies temporaires dans les déclarations PAC pour éviter de se voir interdire de les retourner (Faïq *et al.*, 2013), b) des jachères de longue durée que l'administration conseille de classer en PP (pour permettre que la France respecte son engagement de maintien des surfaces en PP), c) le concept de « peu productif » est flou et la classification administrative peut ne pas correspondre à la réalité agronomique (Plantureux *et al.*, 2012).

En moyenne sur les années 2006 à 2009, les prairies pluriannuelles représentent 88% des surfaces fourragères totales et produisent 78% de la production fourragère française en tonne de matière sèche. Le complément provient essentiellement du maïs fourrage (9% de la surface fourragère et 19% à la ressource fourragère, Tableaux 10-2-1 et 10-2-2).

La part relative des surfaces de ces différentes catégories a fortement évolué au cours des 30 dernières années (CF. chapitre 5). Cette classification a connu de nombreux changements depuis plus d'un siècle (début de la statistique agricole). Il s'agit d'une classification administrative utile à la réalisation d'enquêtes et de recensements, mais qui n'est pas obligatoirement celle utilisée par le gestionnaire de l'écosystème agricole, par l'agronome ou encore l'écologue lorsqu'ils abordent l'objet prairie dans leurs travaux de recherche (Plantureux *et al.*, 2012).

Considérant les enjeux d'EFESE-écosystèmes agricoles, la classification des surfaces en herbe peut également être basée sur le niveau d'utilisation des intrants et donc sur la part de la production de fourrage permise par les intrants exogènes à l'écosystème relativement à celle permise par les services écosystémiques de régulation (cf. section 3.1). Complémentairement à l'indicateur du niveau des intrants, la part de légumineuses dans la végétation prairiale est un déterminant biophysique clef du niveau de fourniture du SE « fourniture en azote assimilable par les plantes cultivées » (Cf. section 8.8). Considérant ces deux clefs de classification, il est alors possible de distinguer quatre types de prairies : **(i) les parcours et prairies (semi)naturelles non fertilisés (type 1), (ii) les prairies de légumineuses semées (non fertilisée, type 2), (iii) les prairies associant graminées et légumineuses (type 3) et (iv) les prairies permanentes ou temporaires intensifiées sans ou avec très peu de légumineuses (type 4). Cette classification est utilisée ci-après pour caractériser les différents types de surfaces en herbe en France.**

Une présentation de ces quatre types de prairies, visant à décrire à grands traits les caractéristiques spécifiques de chacun, notamment en termes de modes de gestion, est réalisée dans la suite de cette section. Une description plus fine et quantifiée des pratiques agricoles mises en œuvre sur ces surfaces nécessiterait un travail de compilation de données qui n'a pas été réalisé dans le cadre de ce travail.

Les parcours et prairies (semi)naturelles non fertilisés (type 1) constituent des ressources fourragères bon marché car elles sont le plus souvent exploitées sans utiliser aucun intrant de synthèse. Notons qu'elles font souvent l'objet de contraintes ou de préconisations en termes d'utilisation car elles représentent d'importants enjeux en termes de protection de l'environnement et de biodiversité (zones humides, parcours en milieux secs, pâturage d'altitude...) (Tichit *et al.*, 2012). Elles ne permettent généralement d'alimenter un troupeau que sur une partie de l'année, la période de pâturage n'étant pas forcément en adéquation avec la période de croissance de l'herbe. Ces types de surfaces fournissent presque exclusivement des fourrages pâturés. Néanmoins, elles sont parfois fauchées comme c'est le cas de prairies humides de fond de vallée, principalement en zone de coteaux.

Là où les conditions climatiques sont favorables à la pousse de l'herbe, une surface donnée peut être pâturée plusieurs fois dans l'année, en respectant des temps de repousse de l'herbe entre passages. Dans ces situations, le potentiel de production de fourrage peut être utilisé dans sa quasi-totalité. Lorsque les conditions climatiques sont moins favorables (ex. montagne au-delà de 1000 m d'altitude, zones sèches), il est fréquent que les troupeaux pâturent de l'herbe ou des feuillages sur pied (durant ou après la pousse) à l'occasion d'un seul passage annuel ; dans ce cas, l'utilisation de la biomasse végétale disponible est très incomplète. Dans ces milieux, l'efficacité d'utilisation de la biomasse disponible dépend également de la capacité des troupeaux à valoriser les végétations spontanées, elle-même fixée par des règles de conduite mises en œuvre par l'éleveur. Le rôle de ces modes de conduite du pâturage dans l'optimisation de l'utilisation de la biomasse végétale est particulièrement important pour les surfaces hétérogènes de grande dimension (ex. estive, parcours) où les animaux sont susceptibles de ne pas fréquenter certain(e)s secteurs/végétations et d'en sur-fréquenter d'autres (Guérin *et al.*, 2009).

En outre, ces végétations incluent parfois des espèces d'intérêt pour la santé des animaux (ex. légumineuses riches en tanins à effet anti-helminthique), ou pour la valorisation des produits animaux (plantes riches en composés secondaires conférant une spécificité quant à la « valeur aromatique des produits animaux ») (Cf. section 10.3).

Ces prairies et parcours sont le plus souvent gérés de manière individuelle mais peuvent l'être par des collectifs ; c'est notamment le cas des estives en montagne (CF. travaux sur les écosystèmes de montagne). Une part non négligeable de ces surfaces est engagée dans des contrats de type « Mesure Agro-

Environnementale » qui encadrent les usages. Des règles et contraintes à l'utilisation peuvent également exister dans le cadre de conventions de pâturage établies entre usagers agricoles et propriétaires de surfaces de parcours³. **Les surfaces en herbe de haute montagne (altitude supérieure à 1500 mètres ne sont pas dans le champ de l'étude EFESE-écosystèmes agricoles).**

Dans les prairies de type 1, par définition et étant donnée la manière dont ces surfaces sont exploitées par l'agriculture, le niveau de production de fourrage ne dépend pas des intrants de synthèse ; il est donc *a priori* déterminé uniquement par les services de régulation de l'eau et des nutriments.

Les prairies de légumineuses semées (type 2) constituent des ressources fourragères riches en protéines produites sans ou avec peu d'intrants de synthèse (ex. engrais phosphorés et potassiques ; éventuellement insecticide sur luzerne). Dans la nomenclature statistique, ces surfaces correspondent à des prairies artificielles de légumineuses comme la luzerne et le sainfoin, semées en culture pure. La plupart des autres légumineuses (ex. trèfle violet) sont le plus souvent utilisées en association avec des graminées (voir type 3). La production est soit utilisée en autoconsommation dans des exploitations d'élevage (luzerne et sainfoin), et constitue alors le plus souvent une ressource parmi d'autres, soit réalisée dans des exploitations de grande culture et alors commercialisée (ex. Luzerne en Champagne).

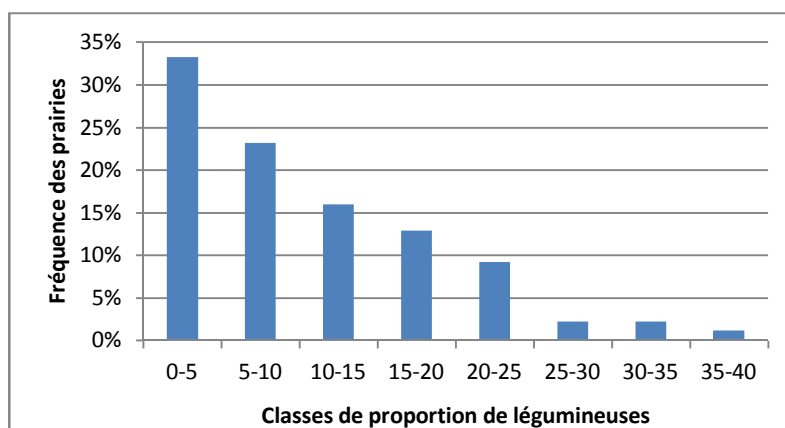
Ces prairies (type 2) sont le plus souvent fauchées ou ensilées ; elles peuvent néanmoins être pâturées moyennant certaines précautions pour éviter le phénomène de météorisation⁴. Compte tenu de la forte teneur en protéine, la déshydratation de la biomasse peut être économiquement rentable et donc le transport et la commercialisation facilités.

Dans ces prairies de type 2, le niveau de production de fourrage ne dépend pas ou très peu des intrants de synthèse ; il est donc *a priori* essentiellement déterminé par les services de régulation de l'eau et de nutriments.

Les prairies associant graminées et légumineuses (type 3) sont des prairies le plus souvent semées, mais pas exclusivement. Il peut également s'agir de prairies permanentes moyennement intensifiées (pour celles d'entre elles ayant au moins 20% de légumineuses, figure 10-2-1), recevant peu de fertilisation minérale et ou organique, et, dans la très grande majorité, pas de pesticides (contrairement aux luzernières des grandes zones de production).

Ces prairies (type 3) sont exploitées en fauche (ensilage), en pâturage ou de manière combinée. Les couverts emblématiques de ce type 3 sont l'association ray-grass anglais-trèfle blanc dans le grand Ouest (le plus souvent pâturé) et les associations « luzerne-dactyle », « luzerne-fétuque élevée » ou encore « ray-grass-trèfle violet » (le plus souvent récolté mécaniquement au premier cycle) dans les zones plus sèches ou continentales (Lüscher *et al.*, 2014). La production est le plus souvent utilisée en autoconsommation dans des exploitations d'élevage. Ces prairies fournissent des ressources fourragères équilibrées (protéine/énergie) produites avec peu d'intrants de synthèse (apports uniquement organiques ou modérés en engrais de synthèse) (Peyraud et Delagarde, 2013).

Figure 10-2-1. Proportion de légumineuses dans les prairies permanentes (base de données FLORAsys⁵)



³ www.parcsnationaux.fr/content/download/9837/90221/file/plaquette_estives.pdf

⁴ Gonflement de l'abdomen par accumulation anormale des gaz de fermentation des aliments, notamment le méthane, dans la panse.

⁵ <http://eflorasys.univ-lorraine.fr>

Dans les prairies de type 3, la part de la production de fourrage déterminée par le service de fourniture en azote est d'autant plus importante que la part de légumineuses dans la végétation est importante (Lüscher *et al.*, 2014).

Les prairies permanentes ou temporaires intensifiées sans ou avec très peu de légumineuses (Type 4) sont des prairies à base de graminées recevant systématiquement de la fertilisation minérale et ou organique. Ces prairies sont exploitées le plus souvent en fauche (ensilage) au printemps, puis souvent, de manière combinée avec le pâturage ensuite. La part du niveau de production qui est liée aux intrants dépend du niveau des apports de ceux-ci. La production de biomasse est élevée, surtout au printemps, et peut être assez régulière du fait d'une fertilisation azotée permettant d'atteindre le potentiel climatique (Huyghe, 2009). Les couverts emblématiques de ce type 4 sont le ray-grass italien (12-18 mois) ainsi que les ray-grass anglais, dactyles, fétuques élevées (généralement en rotation avec des cultures).

Si les apports d'azote sont élevés, dans les prairies de type 4, une faible part de la production de fourrage est permise par les services de régulation des nutriments (Lobos Ortega *et al.*, 2016).

Le tableau 10.2.3. présente une synthèse de la classification des 4 types de prairies en fonction de la part de la production de fourrage permise par les services écosystémiques de régulation de l'eau et des nutriments relativement à celle qui résulte de l'utilisation d'intrants de synthèse (essentiellement fertilisants, et parfois irrigation comme c'est le cas systématiquement pour le foin de Crau (Mérot *et al.*, 2011). La distinction proposée repose notamment sur la part des légumineuses qui est décroissante des types 2 à 4. Les prairies (semi)naturelles peuvent se retrouver dans les types 1, 3 et 4 ; les prairies temporaires dans les types 3 et 4, les prairies artificielles correspondent au type 2, les prairies dites « peu productives » sont incluses dans le type 1.

Tableau 10.2.3. Définition des types de prairies selon la proportion de la production fourragère permise par les services de fourniture en eau et en nutriments, ici approximée par le niveau de nutrition azoté en l'absence de fertilisation minérale en comparaison du niveau courant de la pratique.

Les % de part de production indiqués dans ce tableau ont été établis à dire d'experts impliqués dans l'étude EFESE-écosystèmes agricoles.

Types de prairies	Part de la production permise par les SE de régulation de l'eau et des nutriments	Spécificités par rapport à la classification Agreste
1. Prairies permanentes non fertilisées, parcours et landes	++++ (100%)	Inclut les « surfaces en herbe peu productives » de la classification Agreste ainsi que les prairies permanentes (généralement prairies naturelles) ne recevant aucune fertilisation
2. Légumineuses semées : luzerne, sainfoin	+++ (90%)	Correspond à la catégorie « Prairies artificielles » de la classification Agreste
3. Associations de graminées et légumineuses (ou prairies permanentes avec bcp de légumineuses)	++ (70%)	Correspond généralement à des prairies semées depuis moins de 6 ans ou des prairies naturelles intensifiées ainsi qu'à une partie des « prairies temporaires » (celles riches en légumineuses)
4. Prairies permanentes intensifiées (avec peu de légumineuses); prairies temporaires de graminées	+ (30%)	Correspond généralement à des prairies semées depuis plus de 6 ans ou des prairies naturelles intensifiées ainsi qu'à une partie des « prairies temporaires (celles pauvres en légumineuses)

10.2.1.2. Déterminants biophysiques clefs de la production du bien

La production de fourrage peut être décrite suivant différentes caractéristiques d'intérêt (Duru *et al.*, 2015) :

- la distribution de la biomasse au cours de la période de croissance (précocité et durée du pic de biomasse),
- la qualité de cette biomasse (digestibilité, protéines, énergie) pour alimenter les animaux,
- la flexibilité d'utilisation des prairies, c'est à dire la possibilité de changer les modalités d'utilisation sans trop modifier la valeur alimentaire de la biomasse végétale (à court terme) ou sans changer de manière irréversible la composition de la végétation (à moyen terme),

- la résilience, c'est à dire de la capacité de la prairie à conserver ses caractéristiques malgré des perturbations, notamment celles liées à des épisodes climatiques extrêmes (sécheresse).

Ces caractéristiques de la production de fourrages par les surfaces en herbe dépendent (i) de la composition de la végétation, (ii) de la fertilité des sols (qui détermine la composition de la végétation), **(iii) de l'intensité et de la fréquence de pâturage par les animaux** et de facteurs exogènes, comme le niveau d'utilisation d'intrants (ex. fertilisation azotée) et le climat (voir section suivante).

Composition de la végétation

La composition de la végétation peut se caractériser par la proportion d'espèces herbacées, de ligneux et de sol nu. Considérant les herbacées, il est possible de typer les prairies selon leur **composition fonctionnelle**, c'est-à-dire selon les caractéristiques fonctionnelles des espèces de l'écosystème prairial (Hooper *et al.*, 2005). À cet effet, il est possible de définir des types fonctionnels qui regroupent les espèces végétales présentant (i) des réponses similaires aux déterminants biophysiques et facteurs exogènes et / ou (ii) des effets similaires sur les déterminants biophysiques édaphiques et, *in fine*, sur les services écosystémiques (Diaz et Cabido, 2001). **Pour les prairies permanentes, le filtrage de l'habitat, la complémentarité de niche et la complémentarité temporelle** sont identifiés comme des processus clés qui déterminent la composition des communautés végétales. La théorie du « filtrage de l'habitat » considère que la composition d'une communauté est déterminée par l'existence de filtres biotiques et abiotiques qui conduisent à une sélection des espèces ayant des caractéristiques adaptées (Grime, 2006). **Pour les communautés prairiales, les caractéristiques et propriétés du sol, le climat (voir section suivante) et les pratiques agricoles sont considérées comme des filtres.** Ainsi, les effets des pratiques sur les propriétés des écosystèmes s'expriment au niveau de la composition fonctionnelle des communautés (Lavorel et Garnier, 2002 ; Figure 10-2-1 ; voir section suivante). Au sein des communautés végétales, les espèces adaptées aux pratiques de gestion et aux facteurs abiotiques peuvent présenter deux types de complémentarité (Loreau et de Mazencourt, 2013) : la complémentarité fonctionnelle (ou de niche) correspond à un processus de facilitation entre espèces⁶, à très court terme, pour la capture des ressources (Loreau *et al.*, 2012), alors que la complémentarité temporelle représente l'utilisation d'une même ressource à des moments différents, ce qui suppose une asynchronie dans la période d'expression des besoins des plantes et donc souvent de croissance (Hume *et al.*, 2016, voir aussi Section 3.2).

Pour les prairies temporaires, la composition de la végétation est largement déterminée par les espèces semées, mais cet effet s'estompe avec le vieillissement de la prairie car progressivement s'installent des espèces natives issues de la banque de graine ou des prairies adjacentes (Hopkins *et al.*, 1988).

La composition fonctionnelle de la végétation prairiale peut être caractérisée en considérant la **nature et l'intensité des complémentarités entre plantes**. À cet effet, deux types de stratégies peuvent être distingués chez les plantes.

En premier lieu, la **stratégie d'acquisition et d'utilisation des ressources**, notamment les nutriments et la lumière, est une caractéristique clef des complémentarités fonctionnelles (Lavorel et Garnier, 2002). Les espèces à stratégie de capture de ressources se distinguent des espèces à stratégie de conservation : les premières ont une vitesse de croissance rapide, une courte durée de vie d'organes (feuilles et racines) et ont des teneurs élevées en nutriments dans leurs organes, alors que les deuxièmes ont une croissance plus lente et des organes moins riches en nutriment et plus denses en tissu de structure avec une durée de vie plus longue. Ainsi, ces deux types d'espèces sont distingués par leurs traits foliaires : teneur en N des feuilles, surface foliaire spécifique et teneur en matière sèche des feuilles, durée de vie des feuilles... Ces traits constituent des indicateurs permettant de constituer des types fonctionnels ou de situer les espèces sur un gradient capture-conservation (Wilson *et al.*, 1999). La complémentarité fonctionnelle dans une communauté est d'autant plus élevée que les types fonctionnels sont différents.

Le deuxième type de stratégie est lié à la **hauteur des plantes**. Plus précisément, le moment où la hauteur maximale des plantes est atteinte est une caractéristique majeure de la dynamique de croissance et de compétition entre espèces. Ainsi, certains auteurs caractérisent les espèces par leur trajectoire de croissance en hauteur, en relation avec la phénologie⁷, soit précoce ou tardive (Sun et Frelich, 2011). Là encore, la

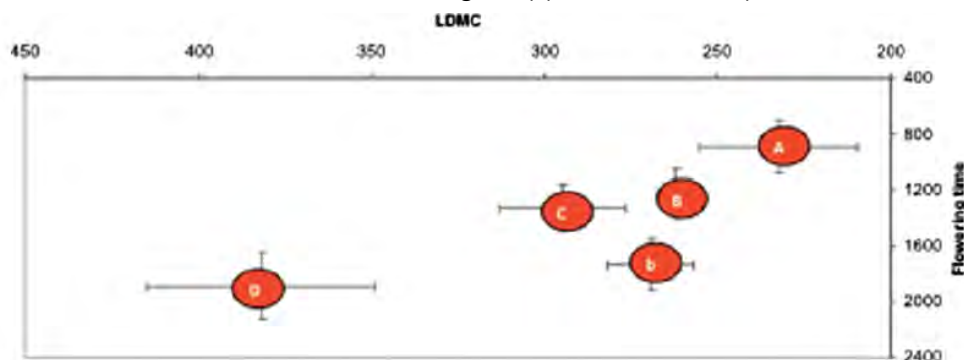
⁶ Il y a « facilitation » (d'une espèce envers une autre) quand cette relation profite à au moins l'un des participants sans causer aucun dommage à aucun des deux.

⁷ Dynamique des événements du cycle de vie des végétaux : floraison, la feuillaison, la chute des feuilles, etc.

complémentarité temporelle entre espèces dans une communauté est d'autant plus élevée que les types fonctionnels sont différents pour cette caractéristique.

Pour les prairies permanentes (le plus souvent riches en espèces), les graminées ont été classées par types fonctionnels considérant leur stratégie de conservation des ressources (teneur en matière sèche des feuilles, premier axe de classification des espèces) et leur précocité (date de floraison, deuxième axe de classification) (Tableaux 10-2-3 et 10-2-4 ; Cruz *et al.*, 2010 ; Duru *et al.*, 2013a). Les prairies de type 1 (Tableau 10.2.3) sont majoritairement composées des types fonctionnels « b » et « C », voire « D » pour les parcours, alors que les prairies permanentes intensifiées de type 4 sont majoritairement composées des types fonctionnels « A » et « B » (Duru *et al.*, 2013a). Les prairies d'un niveau d'intensification intermédiaires (Type 3) combinent souvent les types fonctionnels « A », « B » et « C ». Les types fonctionnels sont en fait corrélés pour les deux axes de classification (teneur en matières sèches et phénologie) (Figure 10-2-2 ; Duru *et al.*, 2013a). Néanmoins, les types fonctionnels « b » et « D » ont une phénologie plus tardive que les autres (Figure 10-2-2).

Figure 10-2-1. Typologie des graminées selon (i) la teneur en matière sèche (Leaf Dry Matter Content, LDMC) qui traduit la stratégie de capture ou conservation des ressources des espèces et (ii) leur phénologie (période de floraison, Flowering time) (Duru *et al.*, 2013a).



Les légumineuses représentent un type fonctionnel particulier du point de vue de la stratégie d'acquisition de l'azote. Pour les prairies temporaires à base de mélange d'espèces, un objectif important de la conception des mélanges à semer est de combiner (i) légumineuses et graminées pour bénéficier de la complémentarité de niches pour les ressources en azote (fixation biologique de l'azote par les légumineuses), et (ii) des espèces et génotypes contrastés en termes de phénologie de façon à augmenter la complémentarité temporelle (Huyghe *et al.*, 2012). L'introduction de dicotylédones comme la chicorée permet aussi d'accroître la complémentarité temporelle (Somasiri *et al.*, 2016).

Les espèces sélectionnées les plus couramment semées dans les prairies temporaires sont en très grande majorité à stratégie de capture des ressources (types A et B). Par contre, elles peuvent présenter des différences de phénologie importante (par exemple entre un ray-grass d'Italie précoce et une fléole plus tardive). En outre, les différences de complémentarité temporelle entre espèces due à la phénologie peuvent être accentuées par des différences de seuils thermiques pour la croissance, comme c'est le cas entre graminées et légumineuses (0-20°C vs 5-25°C environ), voire de systèmes racinaires (superficiel pour les graminées et pivotant et profond pour la luzerne). Les prairies de type 3 correspondent à ces associations graminées légumineuses, possiblement basée sur une importante complémentarité fonctionnelle et temporelle. Il est possible de caractériser leur temporalité de croissance par la diversité des types fonctionnels tels que définis dans le tableau 10-2-4.

Les données de la littérature permettent de constituer des groupes d'espèces présentant des similitudes en termes de stratégies de croissance (tableau 10-2-4) et de phénologie (*sensu lato*) (tableau 10-2-5) ; (Duru *et al.*, *in press*).

Tableau 10-2-4. Classification des types fonctionnels de plantes selon la teneur en matière sèche des feuilles (LDMC in (g/1000g) pour caractériser l'acquisition et l'utilisation des ressources.

Les graminées et légumineuses les plus fréquemment associés sont sur une même ligne.

Graminées		Légumineuses		Type fonctionnel de plante (PFT)
Exemples	LDMC	Exemples (b)	LDMC (b)	
E (raygrass italien)	210			PFT-1 **
A (raygrass anglais)	230	Trèfle blanc	205	
B (dactyle)	260	Trèfle violet, luzerne	240	
b (agrostide)	270			PFT-2
C (fétuque rouge)	290	Lotier	260	PFT-3
D (canche flexueuse)	370			PFT-4

** : regroupement des espèces à stratégie de capture

Sources : adapté de Duru *et al.*, 2013a (b) : Ansquer, non publié

Tableau 10-2-5. Classification des types fonctionnels de plantes selon leur saisonnalité de croissance selon trois critères

Types fonctionnels	Date de floraison (degré.jour)	Notation pour			
		Date de floraison	Seuils de température	Système racinaire	Somme
Graminées très tardives (type D)	2000a	3	1	1	5
Graminées tardives (type b)	1700a	2.5	1	1	4.5
Graminées très tardives (type C)	1400a	2	1	1	4
Graminées tardives (type B)	1250a	1.5	1	1	3.5
Graminées précoces (type A)	850a	1	1	1	3
Graminées très précoces (type E)	600a	0.5	1	1	2.5
Légumineuses précoces avec enracinement superficiel	600b	0.5	2	1	3.5
Légumineuses précoces avec enracinement intermédiaire	600b	0.5	2	1.5	4
Légumineuses tardives avec enracinement profond	1100b	1.5	2	2	5.5
Dicotylédones précoces	600 b	0.5	1	1	2.5

Sources : a : Cruz *et al.*, 2010 ; b : Cruz, com. cers.

Relation entre composition fonctionnelle de la prairie, temporalité (saisonnalité) de production et flexibilité d'utilisation

La dynamique d'accumulation de biomasse à l'échelle de la communauté au cours de l'année dépend de la composition fonctionnelle moyenne de la prairie en termes de saisonnalité de croissance. Ainsi, on peut distinguer les prairies dont la production est plutôt centrée sur le printemps (prairies composées de graminées à floraison précoce) de celles qui ont une production mieux répartie sur la période de croissance (par exemple prairies composées de graminées et de luzerne) (Duru *et al.*, 2010a ; Michaud *et al.*, 2012). En outre, la diversité des types fonctionnels composant la prairie permet de caractériser sa flexibilité d'utilisation : plus grande est cette diversité, plus large est la fenêtre d'utilisation permettant de faire varier la date de récolte sans changer beaucoup pour autant la quantité pâturée ou récoltée et sa qualité (Duru *et al.*, 2010a).

Relation entre types fonctionnels de plantes et caractéristiques alimentaire du fourrage (digestibilité, valeur aromatique)

La digestibilité des espèces au stade feuillu est une caractéristique qui est bien corrélée au type fonctionnel : pour les graminées, elle décroît des types A à D (cf. tableau 10-2-4) ; à date égale, la digestibilité des dicotylédones est en moyenne supérieure à celle des graminées auxquelles elles sont associées (Duru *et al.*, 2009). Il est alors possible de classer les prairies quant à leur digestibilité en tenant compte de leur composition en termes de types fonctionnels de graminées et de leurs proportions par rapport aux dicotylédones, en particulier les légumineuses (Duru *et al.*, 2010a). Les prairies diversifiées (ex. Type 1) peuvent fournir des rations très variées en termes de composition (types de plantes, parties de plante et qualités nutritives) selon la période d'utilisation et le mode de prélèvement.

La valeur aromatique de certains produits animaux est due à certaines dicotylédones riches en polyphénols (Scehovic *et al.*, 1998 ; Farruggia *et al.*, 2008 ; Botreau *et al.*, 2014) dont la présence est favorisée par des milieux peu fertiles favorisant des espèces à stratégies de conservation de ressources dans les situations où le potentiel floristique est élevé (Duru *et al.*, 2014). Des typologies régionales, par exemple la typologie des prairies AOC du massif central, prennent en compte de telles caractéristiques (Carrère *et al.*, 2012).

Relation entre diversité fonctionnelle des prairies et stabilité de la production

Quel que soit le type de prairies, de nombreuses recherches ont montré qu'il y a une plus grande stabilité interannuelle de la production pour des prairies diversifiées en termes fonctionnels et / ou spécifiques (Küchenmeister *et al.*, 2012 ; Finn *et al.*, 2013 ; Sanderson, 2013). Plus les prairies sont diverses, plus le niveau de production interannuel est stable, et moins on observe de renouvellement des espèces entre les années. Mais, ces prairies ont tendance à être dominées par les espèces à stratégie de conservation, donc adaptées aux conditions de milieux peu fertiles.

D'une manière générale, les propriétés décrites ci-dessus (temporalité, flexibilité et stabilité de la production) sont maximales pour les niveaux d'intensification intermédiaires à faible (Duru *et al.*, 2012).

Fertilité des sols

La fertilité des sols a plusieurs composantes, et peut être approchée de plusieurs manières (Cf. section 8.4). Nous la définissons ici comme la capacité des sols à fournir les éléments nutritifs nécessaires à l'alimentation des plantes qu'ils portent (Recous *et al.*, 2015). Une composante importante de la fertilité des sols concerne la fourniture et la disponibilité en eau, azote et phosphore qui dépend de processus biologiques mais aussi des caractéristiques du climat (température, ressource en eau) qui vont influencer sur les dynamiques de minéralisation/réorganisation de l'azote ou de fixation/solubilisation du phosphore (Cf. sections 8.7, 8.8 et 8.9). C'est tout particulièrement le cas en zone méditerranéenne où le climat combiné à une faible profondeur de sol limite considérablement la ressource en eau (Mérot *et al.*, 2011). La fertilité du sol détermine les nutriments et l'eau fournis par l'écosystème aux plantes de la prairie et donc son niveau de production.

Dans les écosystèmes prairiaux, les cycles du C et de l'N sont fortement couplés (Soussana et Lemaire, 2014). Ces couplages s'opèrent: (i) dans les plantes où N et P sont liés au C *via* la synthèse de la biomasse, et (ii) dans le sol *via* la capacité des microorganismes à capturer et à recycler les formes minérales de N et P (Soussana et Lemaire, 2014). La composition fonctionnelle des prairies relativement à l'acquisition et à l'utilisation des ressources (premier axe de classification) est le principal facteur de contrôle de ces processus car ils déterminent la dynamique et la nature de la biomasse végétale (verte et de la litière) ainsi que les processus de la rhizosphère. Par exemple, les litières des types fonctionnels de plantes à stratégie de capture (type A et B) sont plus rapidement décomposables que celles des plantes à stratégie de conservation (type b, C et D). Par ces modifications, la qualité des litières influence l'activité microbienne du sol, de l'eau et de la disponibilité du C labile ainsi que le pH et le cycle des éléments nutritifs (Crotty *et al.*, 2015 ; Grigulis *et al.*, 2013). Autrement dit, la composition de la végétation influence la biodiversité du sol qui elle-même a des effets possibles sur le fonctionnement de la végétation (Grigulis *et al.*, 2013).

Effets du pâturage sur la production de fourrage

Au pâturage, les prélèvements de biomasse végétale et les déjections des animaux se répartissent de manière très variable selon le comportement des animaux. L'éleveur peut agir en choisissant le mode et la conduite du pâturage, notamment le chargement animal qui peut être calculé par rapport à la surface (nombre d'animaux par ha) ou l'herbe offerte (quantité de matière sèche par animal), et ce à différentes échelles de temps, de la journée (on parle de chargement instantané) à l'année (chargement moyen annuel). En fauche ou en ensilage, les prélèvements, de même que les restitutions (*via* épandage d'effluents d'élevage) sont homogènes dans l'espace et pilotés par l'éleveur.

Le maintien de l'état de l'écosystème pâturé passe par l'absence de sous-utilisation conduisant à de la litière accumulée sur le tapis herbacé ou à de l'embroussaillage, tout autant qu'à une sur-utilisation pouvant favoriser des espèces envahissantes de faible intérêt, d'où l'importance du choix d'un niveau de chargement instantané ad hoc. Néanmoins, entre ces extrêmes, il existe une diversité de modes d'exploitation permettant

de répondre à différents objectifs, sans mettre en péril la reproductibilité du système (Hubert *et al.*, 2014). Il est cependant difficile d'obtenir des connaissances génériques valables pour la diversité des situations concernées (alpages, parcours méditerranéen, zones humides...).

Type 1 (prairies peu productives et parcours)

Le pâturage est tout particulièrement déterminant de la production de fourrage par les prairies de type 1 (parcours). Les facteurs importants pour ce type de prairies sont le chargement instantané (nombre d'animaux par ha), les périodes de pâturage (durant ou après la pousse de l'herbe) et le mode de prélèvement (pâturage complet ou partiel de la végétation pâturable). Ce type de couvert, composé de types fonctionnels à stratégie de conservation des ressources (types « b » ou « D ») est souvent utilisé dans un deuxième temps, après l'exploitation des prairies composées de types fonctionnels à stratégie de capture des ressources et précoces des types 4, voire 3, qui ont une végétation plus précoce.

Lorsque les prairies et parcours sont utilisés avec un pâturage en parcs, le choix de périodes d'utilisation combiné à un chargement instantané ad hoc permet de valoriser la ressource fourragère tout en assurant son renouvellement (voir travaux de Guérin *et al.*, 2009 sur parcours). Dans le cas d'un pâturage guidé par un berger, à cette planification saisonnière s'ajoute l'organisation de circuits de pâturage journaliers associant différents secteurs de végétation, en vue de stimuler l'ingestion par les animaux (Meuret et Provenza, 2015).

Type 3 (prairies de graminées et légumineuses) et types 4 (prairies productives à base de graminées)

À l'échelle de la saison, le niveau de production de fourrage est dépendant de la pression/fréquence de pâturage. Il est pénalisé par une intensité de pâturage trop forte (quantité d'herbe résiduelle faible qui limite la capture de la lumière) ou trop faible (hauteur haute en pâturage continu ou temps de retour longs en pâturage tournant qui accroissent la proportion de feuilles passant en sénescence et litière avant d'être prélevées) (Duru *et al.*, 2001). De ce fait, les couverts de type ray-grass anglais-trèfle blanc sont plus adaptés au pâturage que des couverts à port plus érigés (ex dactyle) du fait d'une hauteur de végétation moindre.

Interactions communautés végétales, fertilité des sols

Tant pour les prairies (semi)naturelles que semées, la composition fonctionnelle de la végétation est façonnée par les pratiques agricoles et les caractéristiques du milieu (traits de réponse). À cela s'ajoute le choix des espèces semées dans le cas des prairies temporaires. Mais en retour, la composition fonctionnelle oriente aussi les processus au niveau du sol, notamment pour l'acquisition des nutriments (traits d'effet).

Les caractéristiques du sol (sa fertilité), ainsi que les caractéristiques de la végétation déterminent la composition végétale de l'écosystème prairial et par voie de conséquence les caractéristiques de la production de fourrage et aussi les services écosystémiques fournis par celui-ci et (figure 10-2-2).

10.2.1.3. Facteurs exogènes clefs de la production du bien

Nous examinons ci-dessous les effets du climat et du changement climatique ainsi que des pratiques agricoles d'entretien, de fertilisation et de fauche sur le niveau de production de fourrage. Les effets des caractéristiques du climat et des pratiques sont soit directs, soit indirects, selon qu'ils influent directement sur la production ou *via* leurs effets sur l'état de l'écosystème (figure 10-2-2).

Effets du climat et des changements climatiques

Le climat (température, pluviométrie, rayonnement) influe sur le niveau de production de fourrage directement par ses effets sur la photosynthèse, l'allocation des assimilats entre les parties aériennes et souterraines et la morphogénèse (apparition et élongation des organes comme les feuilles), et indirectement par des changements qu'il induit dans la fourniture de l'azote (minéralisation et fixation symbiotique) et de l'eau (Gonzalez-Dugo *et al.*, 2010 ; Durand *et al.*, 2013). D'une manière générale, la température et la pluviométrie (sauf excès) ont un effet favorable sur le niveau de production (Thornley et Cannell, 1997).

Les changements climatiques, en termes de fréquences et d'intensité des sécheresses et des températures extrêmes, mais aussi de par l'élévation des teneurs en CO₂, peut influencer sur le niveau de production de fourrage directement (modification du régime de la photosynthèse) et indirectement par diminution de la fourniture d'azote, au travers de modifications des flux de minéralisation et de réorganisation. À l'échelle de la France, il est attendu une augmentation de la production de biomasse du fait de l'augmentation des températures (Ruguet *et al*, 2013), mais avec une amplification des contrastes entre saisons et de la variabilité inter annuelle (Sautier *et al*, 2013).

Pour les prairies permanentes, les observations de terrain (y compris celles réalisées l'année de sécheresse 2003 ; Jouany *et al*, 2009), de même que les expérimentations dans lesquelles sont simulées des conditions extrêmes, n'ont pas mis en évidence d'effet majeur du climat sur la composition fonctionnelle des prairies (Picon-Cochard *et al*, 2013). La littérature disponible est peu abondante et ne présente pas un niveau de précision suffisant pour permettre une représentation fine de l'effet des stress abiotiques sur la dynamique de végétation (Chollet *et al*, 2014). Cependant, les caractéristiques du climat, notamment la température et le déficit hydrique (pluie + état de la réserve - évapotranspiration potentielle) favorisent certains types fonctionnels de plantes. Ainsi, des températures moyennes annuelles élevées associées à des déficits hydriques faibles ou modérés favorisent les espèces à stratégie de capture de ressources (Duru *et al*, 2014) ; le développement des espèces à stratégie de conservation étant observé dans le cas contraire. Une situation pédoclimatique donnée détermine une plage de types fonctionnels qui lui est adaptée.

Pour les prairies semées, la question se pose dans les zones méditerranéennes de remplacer les variétés tempérées par des variétés méditerranéennes, plus adaptées au sud des régions intermédiaires, voire de sélectionner des espèces à dormance estivale (Volaire *et al*, 2013).

Effet des pratiques d'entretien, fertilisation et de fauche sur les divers types de prairies

Type 1 (prairies peu productives et parcours)

Ces prairies ne sont que très rarement fauchées et fertilisées. Notons que le débroussaillage mécanique total ou partiel d'une parcelle permet de réutiliser par le pâturage des surfaces abandonnées, en permettant l'accès aux animaux. La gestion du pâturage doit alors être gérée de manière raisonnée de façon à laisser le couvert ouvert et empêcher ou limiter les repousses des espèces indésirables. L'écobuage (par exemple dans les estives pyrénéennes) est un feu léger et dirigé qui permet d'éliminer les broussailles et les résidus végétaux secs qui occupent l'espace et ralentissent le démarrage des plantes herbacées au printemps ; les cendres ont un effet fertilisant. Cette pratique est souvent la seule méthode d'entretien des espaces pastoraux en terrain accidenté lorsque leur utilisation est imparfaite.

Types 2 (légumineuses)

Dans les prairies artificielles de légumineuses, les pratiques visent à atteindre un compromis entre une récolte précoce pour l'obtention d'un fourrage de qualité et la reconstitution des réserves dans les pivots racinaires (cas de la luzerne), qui suppose ne pas récolter trop précocement. La fixation d'azote atmosphérique n'est pas la seule voie d'acquisition des légumineuses. Elles peuvent aussi absorber l'azote minéral disponible dans le sol, qu'il soit issu de la minéralisation de l'azote organique ou de la fertilisation minérale. Plus cet azote minéral est présent, plus les légumineuses en profitent et moins elles fixent d'azote atmosphérique (Liu *et al*, 2011). Les pratiques de fertilisation azotée doivent donc être raisonnées avec précision, par exemple lors du semis ou en fin d'hiver. Dans le cas contraire, l'azote prélevé par la plante peut ne pas provenir de la fixation symbiotique (Unkovich, 2012).

Types 3 (Prairies graminées-légumineuses)

Pour un climat donné, les pratiques de fauche et de fertilisation renforcent la proportion d'espèces à stratégie de capture, à floraison tardive et à fort développement vertical (l'inverse s'observe pour le pâturage). C'est la raison pour laquelle des espèces à port érigé (type dactyle ou fétuque élevée seule, ou en association avec de la luzerne) se prêtent le mieux à l'utilisation par la fauche, du moins en premier cycle.

L'équilibre entre graminées et légumineuses est très sensible à la fertilisation azotée compte-tenu de la compétition possible face à l'azote minéral disponible (Cf. ci-dessus). La volonté d'introduire et de bénéficier de

la présence des légumineuses dans les prairies justifie de limiter la fertilisation exogène, afin de stimuler la fixation symbiotique et favoriser le développement de ces légumineuses, en vue d'obtenir une contribution annuelle à la biomasse de 30 à 40 % (Delaby *et al*, 2016). Il s'agit alors de positionner ces apports d'azote exogènes au moment opportun, pour les rendre les plus efficaces possible, sans nuire au maintien des légumineuses. Selon le potentiel de croissance permis par le climat, les espèces de graminées et de légumineuses associées, les apports d'azote permettant d'exprimer ce potentiel varient de 0 à 225 kg d'N par ha (cas extrême d'une association raygrass anglais trèfle violet au Danemark avec une fertilisation organique) (Elgersma et Soeggaard, 2016) ; ceci traduit le caractère fortement contextualisé de la fertilisation azotée des associations graminées-légumineuses.

Types 4 (Prairies productives à base de graminées)

Les prairies à base de graminées productives correspondent presque toujours à des prairies semées. Pour les prairies semées de courte durée, il y a peu d'effet des modes d'exploitation sur la structure de la végétation. Pour les prairies de longue durée, la composition fonctionnelle est susceptible de se modifier selon les mêmes bases que celles décrites pour les prairies de type 3.

Relations entre caractéristiques climatiques, pratiques agricoles et composition fonctionnelle des prairies

La composition fonctionnelle des prairies, quel qu'en soit le type, est façonnée à la fois par les facteurs abiotiques (température et bilan hydrique principalement) et par les pratiques (fauche et fertilisation). D'une manière générale, le stress (température moyenne journalière basse, stress hydrique) et les perturbations (pâturage) favorisent les espèces à stratégie de conservation des nutriments (vitesse de croissance faible, digestibilité faible au stade feuillu) alors que l'inverse est observé pour des conditions contraires. La fauche tardive tend en outre à augmenter la proportion de types fonctionnels de plantes à floraison tardive. Les situations de stress et de perturbations « intermédiaires » sont celles qui permettent d'obtenir une diversité fonctionnelle élevée. Cette diversité permet des complémentarités fonctionnelles entre espèces pour la capture des ressources (l'azote en particulier) et temporelles (complémentarité des phénologies). Il en résulte une plus grande flexibilité d'utilisation que pour les prairies constituées d'un type fonctionnel dominant.

Sur le long terme, le maintien de légumineuses en proportion importante dans la végétation (> 30%) suppose des modes d'exploitation et des pratiques de fertilisation qui permettent la coexistence de plusieurs types fonctionnels. Concrètement cela correspond à des niveaux de fertilisation azotée nuls à importants selon le contexte pédoclimatique, les espèces associées, et des rythmes d'exploitation adaptés à la durée de vie des feuilles et à la phénologie des espèces.

10.2.2. Surfaces en herbe et services écosystémiques

Au-delà de la production de fourrage, les prairies délivrent aussi des SE de régulation⁸. Le niveau de fourniture des différents SE est plus ou moins dépendant de la place et de la durée des prairies dans les séquences de couverts végétaux, de leur poids ou distribution spatiale dans le paysage (i.e. composition et configuration du paysage) ou de leur diversité fonctionnelle. Pour certains SE, la composition fonctionnelle des prairies peut ne pas être déterminante, comme par exemple pour le SE « Stabilisation des sols et contrôle de l'érosion » alors que pour d'autres SE, c'est un déterminant majeur, comme par exemple pour le SE de pollinisation. La durée de la prairie peut également être un déterminant important (ex. stockage du carbone et régulation des graines d'adventices par les carabes) ou sans effet majeur (ex. pour le SE « Stabilisation des sols et contrôle de l'érosion » c'est le niveau de développement du couvert qui est le principal déterminant).

Lorsque c'est la distribution spatiale des prairies dans le paysage qui détermine le niveau de SE, deux grandes situations peuvent être distinguées. Pour certains SE la configuration spatiale des prairies, seules ou avec d'autres écosystèmes (ex. forêts) ou éléments de la structure du paysage (habitats semi-naturels) est importante (ex. Stabilisation des sols et contrôle de l'érosion, Pollinisation). Alors que pour d'autres SE c'est avant tout la composition du paysage qui est importante en termes de proportion de prairies dans le paysage

⁸ Se référer aux descriptifs des différentes SE cités pour le détail des effets de prairies.

(ex. régulation des graines d'adventices par les carabes). Une répartition spatiale régulière des prairies dans le paysage favoriserait l'expression des SE de régulation biologique (Holland *et al*, 2016).

Enfin, la distribution temporelle des prairies dans les séquences de couverts végétaux cultivés peut être déterminante du niveau de fourniture de certains SE (ex. régulation des graines d'adventices par les couverts végétaux).

Ces différentes caractéristiques de prairies peuvent apparaître individuellement comme principal déterminant d'un SE ou bien apparaître en combinaison comme déterminants conjugués du niveau de fourniture des SE. Ainsi, le niveau de service de pollinisation dépend à la fois de la composition fonctionnelle (espèces mellifères plutôt présentes dans les prairies riches en espèces) et de la place des prairies dans les paysages (Bennett *et al.*, 2014). Il y a généralement assez peu de connaissances sur le poids relatif des différents déterminants biophysiques.

Même si c'est le paysage dans sa globalité qui détermine le niveau des services culturels ; les prairies jouent un rôle majeur dans le niveau de fourniture de ceux-ci, soit comme habitat pour la faune sauvage (service récréatif avec prélèvement) soit du fait du caractère « naturel » associé à leur présence dans le paysage (chapitre 9.1).

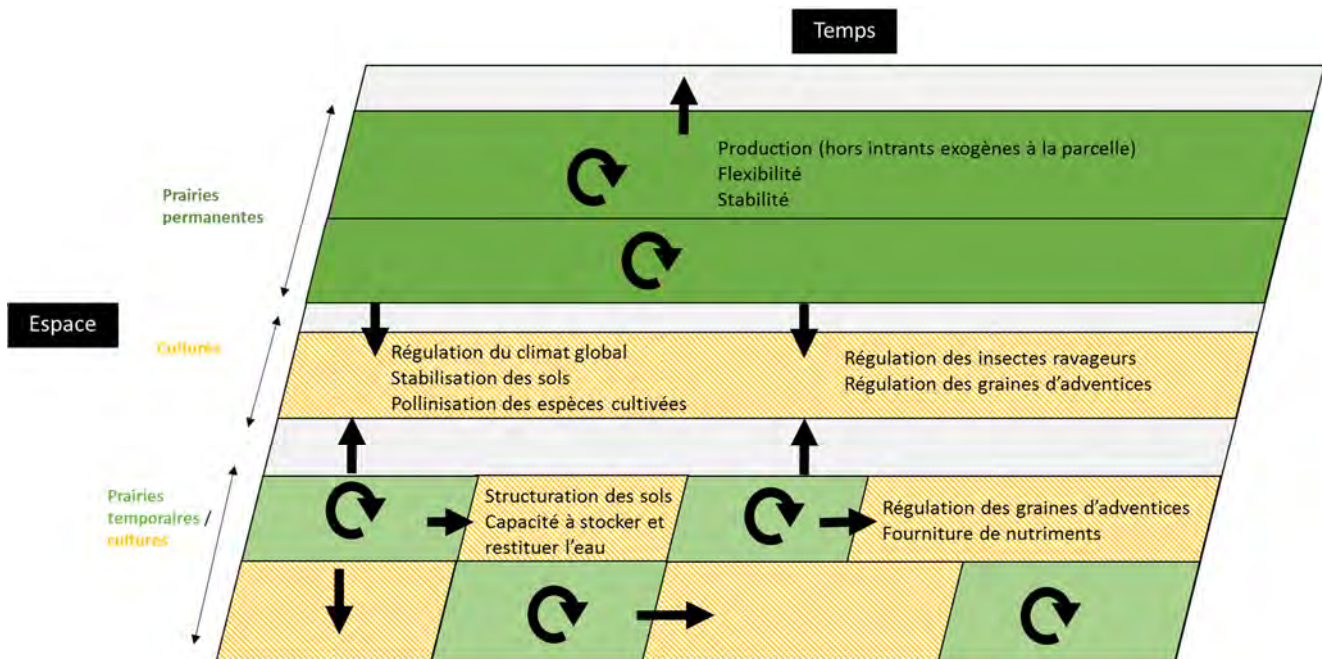
Le tableau 10-2-4 et la figure 10.2.2 ci-dessous donnent une vue synthétique des effets de ces différentes caractéristiques des prairies (y.c. parcours et landes) sur le niveau de fourniture des différents SE de EFESE-écosystèmes agricoles. Il a été construit à partir de la synthèse des connaissances sur la description des déterminants biophysiques de chacun des SE analysés dans EFESE-écosystèmes agricoles (Cf. section descriptive de chaque SE).

Tableau 10-2-4. Vue d'ensemble des services écosystémiques fournis par les prairies selon leur distribution dans le paysage et les rotations, et selon leur composition fonctionnelle

		Poids des prairies dans la composition du paysage	Configuration spatiale des prairies dans le paysage	Distribution des prairies dans les rotations	Composition fonctionnelle des prairies
Production	Quantité	NE	NE	NE	+++
	Qualité	NE	NE	NE	+++
	Flexibilité (utilisa.)	NE	NE	NE	+++
	Résilience	?	?	?	+++
Services de régulation	Pollinisation	+	+++	NE	+
	Régulation des insectes ravageurs	+++	+++	+++	?
	Régulation des grains d'adventices	+++	?	+++	?
	Capacité à stocker et restituer l'eau	NE	NE	+++	+
	Fourniture en N	NE	NE	+++	+++
	Fourniture en P	NE	NE	+	+++
	Structuration sols	NE	NE	+++	+++
	Stabilisation des sols	+++	+++	+++	?
Services culturels	Récréatif avec prél.	+++	+++		+
	Récréatif sans prél.	+++	++		++

NE, pas d'effet significatif; d'un effet élevé (+++) à bas (+)

Figure 10.2.2. Représentation graphique des effets des prairies permanentes et temporaires sur les différents SE instruits dans EFESE-écosystèmes agricoles



10.2.3. Evaluation biophysique de la production de fourrage par les surfaces en herbe

Expert coordinateur : Olivier Therond

Contributeurs scientifiques : Michel Duru, Françoise Ruget, Anne-Isabelle Graux, Jean-Louis Peyraud

Ingénierie de données : Anne Meillet, Thomas Poméon, Laetitia De Sousa, Rémi Resmond, Raphaël Martin, Laurence PUILLET

10.2.3.1. Méthodologie et indicateurs pour l'évaluation

L'objectif de l'évaluation présentée dans cette section est d'établir (i) le niveau de production totale de fourrages des différents types de prairies dans les différents types de pédoclimats en fonction de leur mode d'exploitation et (ii) le niveau de production de fourrage permis par les seuls SE de régulation de l'eau et de l'azote pour les différents types de prairies en fonction de leur mode d'exploitation.

Deux méthodes ont été appliquées pour répondre à ces objectifs. La production totale des prairies a été estimée à partir de l'analyse des données statistiques du MAAF (AGRESTE) à la résolution du département sans distinction des différents types de prairies et modes d'exploitation. La production totale et la production permises par les SE de régulation ont été estimées par simulation avec le modèle PaSim pour le fonctionnement des types de prairies 1, 3 et 4 dans les différentes unités pédoclimatiques où ils sont significativement présents considérant leurs principaux modes d'exploitation (Cf. Annexe 8-A). Étant donné que le modèle PaSim ne permet pas de simuler des couverts de légumineuses pures, les prairies de type 2 n'ont pas été simulées. En outre, considérant que PaSim ne permet pas de simuler les successions de prairies temporaires et de cultures annuelles, les prairies de type 3 n'ont pas été simulées comme telles. Cependant, afin d'approcher leur comportement dans les situations pédoclimatiques où les prairies de type 3 sont très présentes (ex. Bretagne, Pays de Loire, Région centre, Grand Ouest) des simulations de surface toujours en herbe conduites comme les prairies temporaires ont été simulées dans ces situations.

Évaluation statistique du niveau de production totale de fourrage par les prairies

Le but de cette évaluation est de quantifier et spatialiser la production de fourrages par les prairies en France métropolitaine *via* l’utilisation des données produites par le service statistique du MAAF, le SSP. Deux sources statistiques ont été utilisées. D’une part la Statistique Agricole Annuelle (SAA) qui fournit pour chaque année, au niveau départemental, les surfaces en production, le rendement et la production totale. D’autre part le Recensement Agricole 2010 pour estimer les surfaces de prairies par PRA.

Dans la SAA, 4 catégories de prairies sont distinguées : les STH peu productives (« STH peu productives (parcours, landes, alpages) »), les STH productives (« Prairies naturelles ou semées depuis plus de 6 ans»), les prairies temporaires (« Prairies temporaires ») et les prairies artificielles (« Prairies artificielles »). La SAA fournit des données sur la production de fourrage par les prairies en matière sèche. Les catégories utilisées pour la SAA (et en général dans Agreste) ne recoupent que partiellement les 4 types de prairies qui ont été définis ci-avant. Toutefois, certains liens sont possibles (avec les réserves mentionnées dans le 10.2.1) :

- le type 1 est intégralement compris dans les STH peu productives ;
- le type 2 correspond aux prairies artificielles ;
- les types 3 et 4 comprennent à la fois des prairies temporaires et des STH productives ;

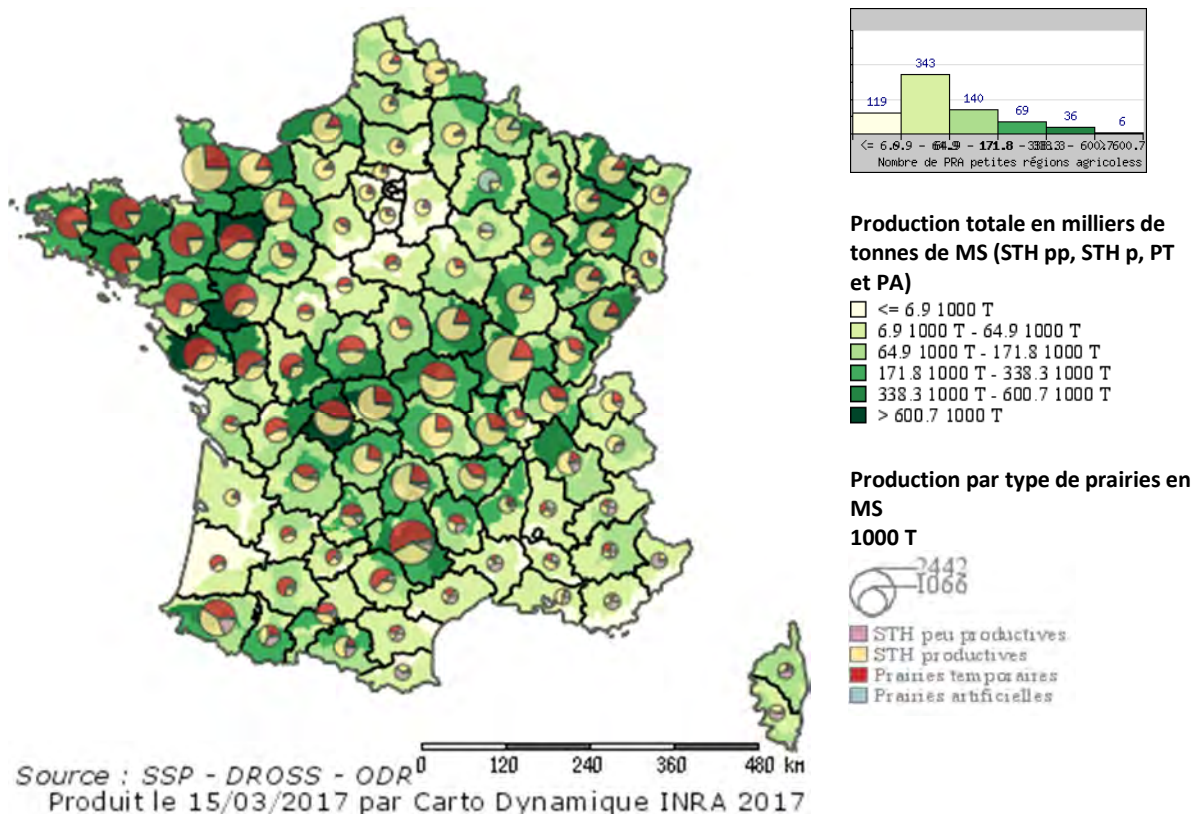
Nous utilisons donc la SAA pour déterminer la production totale de fourrage dans les prairies françaises, indépendamment du mode de récolte et de valorisation.

Les données du Recensement Agricole 2010 ont été utilisées pour estimer la part des surfaces des différents types de prairies au sein des PRA de chaque département. Cette information a été utilisée pour répartir la production annuelle de fourrage par PRA considérant leur part de surface par type de prairie. Ceci conduit à faire l’approximation que la productivité des prairies est la même dans toutes les PRA d’un même département.

Nous obtenons donc la production de fourrages dans les différents types de prairies par PRA, en tonnes de MS (Figure 10-2-3).

Figure 10-2-3. Production de fourrage en MS dans les différents types de prairies. Moyenne 2010-2011-2012.

Le fond de carte indique la production totale de fourrage, pour toutes les catégories de prairies. Les camemberts représentent, agrégés par département, cette même production totale en fonction du poids relatif de chaque type de prairie.



Par ailleurs, nous avons déterminé la valeur correspondante en Matière Azotée Totale (MAT). A cette fin, des teneurs en MAT dans la MS ont été estimées pour chaque catégorie de prairies. Pour les fourrages, les teneurs en MAT sont normalement calculées pour des stades et des conditions de récolte précis (par exemple⁹, ensilage de prairie permanente de Plaine (Normandie), Brins courts avec conservateur, 1er cycle, Épis ou fleurs, 25/05, début épiaison). Ici, ne disposant pas des informations statistiques suffisantes, l'objectif est d'estimer des quantités moyennes de MAT offertes sur l'année par les surfaces fourragères à partir des quantités de MS produites. Nous avons pour cela utilisé des données sur les teneurs de MAT moyennes sur l'année par type de prairie sans distinction des zones pédoclimatiques (coefficient unique par type de prairie).

Pour les prairies permanentes, productives et peu productives, nous avons utilisé les données produites dans le cadre du programme Casdar "*Les prairies permanentes françaises au cœur d'enjeux agricoles et environnementaux : de nouveaux outils pour une nouvelle approche de leur gestion ?*". Ce projet a étudié 190 parcelles de prairies permanentes réparties sur le territoire français pendant 2 ans (2009 et 2010). La production annuelle de biomasse des parcelles a été estimée à partir de la production moyenne d'herbe mesurée sur trois périodes (4.8 T de MS en fin de printemps, 1 T MS en été et 0.4 T MS en automne). Pour chacune de ces trois périodes, la teneur en MAT a également été mesurée (90g MAT/100g de MS en fin de printemps, 150g MAT/100g de MS en été et 170 g MAT/100g de MS en autonome). Ainsi, il est possible de calculer la production annuelle de MAT des prairies (650 kg de MAT) et la teneur annuelle moyenne en MAT (10.5 g/100g).

Pour les prairies artificielles et les prairies temporaires, nous avons utilisé les données de Huyghe (2003).

Les coefficients pour passer de la MS à la MAT sont donnés dans le tableau 10-2-5.

Tableau 10-2-5. Teneurs en matière azotée totale (MAT) utilisées dans l'étude

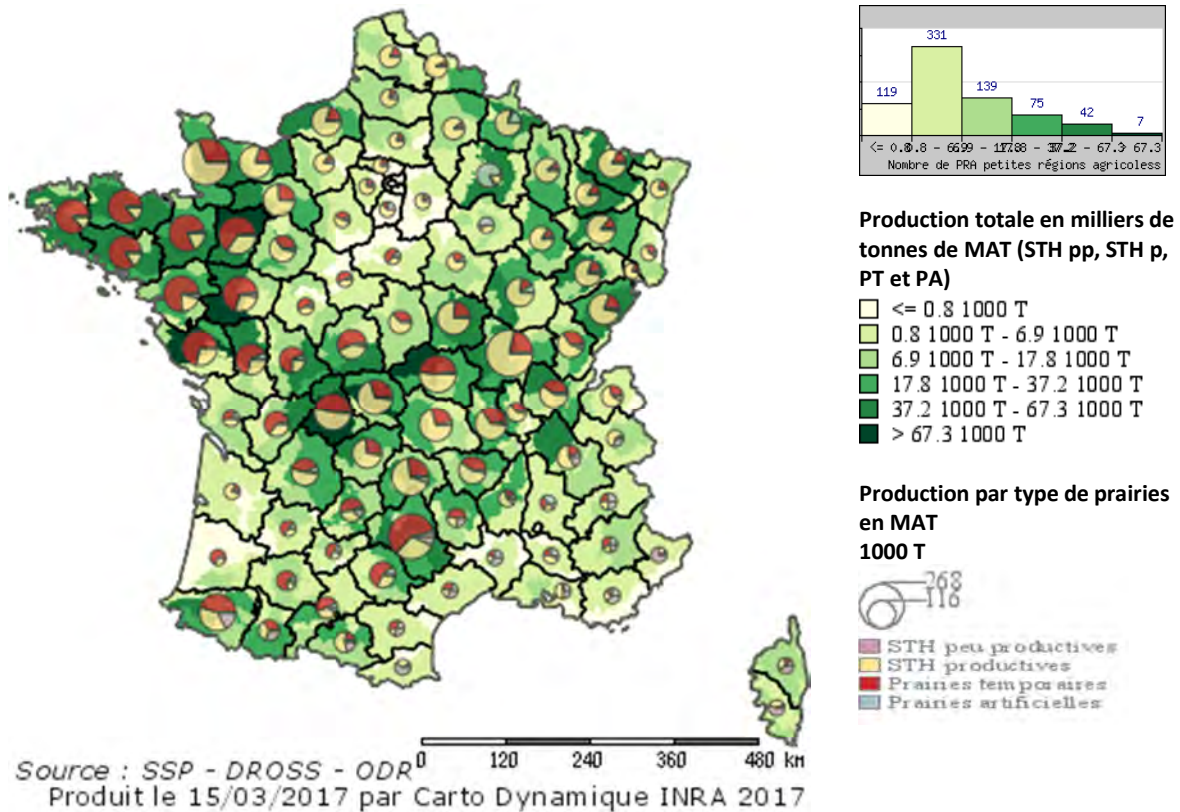
Catégories de prairies SAA	%MAT
Prairies artificielles	14.8
Prairies temporaires	13.0
Prairies naturelles	10.5
STH peu productives	10.5

Nous obtenons ainsi la production de fourrages dans les différents types de prairies par PRA, en tonnes de MAT (Figure 10-2-4).

⁹ Cet exemple est tiré du livre rouge de l'INRA (Baumont *et al.*, 2010).

Figure 10-2-4. Production de fourrage en MAT dans les différents types de prairies. Moyenne 2010-2011-2012. Le fond de carte indique la production totale de fourrage, pour toutes les catégories de prairies.

Les camemberts représentent, agrégés par département, cette même production totale en fonction du poids relatif de chaque catégorie.



Les niveaux de production en MAT dépendent des différences de teneurs en MAT entre les catégories de prairies. La contribution des prairies artificielles et temporaires est donc plus forte quand on regarde la production en MAT plutôt qu'en MS. Toutefois cette différence reste secondaire et c'est bien surtout les surfaces des différentes catégories de prairies qui déterminent la différence de niveau de production entre PRA. On retrouve ainsi une répartition caractéristique de la différenciation spatiale des systèmes d'élevages ruminants en France :

- le Grand Ouest, avec une forte implantation de la production laitière (et de plus en plus de bovins allaitants également), avec une forte majorité de prairies temporaires, à l'exception de la Normandie où les prairies permanentes restent dominantes dans le bocage ; le bassin allaitant du Massif Central, dominé par la prairie permanente ;
- la Bourgogne et le Grand Est, entre production laitière (en zone montagne en particulier) et allaitante, avec là aussi prédominance des prairies temporaires ;
- l'aire périméditerranéenne, dominée par l'élevage de petits ruminants, avec un mix des quatre types de prairies, et notamment une part significative de STH peu productives, et un niveau de production relativement bas ;
- les zones pyrénéennes et alpines, avec selon les régions une dominante bovin ou petits ruminants, lait ou allaitant, mais une configuration similaire en termes de part de catégories de prairies (excepté en Pyrénées Atlantiques, où les prairies temporaire sont plus prégnantes)
- La Champagne où on trouve principalement des prairies artificielles, destinées à la production de luzerne déshydratée (et donc non directement connectées à l'élevage)
- Ailleurs, où l'élevage est très peu présent, la production de fourrages est faible, avec une dominante prairies permanentes et parfois prairies temporaires.

Simulation dynamique avec le modèle PaSim du fonctionnement des prairies et des SE qu'elles délivrent

L'objectif ici est de simuler sur une période de 30 années consécutives le fonctionnement des prairies (surfaces toujours en herbe) en termes de production et de cycle de l'azote, de l'eau et du carbone, considérant une situation pédoclimatique, un type de végétation prairial, un type de mode d'exploitation, pour les principales combinaisons de ces facteurs en France.

Unités pédoclimatiques (UPC) et types de prairies

Dans EFESE-écosystèmes agricoles, les unités pédoclimatiques (UPC) correspondent aux unités spatiales issues du croisement des unités cartographiques de sols de la carte des sols au 1/1 000 000 et des mailles de descriptions du climat passé SAFRAN de 8 x 8 km.

L'analyse des séquences de couverts végétaux issus des traitements des RPG 2006 à 2012 a permis de déterminer au sein de chaque îlot du RPG 2012 le type et la surface des prairies considérant une typologie proche de celle décrite ci-avant (Tableau 10.2.3) :

- les parcours et prairies peu productives, surface toujours en herbe, décrites sous l'appellation « Parcours, landes et estives » dans le RPG. Ces surfaces correspondent aux prairies de type 1.
- les prairies artificielles de légumineuses, le plus souvent temporaires, décrites sous l'appellation « fourrage » et correspondant à des couverts de légumineuses. Ces surfaces correspondent aux prairies de type 2.
- les prairies temporaires correspondant à un enchaînement de prairies et de grande culture dans les séquences de couverts RPG 2006 à 2012. Ces surfaces correspondent aux prairies temporaires de type 3 et 4.
- les prairies permanentes (plus de 6 ans) dans les séquences de couverts RPG 2006 à 2012. Ces surfaces correspondent aux prairies permanentes de type 3 et 4 décrites ci-avant. Étant donné la faible part de légumineuses dans les prairies permanentes (CF. figure 10.2.1.), nous considérons ci-après que ces surfaces correspondent très majoritairement au Type 4.

Le croisement spatial entre les îlots du RPG 2012 et les UPC a permis de spatialiser finement les quatre types de prairies et d'estimer pour chacun d'eux la surface totale par UPC et donc la part relative de surfaces de prairies correspondante (Figures 10.2.5 à 10.2.9). La durée moyenne des prairies temporaires de type 3 par UPC a été estimée par calcul de la durée moyenne de couverts annuels consécutif et délimité par des couverts de grande culture dans les séquences de couverts de prairies et grandes culture par UPC (Figure 10.2.10).

Figure 10-2-5. Pourcentage de surfaces totales de séquences de prairies dans la somme des surfaces de prairies et grandes cultures.

Les parts relatives de surfaces des séquences de prairies et de grandes cultures ont été estimées à partir de l'analyse des séquences de cultures et/ou prairies reconstituées à partir de l'analyse des RPG 2006-2012. Les unités pédoclimatiques en gris correspondent à des zones dans lesquelles (i) il n'y pas de prairie ou de grandes cultures ou (ii) les données des RPG 2006 à 2012 n'ont pas la qualité nécessaire pour reconstituer les séquences de cultures et/ou prairies.

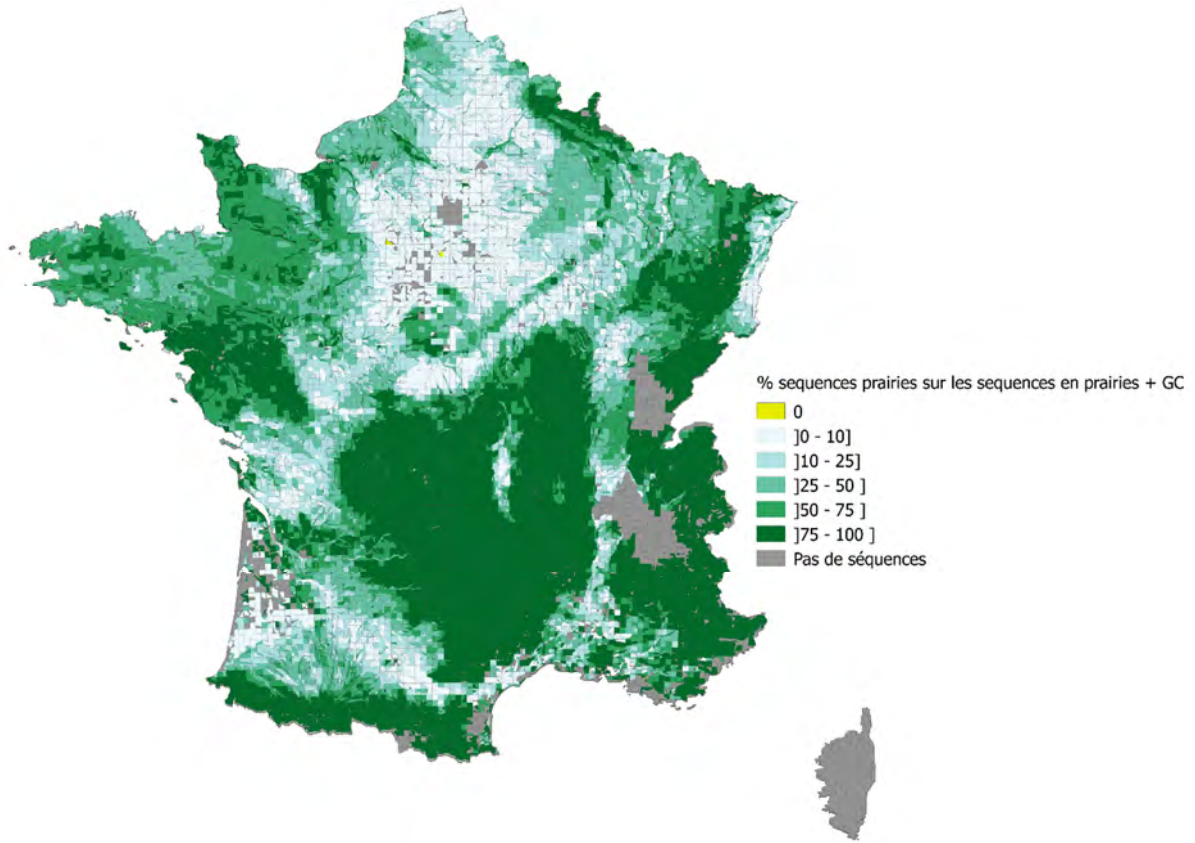


Figure 10-2-6. Pourcentage de parcours et prairies (semi)naturelles non fertilisés (type 1) dans la surface totale de prairies par unité pédoclimatique de l'étude EFESE-écosystèmes agricoles.

Les parts relatives de surfaces des différents types de prairies ont été estimées à partir de l'analyse des séquences de cultures et/ou prairies reconstituées à partir de l'analyse des RPG 2006-2012. Les unités pédoclimatiques en gris correspondent à des zones dans lesquelles (i) il n'y pas de prairie ou (ii) les données des RPG 2006 à 2012 n'ont pas la qualité nécessaire pour reconstituer les séquences de cultures et/ou prairies.

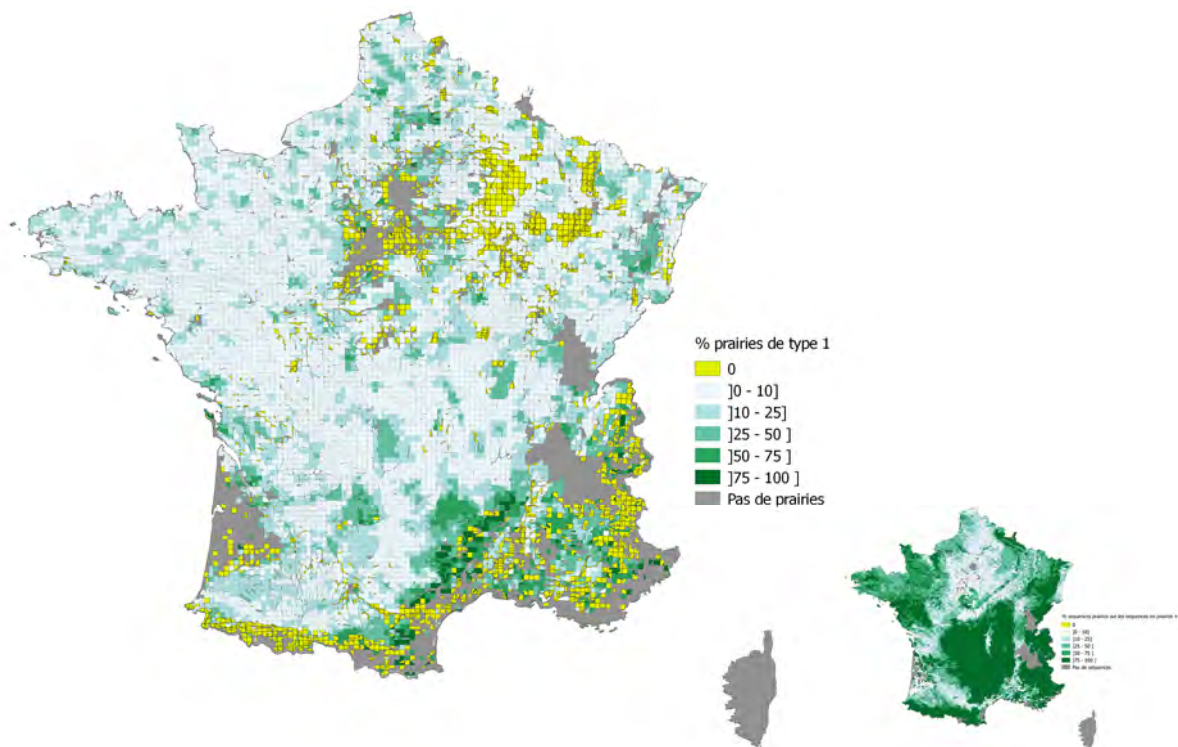


Figure 10-2-7. Pourcentage de prairies de légumineuses semées (type 2) dans la surface totale de prairies par unité pédoclimatique de l'étude EFESE-écosystèmes agricoles.

Les parts relatives de surfaces des différents types de prairies ont été estimées à partir de l'analyse des séquences de cultures et/ou prairies reconstituées à partir de l'analyse des RPG 2006-2012. Les unités pédoclimatiques en gris correspondent à des zones dans lesquelles (i) il n'y pas de prairie ou (ii) les données des RPG 2006 à 2012 n'ont pas la qualité nécessaire pour reconstituer les séquences de cultures et/ou prairies. La carte en bas à droite représente la part des surfaces de séquences de prairies dans la somme des surfaces de séquences de prairies et de grandes cultures.

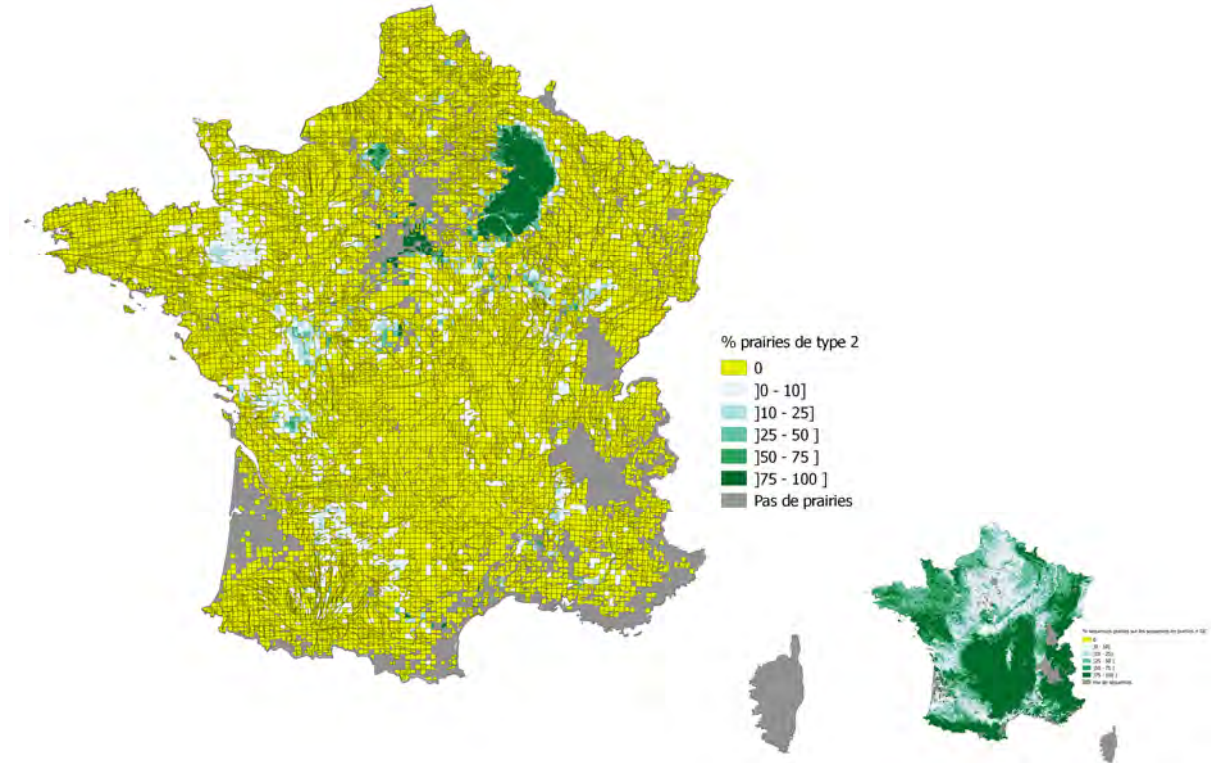


Figure 10-2-8. Pourcentage de prairies temporaires (Type 3 et 4) dans la surface totale de prairies par unité pédoclimatique de l'étude EFESE-écosystèmes agricoles.

Les parts relatives de surfaces des différents types de prairies ont été estimées à partir de l'analyse des séquences de cultures et/ou prairies reconstituées à partir de l'analyse des RPG 2006-2012. Les unités pédoclimatiques en gris correspondent à des zones dans lesquelles (i) il n'y pas de prairie ou (ii) les données des RPG 2006 à 2012 n'ont pas la qualité nécessaire pour reconstituer les séquences cultures et/ou prairies. La carte en bas à droite représente la part des surfaces de séquences de prairies dans la somme des surfaces de séquences de prairies et de grandes cultures.

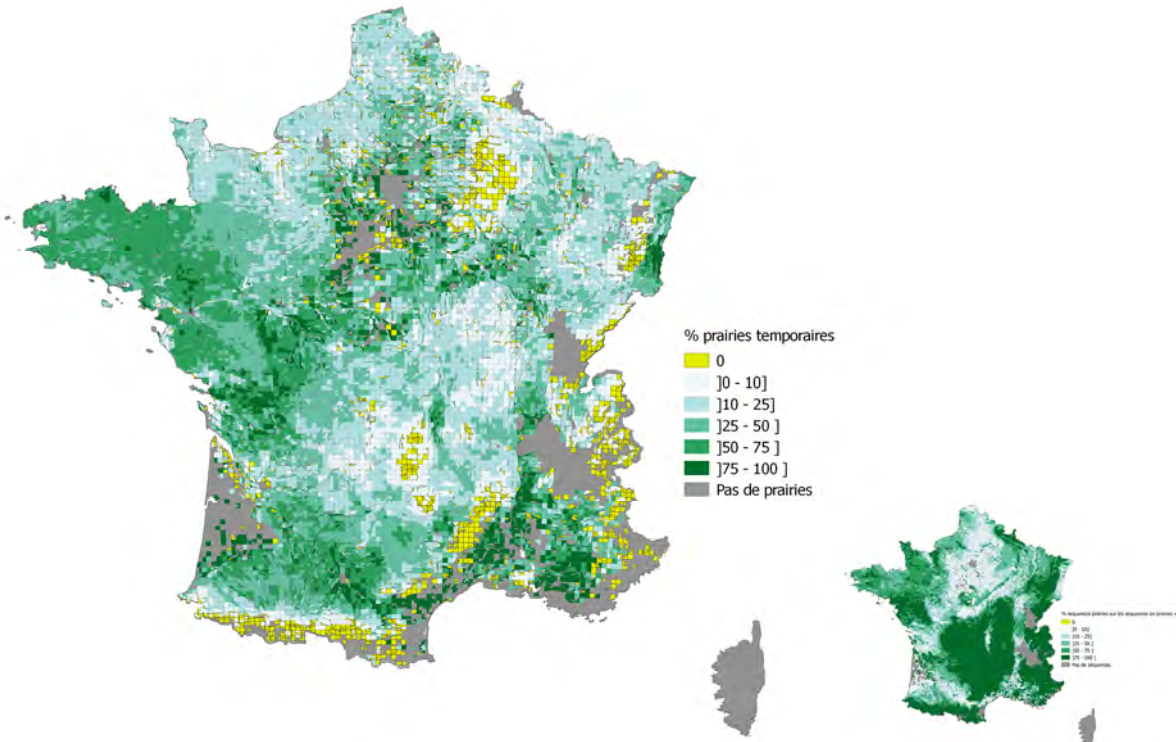


Figure 10-2-9. Pourcentage de prairies permanentes intensifiées sans ou avec très peu de légumineuses (Type 4) dans la surface totale de prairies par unité pédoclimatique de l'étude EFESE-écosystèmes agricoles.

Les parts relatives de surfaces des différents types de prairies ont été estimées à partir de l'analyse des séquences cultures et/ou prairies reconstituées à partir de l'analyse des RPG 2006-2012. Les unités pédoclimatiques en gris correspondent à des zones dans lesquelles (i) il n'y pas de prairie ou (ii) les données des RPG 2006 à 2012 n'ont pas la qualité nécessaire pour reconstituer les séquences de cultures et/ou prairies. La carte en bas à droite représente la part des surfaces de séquences de prairies dans la somme des surfaces de séquences de prairies et/ou grandes cultures.

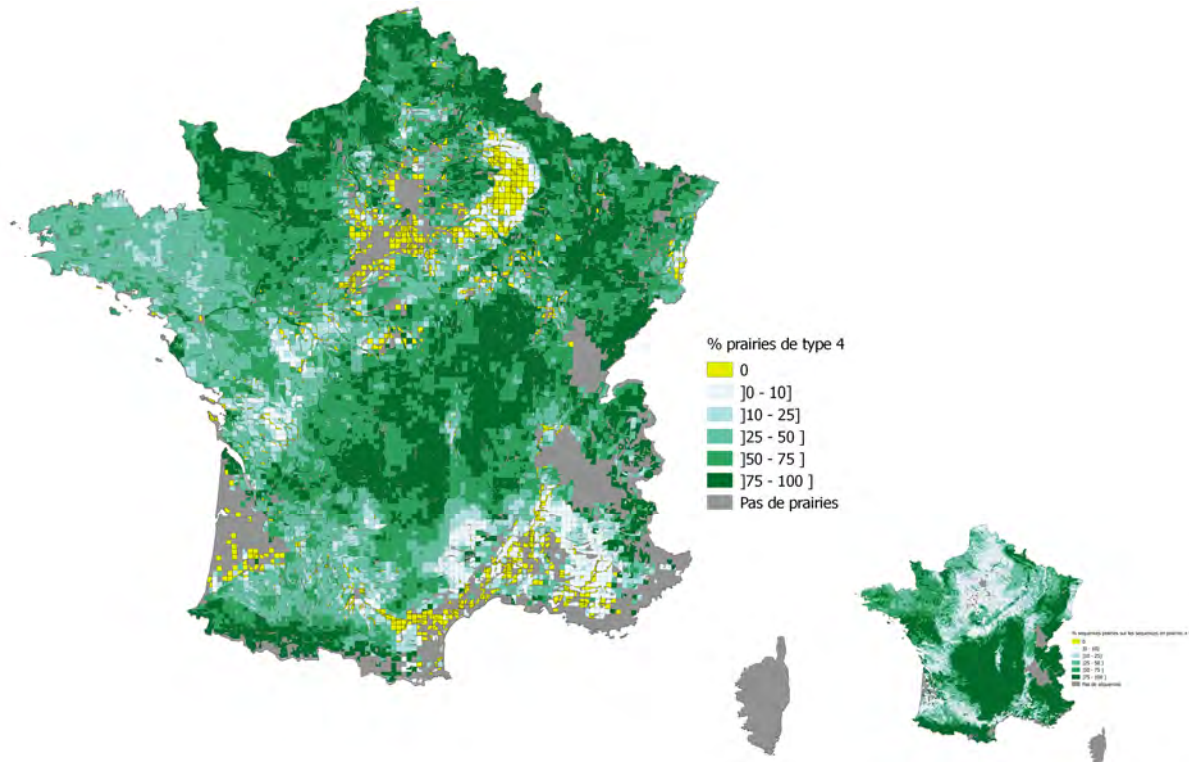
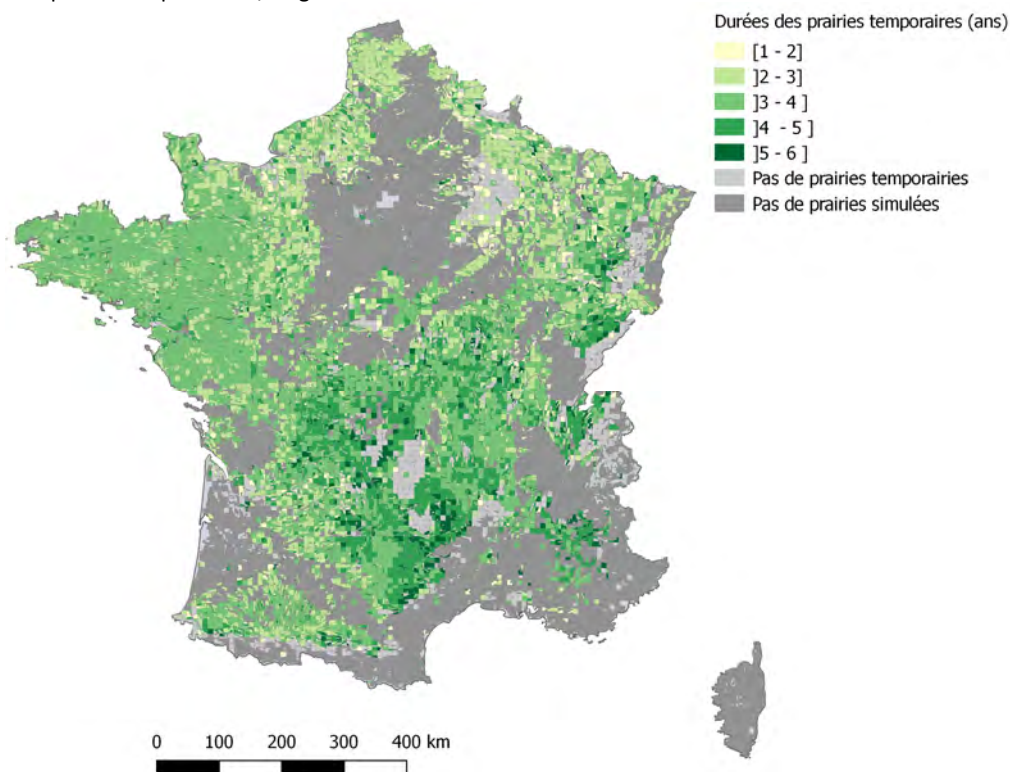


Figure 10-2-10. Durées moyennes (année) des prairies temporaires (Type 3 et 4) par unité pédoclimatique de l'étude EFESE-écosystèmes agricoles estimées à partir de l'analyse des séquences de couverts de cultures et/ou prairies reconstituées à partir de l'analyse des RPG 2006-2012.

Les unités pédoclimatiques en gris clair correspondent à des zones dans lesquelles il n'y pas de prairie temporaire alors qu'il y a d'autres types de prairies. Les unités pédoclimatiques en gris foncé correspondent à des zones dans lesquelles (i) il n'y pas de prairie ou (ii) les données des RPG 2006 à 2012 n'ont pas la qualité nécessaire pour reconstituer les séquences de cultures et/ou prairies. La carte en bas à droite représente la part des surfaces de séquences de prairies dans la somme des surfaces de séquences de prairies et/ou grandes cultures.



Types de prairies simulés avec PaSim

Comme indiqué ci-avant, 3 types de prairies sont simulés avec PaSim :

- Les prairies permanentes peu productives exploitée avec le mode d'exploitation n° 15
- Des artefacts de prairies temporaires avec (30%) ou sans légumineuses, simulés comme des surfaces toujours en herbe conduite avec les modes d'exploitation des prairies temporaires
- Les prairies permanentes productives sans légumineuse suivant les modes d'exploitation de ce type de prairie

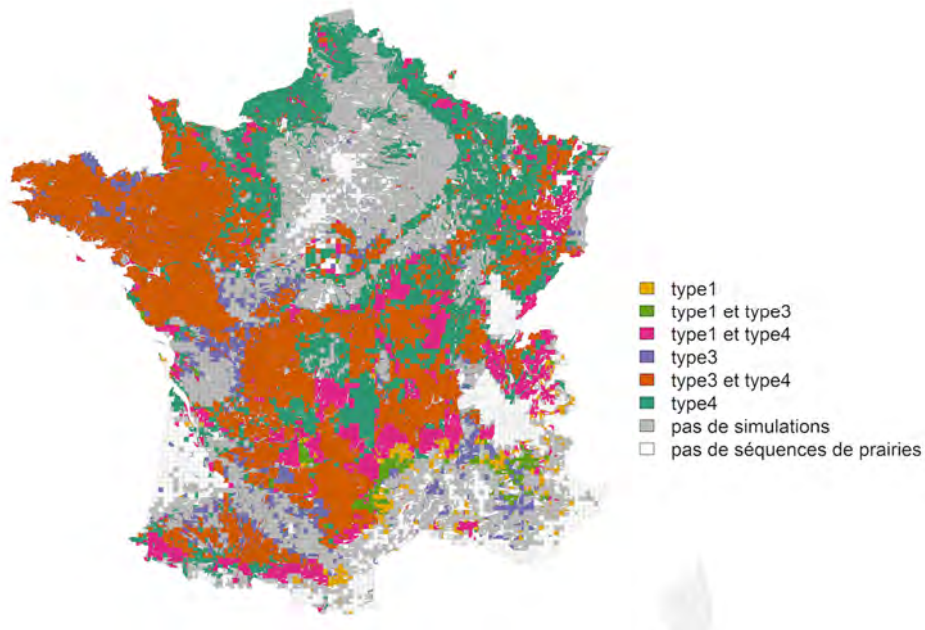
Afin de limiter le nombre de simulations seules les couples type de prairie-UPC répondant aux critères suivant ont été simulés :

- 1 type de prairie par UPC si sa surface dans l'UPC est supérieure à 50% de la surface RPG 2012 de l'UPC,
- Sinon 2 types de prairies, à conditions que leur surface soit respectivement supérieure à 10% de la surface RPG 2012 de l'UPC.

La distribution spatiale des différents types de prairies simulés avec PaSim au sein des UPC est présentée dans la figure 10-2-11.

Figure 10-2-11. Distribution spatiale des différents types de prairies simulés avec PaSim au sein des unités pédoclimatiques.

Type 1 : prairies permanentes peu productives (landes et estives). Type 3 : prairies temporaires (simulés comme surface toujours en herbe) et Type 4 : prairies permanentes productives.



Des simulations « artefacts » sans fertilisation sont générées par déclinaison de celles comportant un mode d'exploitation avec fertilisation afin d'évaluer l'effet de celle-ci.

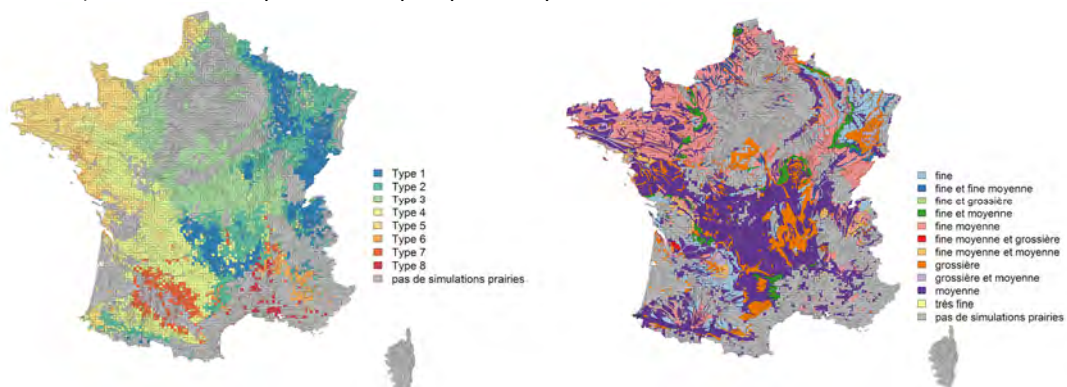
Au total, 259 981 simulations sur 30 ans et sur 14 729 UPC sont réalisées, parmi lesquelles :

- 164 832 correspondent à des modes d'exploitation réels, dont :
 - o 3 828 pour des prairies de type 1 sur 2475 UPC
 - o 61 759 pour des prairies de type 3 sur 7720 UPC
 - o 99 245 pour des prairies de type 4 sur 12983 UPC
- 95 149 sont des simulations sans azote

Toujours afin de réduire le nombre de simulations, les prairies de type 3 sans légumineuse ont été « agrégées » avec les prairies de type 4 situées sur une même UPC et gérées selon le même mode d'exploitation. Le nombre de simulation final est de 242 395 dont 93 863 sans fertilisation.

Les distributions spatiales des différents types de climat et de sol dans les UPC pour lesquelles des simulations PaSim ont été réalisées sont présentées dans la figure 10-2-12.

Figure 10-2-12. Distribution des différents types de climats (à gauche) et des différents types de texture de sol (à droite) dans les unités pédoclimatiques pour lesquelles des simulations avec PaSim sont réalisées.



Type fonctionnel de végétation

Un type fonctionnel de végétation a été attribué à chaque type de prairie en fonction de la situation climatique (T° moyenne annuelle et déficit hydrique climatique annuel) et du niveau de fertilisation. Ces seuils ont été définis, à dire d'expert, à partir d'une analyse statistique des relations entre caractéristiques du climat (température, déficit en eau), pratiques de fertilisation, modes d'exploitation et composition fonctionnelle de 1 283 prairies permanentes réparties sur 8 sites en France (Duru *et al.*, 2013b). Les règles suivantes ont été appliquées pour affecter un type fonctionnel de végétation aux prairies dans chaque UPC (les mêmes règles sont appliquées pour les types 1, 3 et 4) :

- Pour fertilisation annuelle ≥ 60 unités d'azote :
 - A pour $T^{\circ} \geq 11$ et (P-ETP) ≥ 100
 - B pour $T^{\circ} \geq 11$ et (P-ETP) < 100
 - b pour $T^{\circ} < 11$ et (P-ETP) ≥ 100
 - C pour $T^{\circ} < 11$ et (P-ETP) < 100
- Pour fertilisation annuelle < 60 unités d'azote :
 - B pour $T^{\circ} \geq 11$ et (P-ETP) ≥ 100
 - b pour $T^{\circ} \geq 11$ et (P-ETP) < 100
 - C pour $T^{\circ} < 11$ et (P-ETP) ≥ 100
 - D pour $T^{\circ} < 11$ et (P-ETP) < 100

Un seul type de végétation a été affecté par type de prairie et le même type de végétation a été affecté pour les différents types de prairie considérant la situation climatique et la fertilisation minérale. Cette simplification revient à considérer que les prairies ne sont composées que d'un seul type fonctionnel et que les prairies temporaires ont le même type de végétation que les prairies permanentes. Néanmoins, pour les prairies de type 3, on considère bien qu'il peut y avoir deux groupes fonctionnels principaux (graminées et légumineuses, voir section suivante).

Modes d'exploitation et part de légumineuses par type de prairie

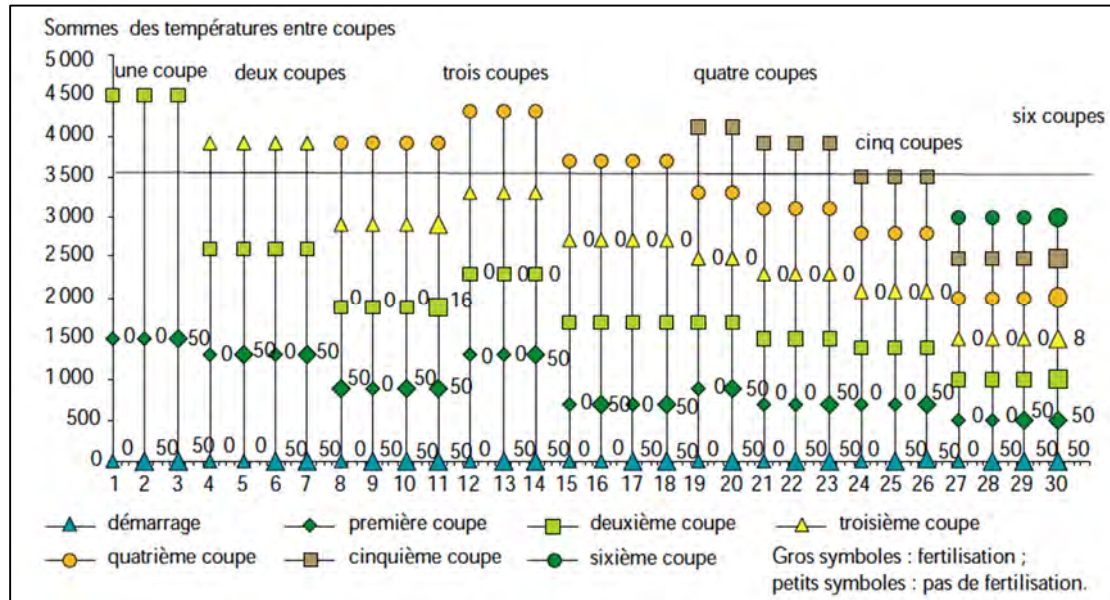
Les modes d'exploitation des différents types de prairies dans les différentes situations pédoclimatiques ont été attribués à partir des résultats de l'enquête du SSP sur les prairies de 1998. Dans cette enquête, les pratiques étaient enregistrées, en termes de type et nombre d'utilisation (fauche, ensilage, pâturage, fauche de refus) pour un échantillon de prairies représentatives par Régions Fourragères (RF, Figure 10-2-13 ; Ruget *et al.*, 2006), pour trois grands types de prairies : les prairies artificielles (Type 2), les prairies temporaires (Type 3 et 4), et les prairies permanentes productives (Type 4). Seuls les types de prairie représentant au moins 7000 ha dans la région fourragère ont été enquêtés.

Ruget *et al.* (2006) ont classifié et modélisé la diversité des modes d'exploitation observés en un nombre limité de séquences d'opérations techniques (30, Figure 10-2-13) où nombre d'utilisations et fertilisations ont été estimés à partir des données de l'enquête prairie 1998, tandis que les intervalles entre défoliation ont été estimés en somme de degrés jours afin de prendre en compte en compte la phénologie annuelle des espèces (Duru *et al.*, 2010b). Les données de l'enquête prairie 1998 fournissent aussi des informations sur la fertilisation minérale et organique appliquée en fonction du type et du rythme d'utilisation. L'information sur la fertilisation organique n'est disponible que sous la forme d'un équivalent en N minéral.

Dans cette enquête, les données sur le taux de légumineuses ne sont disponibles que pour les seules prairies temporaires (il est fixé à 0% pour les prairies permanentes et 100% pour les prairies artificielles). Les résultats de l'enquête prairie 1998 ont été agrégés de façon à obtenir une valeur unique pour l'ensemble de la région fourragère, à partir de distribution dans 4 classes de fréquence définies par les seuils 0, 25, 50 et 75 %. Les 2 classes les plus fréquentes étaient celles à moins de 25 % de légumineuses et celles avec 25 à 50 %. Considérant les connaissances sur les taux de légumineuses dans ces deux types de prairies seules les prairies temporaires avec un taux de légumineuses entre 25 et 50 % ont été caractérisées comme mixte avec un taux arbitrairement fixé à 30% de légumineuses.

Figure 10-2-13. Présentation et principales caractéristiques des 30 modes d'exploitation (a) selon le niveau de fertilisation et les intervalles entre coupes et (b) répartition nationale selon le type de prairie (Ruget *et al.*, 2006).

Chaque ligne verticale schématise un mode d'exploitation, avec les sommes de températures (sur l'axe vertical) auxquelles sont déclenchées les "défoliations", la taille du symbole indique la présence de fertilisation ou non (petit symbole : pas de fertilisation, gros symbole : apport) et la forme du symbole donne le numéro de l'utilisation. Le trait horizontal est indicatif de la somme de température le souvent disponible. Le symbole au-delà de ce trait indique la possibilité d'une coupe surnuméraire si la température est particulièrement élevée une année donnée.

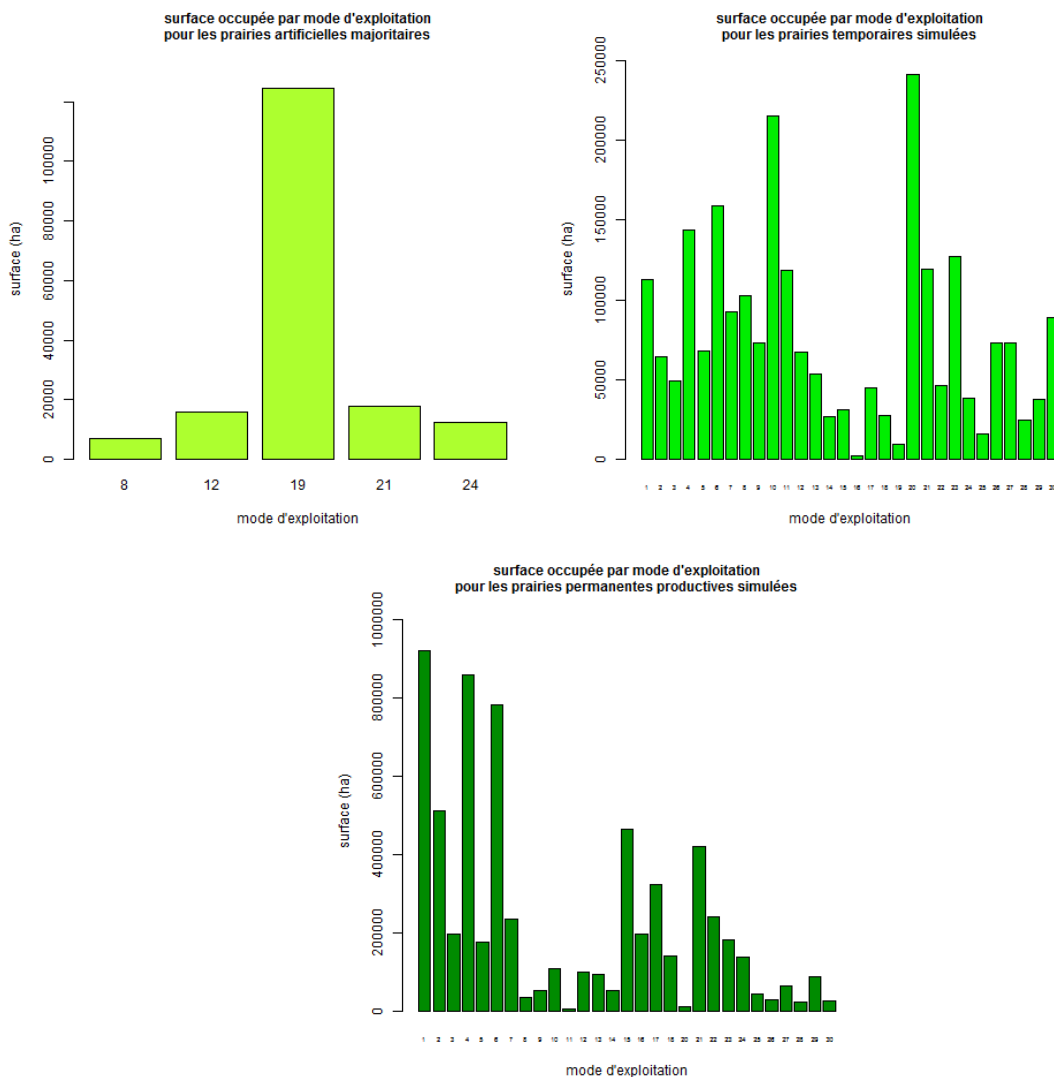


Numéro de mode	Type et nombre de défoliation	Nombre maximum d'utilisations	Somme de températures maximale couverte	Fertilisation totale (kg N/ha)
1	F	2	4500	0
2	F	2	4500	50
3	F	2	4500	100
4	FP	3	3900	0
5	FP	3	3900	50
6	FP	3	3900	50
7	FP	3	3900	100
8	EFP	4	3900	0
9	EFP	4	3900	50
10	EFP	4	3900	100
11	EFP	4	3900	150
12	FPP	4	4300	0
13	FPP	4	4300	50
14	FPP	4	4300	100
15	PPP	4	4300	0
16	PPP	4	3700	50
17	PPP	4	3700	50
18	PPP	4	3700	100
19	EEEE	5	4100	0
20	EEEE	5	4100	100
21	PPPP	5	3900	0
22	PPPP	5	3900	50
23	PPPP	5	3900	100
24	PPPPP	6	4200	0
25	PPPPP	6	4200	50
26	PPPPP	6	4200	100
27	PPPPPP	7	3500	0
28	PPPPPP	7	3500	50
29	PPPPPP	7	3500	100
30	PPPPPP	7	3500	200

Les évolutions relativement faibles de surfaces et production de fourrages rapportées par Devun et Legarto (2011) sur la période 1998-2009 nous permettent de considérer comme satisfaisantes les données recueillies par l'enquête SSP de 1998 pour représenter la diversité des modes d'exploitation des prairies à l'échelle française (Ruget *et al.*, 2006) sur la période de référence de l'étude EFESE-écosystèmes agricoles (2010-2012). Le croisement spatial des données du RPG sur la surface des types de prairies et des modes d'exploitation par type de prairies par région fourragère a permis d'attribuer, par UPC, à chacun des trois grands types de prairies les modes d'exploitation correspondant à ceux de la région fourragère dans laquelle ils se trouvent. Le mode d'exploitation n° 15 a été attribué à dire d'experts impliqués dans l'étude EFESE-écosystèmes agricoles pour les parcours et prairies peu productives pour toute la France. Dans les RF où les informations sur les modes d'exploitation d'un type de prairie étaient manquantes, essentiellement pour les prairies temporaires, les modes d'exploitation du type de prairies considéré des régions fourragères voisines ont été affectés.

Le résultat de la distribution des modes d'exploitation par type de prairie en France est présenté dans la figure 10-2-14. Les prairies artificielles au sein d'exploitation d'élevage sont le plus souvent exploitées suivant le mode d'exploitation n°19 qui correspond à un enchaînement moyen de 4 coupes pour la production d'ensilage (sans fertilisation). Il y a par contre une très forte variabilité des modes d'exploitation sur les deux autres types de prairies

Figure 10-2-14. Distribution surfacique des différents types de modes d'exploitation pour trois types de prairies. Bien que non simulés, les modes d'exploitation des prairies artificielles de légumineuses sont présentés ici à titre d'information complémentaire.



Le chargement animal

Le chargement animal a été estimé à partir des données du RA2010 sur la surface pâturée et le nombre d'animaux pâturant une partie de l'année par exploitation pour les 5 OTEX d'élevage dominants en France, bovin lait, bovin viande, caprins, ovins, polyculture élevage, bovin mixte. Ces nombres d'animaux ont été traduits en UGB à partir du référentiel d'agreste (

Tableau 1). Les catégories « bovins de moins de 1 an » et « bovins de plus de 1 an » n'existant pas dans le tableau des UGB d'agreste, ils sont obtenus en moyennant :

- Les catégories autres veaux mâles et autres veaux femelles pour les bovins de moins de 1 an
- Toutes les catégories de bovins entre 1 et 2 ans et de plus de 2 ans pour les bovins de plus de 1 an

Tableau 10-2-6. Coefficient (en millièmes) utilisés pour traduire des têtes en UGB

Catégories animales	Alimentation grossière (UGBAG)
Vaches lait	1000
Vaches viande	850
Bovin de moins d'un an	380
Bovin de plus d'un an	711
Chèvres (y compris réforme)	170
Brebis mères nourrices (y compris réforme)	150

Afin d'éviter d'estimer des chargements moyens sur une large diversité de systèmes qui peuvent ne pas refléter les systèmes majoritaires dans une région donnée il a été décidé d'estimer le chargement moyen pour l'OTEX majoritaire en terme d'UGB par RF. Ainsi, pour chaque RF, les calculs de chargement ont été réalisés sur les seules exploitations de l'OTEX majoritaire.

Le chargement moyen annuel est calculé, par RF, en divisant le nombre d'UGB total des exploitations de l'OTEX majoritaire par la surface pâturée par ces UGB. Pour PaSim, il est nécessaire de calculer un chargement instantané, c.-à-d. le nombre d'UGB pâturant à un instant t par hectare. Au sein d'une exploitation, ce chargement instantané évolue au fil de l'année en fonction du régime de pousse de l'herbe, des surfaces affectées au pâturage et du nombre et types d'animaux pâturant.

Ne disposant pas de données spatialisées pour réaliser la transformation des chargements moyens annuels en chargements instantanés, cette transformation a été réalisée à dire d'experts impliqués dans l'étude EFESE-écosystèmes agricoles. Elle est basée sur les deux hypothèses suivantes : (i) en moyenne la durée de repousse de l'herbe entre deux pâturages ou une fauche et un pâturage, sur une même parcelle, est de l'ordre de 21 jours et (ii) la durée de pâturage moyen sur un espace de pâturage est de l'ordre de 10 jours. Considérant ces deux hypothèses, la surface pâturée est considérée comme organisée en trois unités de surface exploitées par le pâturage de manière séquentielle : les animaux pâturent deux fois dix jours sur deux unités de surface avant de revenir sur la troisième. Le chargement instantané (Tableau -2-8 et Figure) est alors estimé à trois fois supérieur au chargement moyen annuel (Tableau 10-2-7 et Figure 10-2-15). Les résultats de chargement instantané ont été confrontés aux connaissances des experts qui ont validés la cohérence générale des ordres de grandeur et de leur distribution spatiale. Ces choix de modélisation, qui ont été réalisés pour pallier au manque de données disponibles dans l'étude EFESE-écosystèmes agricoles, ne permettent pas d'estimer finement un chargement instantané et de le faire varier au fil de la saison. Cependant, le modèle PaSim module la durée de présence des animaux en fonction de l'herbe disponible pour un chargement instantané donné : dans le modèle lorsqu'il n'y a plus d'herbe dans la parcelle les animaux sortent de celle-ci. Les effets du choix de cette représentation du chargement instantané sur les variables simulées seront à analyser.

Tableau 10-2-7. Statistiques sur le chargement moyen par RF des OTEX élevage de ruminants dominantes par région fourragère

Min.	1er Qu.	Médiane	Moyenne	3eme Qu.	Max.	écart type
0.237	1.137	1.674	1.758	2.248	6.224	0.92

Figure 10-2-15. Chargement annuel moyen par région fourragère

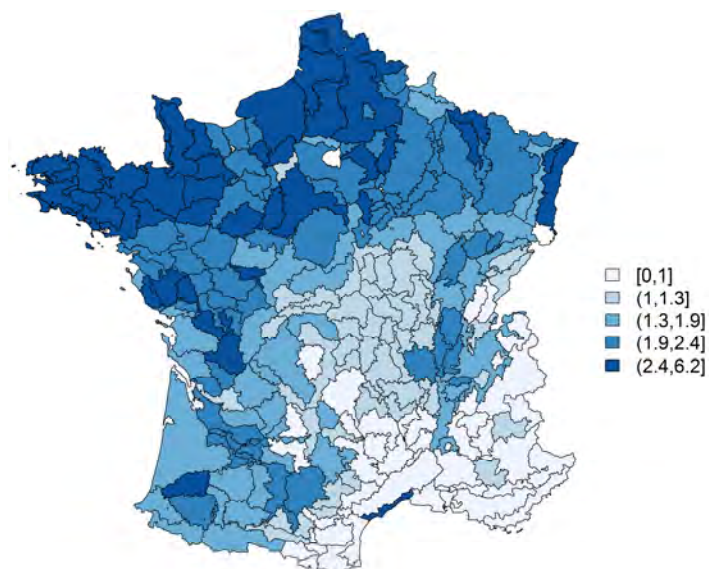
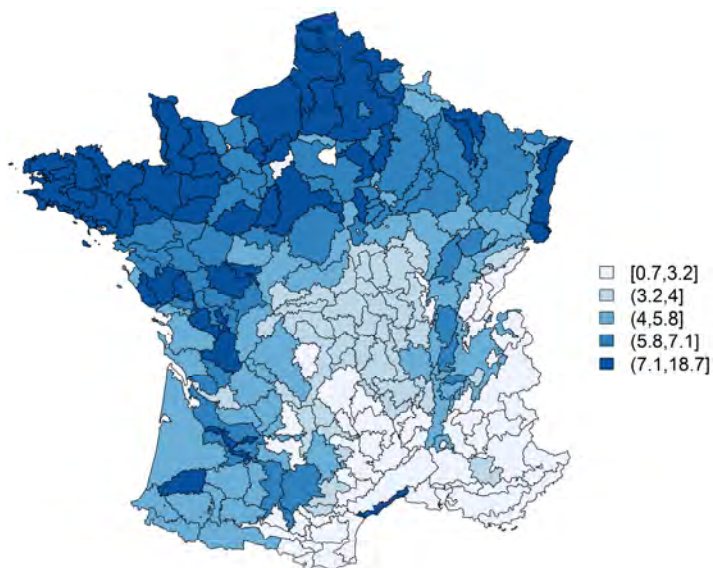


Tableau 10-2-8. Statistiques sur le chargement instantané des OTEX élevage de ruminants dominantes par région fourragère

Min.	1er Qu.	Médiane	Moyenne	3eme Qu.	Max.	écart type
0.7111	3.41	5.021	5.275	6.744	18.67	2.77

Figure 10-2-16. Chargement instantané par RF



État d'avancement des simulations

Lors du rendu du rapport EFESE-écosystèmes agricoles, les résultats des simulations réalisées avec PaSim n'étaient pas encore analysés. Un collectif d'experts chargé réalisera ce travail d'analyse dans la continuité de l'étude EFESE-écosystèmes agricoles, dans le cadre des activités de recherche de l'INRA.

10.2.3.2. Perspectives de recherche

Le plan de simulation présenté ci-avant est ambitieux et original. Plusieurs éléments de ce plan de simulation pourraient être améliorés.

Concernant les modèles, une chaîne de modélisation couplant modèle de prairies et modèle de grande culture pourrait être utilisée pour simuler le fonctionnement des prairies temporaires. Le développement actuel de la chaîne de modèle PaSim-CERES à l'INRA devrait permettre d'atteindre cet objectif à court terme. Par ailleurs, l'utilisation de modèles différents (approche multi-modèles) permettrait d'évaluer l'incertitude liée aux formalismes et paramétrage des modèles.

Concernant les données, il serait nécessaire :

- d'évaluer dans quelle mesure les modes d'exploitation issus de l'analyse de l'enquête prairies du SSP de 1998 représentent bien les modes d'exploitation actuels. Pour cela, l'important travail d'analyse réalisé sur l'enquête prairie de 1998 serait à reproduire sur l'enquête prairies de 2011,
- lors de cette analyse, de distinguer les apports de fertilisation minérale et organique afin de représenter les effets des apports organiques sur les cycles du carbone et de l'azote dans les prairies,
- de définir plus finement les types de végétation par type de prairies. Par exemple, il pourrait être intéressant de définir des types de variétés/espèces pour les prairies temporaires.

A plus long terme, il serait nécessaire de développer des modèles représentant le fonctionnement de prairies multi spécifique pour prendre en compte les effets de complémentarités fonctionnelle et temporelle et de compétition et facilitation entre les espèces.

10.3. Production de plantes sauvages à d'autres fins que les fourrages

Sylvain Plantureux

10.3.1. Spécification biophysique

10.3.1.1. Dénomination précise

En dehors de la production alimentaire (pour l'Homme ou les animaux d'élevages), de la fourniture de matériaux de fabrication d'objets et de construction (ex : lin pour le tissu) ou de la production d'énergie, un grand nombre de plantes présentes dans les écosystèmes agricoles contiennent des substances qui sont utiles à la santé des hommes et des animaux, contribuent au goût des aliments, ou servent de plantes ornementales. Ces plantes directement prélevées dans les écosystèmes (dont les écosystèmes agricoles) ont été et continuent à être largement utilisées par les hommes (Turner *et al.*, 2011).

Ces plantes peuvent être introduites intentionnellement par l'Homme, comme les cultures de plantes médicinales et aromatiques, ou se trouver à l'état spontané dans les écosystèmes agricoles. Lorsqu'elles sont cultivées, la culture de ces plantes est souvent considérée comme un moyen d'améliorer le rendement et de garantir une stabilité de la qualité des plantes (Dajic-Stevanovic *et al.*, 2015). La domestication et la mise en culture des plantes sauvages d'intérêt sont cependant limitées à un nombre réduit d'espèces. A l'état spontané, **on trouve ces plantes soit dans les prairies et parcours (ex : arnica des montagnes), soit parmi les adventices des cultures pérennes ou annuelles (ex : chénopode blanc)**. Sur les surfaces de prairies naturelles et parcours les herbivores d'élevage peuvent alors avoir accès à cette ressource de façon directe, par pâturage, ou de façon indirecte dans le fourrage récolté.

Le présent texte vise à décrire le service écosystémique de fourniture en plantes non introduites intentionnellement par l'homme. La culture de plantes telles que les plantes médicinales correspond dans EFESE-écosystèmes agricoles à une production de « biens agricoles », et entre dans le champ de la section 10.1 « production de biens végétaux par les plantes cultivées ». Par ailleurs, en jouant le rôle d'attracteur (ou d'hôte) ou de répulsif pour des ravageurs et pathogènes des cultures, les plantes sauvages des écosystèmes agricoles peuvent contribuer à la protection des cultures ou au contraire représenter des « bioagresseurs » des cultures, et en ce sens constituent un déterminant biophysique des SE des régulations biologiques des graines d'adventices.

Typologie des plantes médicinales et aromatiques

Il existe de nombreuses manières de classer les plantes sauvages d'intérêt pour l'homme, en fonction de leur usage, des familles de molécules qu'elles contiennent, ou encore des familles botaniques. Sur le plan de l'usage, Paz Arriza Berm (2015) propose la typologie suivante : plantes médicinales, aromatiques, culinaires et ornementales.

- **Plantes médicinales** : plantes qui ont des vertus curatives et sont utilisées en médecine. En 1991, Farnsworth et Soejarto estimaient à 70 000 le nombre d'espèces de plantes utilisées dans la médecine traditionnelle à l'échelle mondiale. Botanistes et ethnopharmacologues ont recensé ces utilisations médicinales des plantes. Cette information est généralement consignée dans des ouvrages (ex : Launert, 1981), ou dans des bases de données (ex : <http://www.herbmed.org> ou <http://www.pfaf.org>). La nature des informations varie selon les sources : données relatives à un secteur géographique (ex : Inde : <http://www.medicinalplants.in/> ou France : <http://www.ethnopharmacologia.org/documentation/les-plantes-pharmacopee-francaise/>), données sur les espèces faisant d'objet d'importations (Lange *et al.*, 1998). Les informations des ouvrages et de nombreux sites

sont souvent limitées en nombre d'espèces, mais des bases telles que Tela Botanica (en France <http://www.tela-botanica.org>) recensent un grand nombre d'espèces et leur utilisation en médecine.

Par exemple, il a été démontré que les coumarines¹, présentes dans des plantes prairiales comme les mélilots ou la flouve odorante, ont des propriétés anti-inflammatoires (Fylaktakidou, 2004), anti-oedémateuses et anticancéreuses (Emami et al., 2015). L'arnica des montagnes (prairies) qui fait notamment l'objet d'une valorisation commerciale (droits de cueillette perçus par les communes) est utilisé pour le traitement des hématomes (Voir encadré 10-3-1. Par extension à ces usages médicaux, certaines plantes peuvent être utilisées en cosmétique ;

Les vertus de ces plantes médicinales font l'objet de très nombreux travaux et publications scientifiques, et tout particulièrement ceux relevant de l'ethnopharmacologie (voir notamment : Journal of Ethnopharmacology, Phytochemistry, Journal of Pharmacy and Pharmacology). Plus récemment, les sciences vétérinaires et zootechniques se sont intéressées à leurs effets chez l'animal de rente (Ognik et al., 2016 ; Abeduni et al., 2016 Piluzza et al., 2014 – voir encadré 10-3-2). On note une utilisation croissante en élevage d'huiles essentielles dans la gestion préventive ou curative de la santé animale (Abd El-Hack et al., 2016). Ces huiles sont extraites de plantes cultivées ou sauvages.

Encadré 10-3-1. L'exemple de l'arnica des montagnes

L'*Arnica montana* est une plante médicinale utilisée pour traiter les affections inflammatoires locales, d'origines traumatique ou infectieuse. Riche en principes anti-inflammatoires et antalgiques, elle est utilisée par l'industrie pharmaceutique pour la fabrication de pommades, d'onguents et autres préparations pharmaceutiques. La conservation de populations sauvages (que l'on retrouve principalement dans les écosystèmes prairiaux) est d'un grand intérêt car cette espèce est difficile à cultiver (Lange 1998). On récolte actuellement cette espèce en France, en Espagne et en Roumanie. Elle est distribuée sur une partie du continent européen (cf site IUCN <http://maps.iucnredlist.org/map.html?id=162327>). En France, l'*Arnica montana* est une plante des terrains siliceux des régions montagneuses (Vosges, Alpes, Massif central, Pyrénées) mais aussi de certaines plaines (ex : Sologne ou Landes). Elle est totalement absente du pool régional d'espèces des régions du Nord-Ouest. De nombreux travaux, comme ceux de Maurice et al. (2012) ont montré que les facteurs principaux déterminant la survie de l'espèce sont la température, l'humidité et le niveau de fertilité. L'accroissement par fertilisation du niveau de fertilité des prairies est reconnu comme le principal facteur anthropique expliquant la régression des populations d'*Arnica montana*.

Encadré 10-3-2. L'exemple des plantes à tanins² pour lutter contre les infections des ruminants, diminuer l'usage de médicaments, et améliorer la qualité de la viande (Hoste et al., 2012)

L'utilisation d'anthelminthiques³ végétaux naturels est une alternative possible pour contrôler des nématodes gastro-intestinaux (GIN) chez les ruminants. L'effet vermifuge de plantes contenant des tanins a déjà été montré chez les ovins et les caprins. Ces propriétés vermifuges sont principalement associées à des tanins condensés (TC). Par exemple, une étude de l'effet *in vitro* de trois plantes contenant des tanins contre les nématodes GIN des bovins a permis de montrer que le sainfoin cultivé et deux lotiers (*Lotus pedunculatus* et *Lotus corniculatus*) inhibent significativement des comportements alimentaire des larves de *C. oncophora* et *O. ostertagi* au premier stade larvaire de manière dose-dépendante. L'extrait de *L. pedunculatus*, basé sur EC(50) a été le plus efficace contre les nématodes, suivies de *O. vicifolia* et *L. corniculatus*. L'effet du TC extraits sur l'état larvaire est corrélé avec le comportement alimentaire et à la teneur en TC et au ratio procyanidin/prodelphidin. Des extraits avec ajout de polyvinylpyrrolidone, un inhibiteur des tanins provoquent presque les mêmes valeurs que le témoin « négatif ». Ceci confirme le rôle des TC dans l'effet vermifuge des extraits de plantes contenant des tanins contre les nématodes des bovins (Novobilsky et al., 2011). Une filière de production de granulés de sainfoin s'est organisée en Champagne, qui livre ses produits à des éleveurs à l'échelle nationale. Les prairies riches en sainfoin, lotier et autres plantes en tanins condensés pâturée ou fauchées peuvent fournir ce type de plantes et d'effets associés.

En outre, il a été démontré que les tanins condensés avaient un effet favorable sur la qualité de la viande ovine, soit sur le plan de la réduction des odeurs indésirables (Scheurs et al., 2008), soit sur le plan de la teneur en acides gras polyinsaturés (Girard et al., 2016).

¹ cf http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/doschim/decouv/parfums/loupe_coumarine.htm

² substance organique contenue dans de nombreux végétaux, notamment dans les écorces et les bois, les racines, les feuilles, les fruits et gousses (myrobolam, acacia)

³ Un antihelminthique est un produit qui détruit ou élimine les helminthes présents dans le tube digestif ou autres tissus et organes qu'ils occupent chez l'hôte, notamment les parasites des animaux d'élevage

- **Plantes aromatiques** : plantes qui sont utilisées en raison des arômes et odeurs qu'elles dégagent, en alimentation (épices, aromates, condiments ou impact sur le goût final du produit) ou en cosmétique. Les huiles extraites de ces plantes sont utilisées pour la production de parfums et des fragrances variées. Il est établi que ces plantes ont un rôle sur le goût des produits, comme le fenouil des Alpes qui donne un goût caractéristique à plusieurs fromages produits à partir d'animaux pâturant en alpages.

- **Plantes culinaires** : plantes utilisées directement comme ingrédients à part entière des préparations culinaires. L'Homme a généralement domestiqué ces plantes (ex : menthe, basilic, thym), mais celles présentes dans les écosystèmes agricoles (prairies principalement) font l'objet d'une utilisation relativement restreinte (cueillette ponctuelle de pissenlit, par exemple). Les utilisations peuvent être extrêmement variées (tisanes, apéritifs, confitures...). Certains chefs se sont également fait une spécialité de l'utilisation de ces plantes. Parmi les plantes des écosystèmes agricoles fréquemment utilisées pour ce type d'utilisation on trouve par exemple : myrtilles et airelles sauvages, ortie, bourrache, pissenlit, trèfle, petits géraniums, consoude, oseille, menthe, chénopode blanc (voir encadré 10-3-3), primevère, berce, stellaire, plantain, mauve, capselle bourse à Pasteur, chardons, champignons (par exemple rosée des prés).

Encadré 10-3-3. Exemple de la consommation du chénopode blanc

Les feuilles et les jeunes racines du chénopode blanc, considéré comme une adventice des cultures, peuvent être consommées, par exemple en les cuisinant comme des épinards. La consommation doit cependant être limitée en raison d'une forte teneur en acide oxalique. Les semences sont riches en protéines, en vitamine A, en calcium, en phosphore et en potassium. Des archéologues ont montré qu'à l'âge de fer, cette espèce était déjà consommée en Europe (Miles, 1978).

- **Plantes ornementales**, utilisées dans la confection de bouquets ou la décoration. On peut associer à cette catégories les plantes tinctoriales (plusieurs espèces rencontrées dans les prairies ont pour nom scientifique d'espèce *tinctoria* ou *tinctorium*) dont certaines parties servent à préparer des colorants et des teintures.

10.3.1.2. Bénéficiaire(s) et avantage(s) dérivés

La société est le principal bénéficiaire de ces plantes (des molécules qu'elles synthétisent et de leurs propriétés), que ce soit pour la santé humaine, les caractéristiques organoleptiques des aliments (plantes aromatiques, condiments, épices), ou l'ornementation (récolte de fleurs et autres plantes décoratives).

L'agriculteur peut également être bénéficiaire des effets positifs de ces plantes sur la santé animale (métabolites secondaires). Cet usage présente aussi des intérêts pour la société, leur substitution à certains médicaments vétérinaires constituant un avantage en termes de qualité de l'environnement et de santé humaine.

10.3.1.3. Déterminants biophysiques clefs

Les déterminants biophysiques de la présence et de la dominance des plantes sauvages sont de trois grands types (Grime, 2006) :

- Le pool régional d'espèces qui détermine la probabilité de présence des espèces ;
- Les conditions de milieu, les diverses plantes ayant des préférences écologiques variées (optimum et amplitude écologique) vis-à-vis des facteurs du milieu (température, eau, lumière, niveau trophique) ;
- Les effets possibles des interactions entre ces plantes sauvages et d'autres plantes ou d'autres organismes vivants. Entre plantes, et dans les systèmes agricoles, il existe souvent une concurrence entre graminées (*Poaceae*) et autre familles botaniques. Les graminées présentent un intérêt moindre en termes de propriétés médicinales, culinaires, aromatiques ou ornementales. Les graminées sont par contre favorisées par l'intensification des prairies (chargement, précocité d'exploitation, fertilisation) (Michaud et al., 2011 ; Plantureux et al., 1987) ou la gestion des bandes enherbées de bordures de champ, des inter-rangs en viticulture et arboriculture et des jachères (Chmolowska et al., 2016). Au titre des interactions avec les autres organismes, nombre de métabolites secondaires sont pour les plantes des moyens de défense contre des attaques d'insectes

ou de maladies (Bennet et al., 1994). La biodiversité qui accompagne les plantes sauvages peut ainsi accroître la teneur en métabolites qui sont à l'origine de leur intérêt pour l'homme et la santé animale.

10.3.1.4. Facteurs exogènes clefs

Dans les parcelles cultivées (grandes cultures, vigne, arboriculture), le SE est lié à la présence de plantes sauvages dites « adventices » ou « mauvaises herbes ». Les pratiques de désherbage (chimique, mécanique, thermique) sont donc défavorables au SE et pourrait l'être tout particulièrement pour les espèces en faible abondance qui ne sont pas les plus nuisibles, et constituent donc la cible principale des traitements phytosanitaires (Gaba et al., 2016). En vue de diminuer la pression exercée par les pesticides, certains systèmes de cultures acceptent la coexistence de la culture de rente avec une flore adventice, si celle-ci n'entraîne pas de concurrence trop importante.

Dans tous les espaces agricoles (prairies et cultures), l'augmentation du niveau de fertilité minérale du sol (influencé par la fertilisation mais aussi par les caractéristiques du sol et du climat) peut soit faire disparaître les espèces, soit modifier la composition des communautés végétales (Janssens et al., 1998). Chez les plantes, elle favorise généralement la production de métabolites primaires (plus intéressants pour la production et la valeur énergétique et protéique), au détriment des métabolites secondaires (plus intéressants pour les propriétés thérapeutiques, aromatiques mais aussi pour la toxicité) (Bourgau et al., 2011 ; Larbat et al., 2016). Les exploitations tardives des prairies, des bordures de champ et inter-rangs de vigne ou de vergers sont favorables aux plantes sauvages non graminées (Maron et al., 2011).

Dans les prairies et parcours dans lesquels se trouve la majeure partie des plantes sauvages des écosystèmes agricoles, les pressions peuvent être de trois types :

- Le retournement des prairies qui fait disparaître les habitats de ces plantes ;
- L'abandon des prairies, dont la végétation évolue, par exemple vers des friches ou milieux arborés où ne peuvent survivre les plantes d'intérêt (même si d'autres peuvent alors apparaître) ;
- L'intensification des pratiques agricoles (in Leroux, 2008). En effet, la plupart des plantes médicinales, aromatiques, culinaires ou ornementales sont des dicotylédones qui sont plus riches en métabolites secondaires que les monocotylédones (en particulier les graminées). De surcroît, ces dicotylédones sont peu compétitives pour l'acquisition des nutriments et de la lumière et face aux perturbations (défoliations) par rapport aux graminées. Ces dernières sont donc favorisées par la fertilisation, l'augmentation du chargement animal et la précocité d'exploitation et l'accroissement des fréquences de récolte. Quelques espèces comme les pissenlits et les orties sont au contraire favorisées par cette intensification.

10.3.2. Pistes méthodologiques pour l'évaluation biophysique du niveau de fourniture de plantes sauvages

Aucun indicateur ne permet actuellement d'évaluer de manière assez précise et à une échelle spatiale étendue le SE d'approvisionnement en plantes sauvages à d'autres fins que les fourrages. Pour les prairies, les initiatives récentes d'évaluation des SE rendus par ces surfaces ne prennent pas en compte les SE liés à la valeur médicinale, aromatique, culinaire ou ornementale (Plantureux et al., 2016).

Au-delà de l'inventaire des plantes et des SE, une quantification précise des SE rendus par ces plantes est difficilement envisageable sur de grandes étendues pour plusieurs raisons :

- La multiplicité des plantes et des applications ;
- Les surfaces concernées, parfois extrêmement faibles au regard de la SAU française ;
- Le caractère non-officiel (hors circuits commerciaux, sans réglementation précise...) de la plupart des usages ;
- La difficulté à mesurer la plus-value réelle (ex. pour une plante exhausteur du goût d'un plat ou d'une plante utilisé en traitement homéopathique ou allopathique d'un animal ou d'un humain) ;

- Le fait qu'une grande partie des usages constituent une option pour le futur (ex : plantes contenant des métabolites dont l'usage est encore inconnu) ;
- Les approches actuelles d'évaluation nécessitent une connaissance botanique spécialisée et/ou des analyses biochimiques souvent coûteuses ;
- une connaissance encore très fragmentaire, même si il existe de très nombreuses études sur des cas particuliers (une plante, un usage, une région du monde, ...). En outre, force est de constater que ces usages ont été plus étudiés dans des pays en voie de développement de l'hémisphère sud que dans les situations tempérées et notamment en France.

Des sites comme <http://www.pfaf.org> recensent désormais les plantes et leurs usages, mais il faudrait pouvoir croiser ces informations avec la composition des écosystèmes agricoles (prairies et cultures). C'est théoriquement possible, mais nécessiterait un effort d'échantillonnage extrêmement important.

A défaut, une manière d'approcher le SE pourrait être de considérer les surfaces de prairies, et de prendre en compte des variables d'intensification issues d'enquêtes de pratiques agricoles. Cela permettrait *a minima* d'évaluer les surfaces des écosystèmes agricoles qui peuvent potentiellement comporter des populations significatives de plantes sauvages d'intérêt.

Pour les cultures, les plantes spontanées d'intérêt sont souvent classées parmi les adventices. La pression herbicide ainsi que les pratiques de désherbage mécanique pourraient être envisagées comme des indicateurs de pression sur les populations potentielles de plantes sauvages des écosystèmes de grandes cultures et de cultures pérennes.

Pour les plantes sauvages présentes dans les prairies, la surface des prairies considérées comme des « semi-natural grasslands » pourrait être utilisée comme un proxy du potentiel d'approvisionnement en plantes sauvages d'intérêt pour l'homme. Le groupe d'experts de l'EGF⁴ (Peeters et al., 2014) précise que ces prairies correspondent aux :

Low-yielding permanent grasslands, dominated by indigenous, naturally occurring grass communities, other herbaceous species and, in some cases, shrubs and/or trees. These mown and/or grazed ecosystems have not been substantially modified by fertilisation, liming, drainage, soil cultivation, herbicide use, introduction of exotic species and (over-)sowing. The occurrence of natural grasslands is not related to human activities, contrary to the latter.

Les avancées méthodologiques nécessaires pour progresser dans l'estimation des services associés aux plantes sauvages (autres que des fourrages) sont multiples et de nature variée :

- Compte tenu de la variété des plantes concernées et des molécules qu'elles contiennent, il n'est pas envisageable de progresser rapidement par des méthodes « classiques » d'études plante par plante ou molécule par molécule. Des approches « haut débit » de reconnaissance des espèces par « barcoding » (Cowan *et al.*, 2006 ; Vijayan *et al.*, 2010; de Vere *et al.*, 2015) et de screening des molécules pourraient être développées (HPLC-DAD-MS (Silva *et al.*, 2005), RMN (Aberham *et al.*, 2010)).
- Une autre voie de recherche est celle de l'élaboration de méthodes d'analyse « globales » évitant la reconnaissance taxonomique qui nécessite de la compétence et du temps. Il peut s'agir d'analyses chimiques (Ex : potentiel antioxydant (Dudonne *et al.*, 2009, Kraujalis *et al.*, 2013)), ou même utilisant de la télédétection. Il faudra ensuite être capable de relier ces indicateurs aux effets escomptés (santé animale, valeur aromatique...).
- Sur le plan statistique, les classements actuels des prairies sont extrêmement simplistes (permanente/temporaire/parcours ou productive/pauvre productive), ne permettant pas d'estimer la composition de ces prairies. A l'intérieur des prairies permanentes, il existe une très grande diversité qui détermine la présence ou non de plantes d'intérêt non fourragères. Une voie possible consisterait à mieux préciser dans les enquêtes statistiques les modes de gestion des prairies, à développer des cartographies de sols à des échelles assez fines (au minimum pour discriminer les sols des parcelles ou des îlots), et à utiliser pour prédire la composition de prairies les typologies (agronomiques et phytosociologiques). Cette démarche permettrait d'estimer un potentiel de présence d'espèces sauvages d'intérêt. Pour évaluer plus précisément la probabilité de présence de ces espèces, des études sur les relations milieu-pratiques-présence et dominance des espèces sont nécessaires, mais elles sont beaucoup plus lourdes à conduire.

⁴ European Grassland Federation : Groupe européen de réflexion sur la définition des prairies semi-naturelles

10.4. Production de biens animaux

10.4.1. Spécification biophysique

Expert coordinateur : Magali Jouven

Contributeurs scientifiques : Thierry Bonaudo, Marie-Odile Nozières-Petit

Dans EFESE-écosystèmes agricoles, les animaux d'élevage sont partie prenante de l'écosystème agricole. En consommant des ressources végétales et en restituant des déjections, les animaux (herbivores et monogastriques) jouent un rôle majeur dans les flux de matière et d'énergie de l'écosystème agricole. Par leur métabolisme, les animaux produisent également des formes plus labiles de carbone et d'azote. Citons notamment le dioxyde de carbone issu de la respiration et le méthane issu des fermentations dans le tractus digestif des herbivores, en particulier chez les ruminants. Les surfaces utilisées pour l'alimentation du bétail sont à prendre en compte avec les animaux, puisqu'elles permettent notamment de capter et fixer le carbone atmosphérique par la photosynthèse, surtout dans le cas des couverts permanents (prairies, parcours).

L'importance de l'élevage dans le fonctionnement de l'écosystème agricole et pour la production des biens animaux est résumée par les points suivants :

1. L'élevage de ruminants et de monogastriques permet de recycler des coproduits de l'industrie (Ertl et al. 2016). L'élevage de ruminants permet de valoriser des espaces et des ressources spécifiques non exploitables autrement, avec une diversité d'espèces animales choisies en fonction du contexte local. L'élevage est la première utilisation des sols en France avec environ 60% de la SAU destinée à l'alimentation animale (12,7 M ha de prairies, 1,7 M ha de fourrages issus de plantes annuelles et 1.5 M ha de céréales; Agreste, 2015). De par son impact sur l'utilisation des terres, l'élevage peut aussi rentrer en concurrence avec l'alimentation humaine (van Zanten et al. 2016 ; Röös et al. 2016). En France, on estime que les animaux consomment 19,8 millions de tonnes de céréales, dont 98,5% produits en France, contre 7,4 millions de tonnes pour la consommation humaine. La part consommée par les animaux correspond à 20% (7,1 millions de t) de la production française de blé tendre, et 36,7% (5,7 millions de tonnes) de la production de maïs grain (Agreste, Bilans d'Approvisionnement¹). Sans une prise en compte de l'élevage, et notamment des ruminants, de vastes surfaces de végétation spontanée apparaîtraient comme inutilisées, alors qu'elles contribuent à la fourniture de biens animaux. Certaines de ces surfaces (bois pâturés, parcours secs), du fait de leur utilisation parfois peu formalisée (accords verbaux) et très saisonnée (quelques semaines dans l'année) restent cependant difficiles à recenser avec précision. Les écosystèmes basés sur les végétations spontanées, issus d'une coévolution entre animaux d'élevage et populations végétales, rendent un grand nombre de services écosystémiques (Crouzat et al. 2015).
2. La présence d'animaux et les modes d'utilisation des surfaces qui leur sont dédiées (pâturage ou récolte et distribution, mode de conduite du pâturage, gestion des déjections et des épandages) sont susceptibles de modifier les processus de nombreux services écosystémiques, via une répartition homogène à très hétérogène des prélèvements de biomasse et des restitutions de matières organiques (Adler et al., 2001), mais aussi le piétinement, le grattage ou le retournement du sol. L'animal devient ainsi un élément de promotion de la diversité fonctionnelle (Tichit et al., 2011, Sabatier et al., 2015 ; Bonaudo et al., 2014). La présence d'animaux au pâturage contribue à la fourniture de services culturels (Rodríguez-Ortega, et al., 2014) et socio-économiques (Ryschawy et al. in press ; Dumont et al. 2016).
3. Les systèmes de polyculture-élevage sont considérés comme des modèles de systèmes durables (Gliessman, 2006 ; Soussana et Lemaire, 2014). Cette durabilité repose sur les complémentarités entre cultures et animaux et sur les interactions directes et indirectes entre les animaux et les cultures (Schiere et al., 2002 ;

¹ La destination de la production de céréales destinées à l'alimentation animale a été déterminée à partir des Bilans d'Approvisionnement en Céréales, via une moyenne des campagnes 2009-2010 à 2012-2013 comprise. Les données sont disponibles sur le site d'Agreste (<http://agreste.agriculture.gouv.fr/donnees-de-synthese/bilans-d-approvisionnement/cereales-riz-pomme-de-terre/>).

Bonaudo et al., 2014 ; Ryschawy et al. 2017) qui permettent : 1) la valorisation d'une biomasse végétale non consommable par l'homme, 2) le maintien de la fertilité des sols et la production agricole *via* le recyclage des fèces et les transferts de fertilité, 3) l'augmentation de l'efficacité d'utilisation des ressources et des intrants grâce à la présence des animaux.

4. L'élevage représente une orientation technico-économique majeure en France, avec plus de 52% des exploitations agricoles concernées (Agreste, 2010). Les produits animaux représentent 35% de la production agricole totale en valeur, hors subventions (Lubatti & Bernaudeau 2015). La France a le plus gros cheptel bovin européen (avec 3,7 millions de vaches laitières et 4,1 millions de vaches allaitantes) ; c'est aussi le 1er producteur de viande bovine (avec 1,5 millions de tec pour la production indigène brute) et le 2ème producteur de lait (avec plus de 25 millions de t de lait collectés) de l'Union Européenne. Elle a aussi le plus gros cheptel de volailles, lui permettant d'avoir la 1ère production de viande (1,8 millions de tec) et d'œufs (0,973 millions de Tecq2 dont 0,888 Tecq d'œufs de consommation) en Europe. Enfin, la France possède 13,3 millions de têtes de porcins (4ème cheptel de l'UE), ce qui lui permet d'être le 3ème producteur en Europe avec 2,2 millions de tec (FranceAgriMer, 2015a ; chiffres 2014).
5. Les produits animaux (lait, viande, œuf) sont essentiels pour l'alimentation humaine, tant en qualité pour la fourniture d'acides aminés essentiels et de micro et macroéléments (fer, ...), qu'en quantité pour la couverture des besoins caloriques et protéiques. Pour la France, la consommation de produits carnés est de 86 kg en équivalent carcasse de viandes consommées par habitant (kgec/hab) en 2014, en recul de 3,9% par rapport à 2004. Cette consommation est légèrement supérieure à la moyenne de l'UE à 15 (qui s'élève à 83 kgec) (FranceAgriMer, 2015b). La viande de monogastriques représente 68% de la consommation française (33 kgec/an/hab de viande de porc et 26 kgec/an/hab de volailles). La viande de ruminants représente 32% de la consommation (24 kgec/an/hab de viande bovine et 3 kgec/an/hab de viande ovine). En termes de volumes totaux consommés par pays, la France est le 1^{er} consommateur européen de viande bovine (1541 tec), le 2^{ème} consommateur de volailles (poulet, canard, dinde et pintade ; 1747 tec) et de viande ovine (200tec) et le 4^{ème} consommateur de porc (2141 tec) (FranceAgriMer, 2015b). La consommation d'œufs est importante avec 230 œufs/an/hab. (soit 14 kg/an/hab. en 2013) (FranceAgriMer, 2015c). La consommation est de 58,5 litres de lait, 25,6 kg de fromages et 7,8 kg de beurre (FranceAgriMer, 2013).

En France, on observe quatre catégories d'élevage, définies par la présence (ou pas) dans l'exploitation de surfaces consacrées à l'alimentation du bétail, les caractéristiques de ces surfaces et le mode d'interaction principal entre les animaux et les surfaces :

- *L'élevage conduit en bâtiment, avec peu ou pas de surfaces associées.* Il s'agit majoritairement d'exploitations élevant des monogastriques (porcs, volailles). La majorité de l'alimentation est achetée à des fabricants d'aliment du bétail qui produisent des rations spécifiques à chaque catégorie d'animaux (aliment reproducteur, juvénile, croissance, finition,...). Ces rations mélangent plusieurs matières premières produites pour partie ou en totalité localement (dans le département ou la petite région agricole). **Les interactions entre les animaux et les surfaces sont principalement indirectes.** Il est difficile pour l'élevage conduit en bâtiment de tracer la provenance précise des matières premières végétales de l'alimentation ainsi que les surfaces d'épandage qui peuvent être plus ou moins distantes de l'exploitation. La grande majorité des élevages en bâtiment répond aux caractéristiques de l'agriculture conventionnelle intensive telle que la définit M.V. Gold (In Féret et Douguet, 2001) : taille importante des ateliers, investissements élevés, haute productivité, simplification et spécialisation des productions, recours massif aux intrants, dépendance vis-à-vis des industries d'amont et d'aval, diffusion rapide d'innovation et routine technique. Les élevages de monogastriques en bâtiment sont très concentrés dans la région Ouest de la France : la Bretagne concentre 44% du cheptel national de poules pondeuses et 30% des poulets de chair (Agreste, 2013), ainsi que 57% du cheptel de porcs. L'élevage en bâtiment concerne aussi quelques exploitations spécialisées en caprin lait du grand-ouest et en ovin lait du sud et sud-ouest (moins de 5%, Institut de l'Élevage 2013).
- *La polyculture-élevage associant des animaux d'élevage et des surfaces cultivées* (lesquelles fournissent tout ou partie de l'alimentation animale, mais aussi souvent des produits végétaux destinés à la vente). Il s'agit

² <http://www.franceagrimer.fr/Stockage-FAQ/Viandes-Que-signifie-T.E.C.O.Q-ou-T.E.O.C> - Tecq est une unité employée pour pouvoir agréger des données en poids concernant des œufs entiers et des produits à base d'œufs sous toutes leurs présentations : œufs entiers sans coquille, blancs seuls, jaunes seuls, séchés ou non, etc.. On applique au poids brut un coefficient propre à chaque forme du produit : 1 pour un œuf entier avec coquille par définition, 1,16 pour un œuf entier liquide sans coquille, 2,5 pour du jaune séché par exemple.

d'exploitations où les animaux (monogastriques, ruminants laitiers, ruminants à l'engraissement) sont alimentés majoritairement à partir des productions végétales issues de l'exploitation. Dans le cas des ruminants, des cultures fourragères (maïs, herbe) sont associées à des cultures céréalières et d'oléoprotéagineux. Dans le cas des monogastriques (principalement porcins), les éleveurs fabriquent un aliment à la ferme en combinant des céréales autoproduites et des matières premières achetées à des fabricants d'aliment du bétail ou à des négociants. Dans ce type d'élevage, les **interactions entre les animaux et les surfaces peuvent être « directes »** (animaux prélevant de la biomasse végétale directement sur les surfaces et la restituant localement sous forme de déjections) **ou « indirectes »** (animaux alimentés en bâtiment à partir de la biomasse végétale récoltée sur place ; déjections stockées puis épandues sur les cultures de l'exploitation).

- *L'élevage d'herbivores basé sur le pâturage de surfaces intensifiées* (prairies cultivées, prairies permanentes fertilisées). Il s'agit majoritairement d'élevages de ruminants en zone de plaine ou de basse altitude. **Durant la saison de pâturage** (pouvant durer quelques mois à toute l'année), **les interactions entre animaux et surfaces sont « directes »** : l'animal prélève lui-même la nourriture et dépose ses déjections, le tout simultanément dans le temps. Souvent, sur les surfaces de pâturage intensifiées, la biomasse disponible est utilisée de manière « complète », c'est-à-dire avec peu de refus (ou avec fauche des refus). En-dehors de la saison de pâturage, et parfois en complément du pâturage, des fourrages produits sur place sont distribués. Des achats d'aliment produits hors de l'exploitation (concentrés, paille, foin) sont également réalisés.
- *L'élevage d'herbivores basé sur des surfaces de végétation spontanée peu intensifiées*. Il s'agit souvent d'élevages de ruminants en zone de montagne ou bien d'élevages pastoraux sur parcours secs en régions périméditerranéennes. Les milieux utilisés sont souvent associés à de forts enjeux environnementaux et au multi-usage des terres (agriculture et chasse ou tourisme par exemple). La faible productivité des surfaces implique une forte emprise spatiale : jusqu'à plusieurs centaines d'hectares pour une seule exploitation. La pratique de la transhumance estivale ou hivernale peut étendre le territoire utilisé à plusieurs départements, parfois non limitrophes. L'étendue des surfaces pastorales réellement utilisées par les troupeaux est souvent difficile à établir avec précision. Sur les surfaces utilisées, toute la production de biomasse végétale (herbe, arbustes) n'est pas consommée : d'une part, la végétation peut être utilisée à un stade mûr, après avoir subi des pertes par sénescence ; d'autre part, les animaux sont souvent laissés libres de se constituer une ration adaptée à leurs besoins en triant au sein de la biomasse disponible (Jouven et al., 2010). Dans ces élevages, **les animaux interagissent directement avec les surfaces végétales** ; leur comportement spatial conduit à une répartition inégale dans l'espace des prélèvements de biomasse et des déjections. Les conditions difficiles du milieu peuvent imposer plusieurs mois d'alimentation en bâtiment et induire ainsi des relations « indirectes » entre les animaux et les surfaces.

En conclusion : 1) l'élevage est susceptible de mobiliser des ressources végétales très différentes en fonction de l'espèce animale, mais aussi du type de bien animal produit et du contexte pédoclimatique ; 2) s'il est possible de différencier des catégories d'élevage en fonction du type de surfaces présentes sur l'exploitation et utilisées pour l'alimentation animale, il subsiste une grande diversité au sein de chaque catégorie, notamment en termes de part de l'alimentation produite sur la ferme et de part des relations « directes » et « indirectes » entre les animaux et les surfaces. Les ressources végétales potentiellement disponibles ne sont souvent pas entièrement consommées par l'élevage. L'efficacité alimentaire³ des animaux est très variable selon les ressources végétales (céréales, oléo-protéagineux, pâturages, foin, pailles, tourteaux, pulpes, ...), les espèces animales (e.g. ruminants ou monogastriques) et les systèmes de production (type d'infrastructure, allotement⁴ des animaux, ...). Enfin, la mobilité des animaux est une des caractéristiques majeures de l'élevage, induisant souvent une dissociation spatiale entre le lieu de prélèvement de leur alimentation, le lieu de stationnement du cheptel, et le lieu d'épandage de leurs déjections. Une conséquence majeure est qu'**il n'est pas possible d'estimer les consommations et productions animales en appliquant un simple coefficient de transformation aux productions végétales.**

³ L'efficacité alimentaire est un indicateur qui évalue la capacité des animaux à transformer des aliments (végétaux) en produits (lait et viande). Elle s'exprime en unité de produit par unité d'aliment consommé.

⁴ Technique d'élevage regroupant par lot le bétail suivant certains critères dans un but d'améliorer la qualité ou le rendement.

10.4.1.1. Dénomination précise et nature des biens animaux

Quatre biens animaux principaux sont considérés dans le cadre d'EFESE-écosystèmes agricoles, fréquemment produits simultanément dans les exploitations. Pour les ruminants, il s'agit du lait, de la viande et des animaux d'élevage⁵. Pour les monogastriques, il s'agit des œufs, de différentes viandes et d'animaux d'élevage (Tableau 10-4-1).

Le lait

Il s'agit d'un produit de sécrétion, périssable, subissant souvent une transformation avant d'être consommé par l'Homme. A l'échelle nationale, une très faible part est transformée sur l'exploitation et/ou vendue en vente directe. Le lait de vache représente 98% de la collecte totale de lait. La transformation du lait donne divers produits (fromages, beurre, crème, poudre de lait, ...) et sous-produits (lactosérum...), ces derniers étant en partie réutilisés pour l'alimentation animale (principalement pour les porcs et les veaux). Les produits laitiers peuvent comporter une démarcation : marque ou SIQO (Signes d'Identification de la Qualité et de l'Origine). En France, on compte par exemple 31 Appellations d'Origine Contrôlée (AOC) pour des fromages de lait de vache (représentant environ 10% de la collecte de lait), 14 en lait de chèvre (représentant environ 12% de la collecte de lait) et 3 en lait de brebis (représentant plus de 40% de la collecte de lait) (INAO, 2014a).

La viande

La viande est un produit d'accrétion, c'est-à-dire qui se dépose au fur et à mesure de la croissance d'un animal. Il s'agit des muscles attachés aux os avec le gras qui y adhère; le sang ou des abats peuvent également être valorisés pour l'alimentation humaine, bien qu'ils ne rentrent pas dans l'appellation « viande ». La viande constitue en fonction du type d'animal (espèce, race, âge) de 35% à 70% du poids de carcasse, avec des rendements plus élevés pour les monogastriques. Les viandes sont riches en eau (65 à 75%), protéines (17 à 30%, 19% en moyenne), sels minéraux, phosphore, fer, zinc, vitamine B et pauvres en calcium, en lipides (10% pour les viandes maigres, 20 à 30% pour les viandes grasses) et en glucides (Meyer, 2016). La viande est issue soit d'un animal de boucherie c'est à dire spécifiquement élevé pour sa chair, soit d'animaux de réforme, pour lesquels la viande est un coproduit d'une autre production principale (jeunes animaux de boucherie, lait, œufs, rarement laine...). Cette catégorie regroupe les bovins, ovins, caprins destinés à être abattus, les volailles et les porcs.

Pour les bovins, on retrouve cinq catégories d'animaux abattus pour la production de viande : les veaux (5-8 mois), les jeunes bovins (mâles âgés de 12 à 18 mois), les génisses (femelles entre 12 et 30 mois), les bœufs (mâles castrés de plus de 24 mois) et les vaches de réforme (femelles adultes réformées, engraisées ou non). Pour les petits ruminants, le principal produit est l'agneau (jeune âgé de 3 à 6 mois) ; on trouve également des brebis et chèvres de réforme et, dans le sud de la France, des agneaux plus âgés (tardons, moutons ; >6mois) et de jeunes agneaux ou chevreaux de lait (1-2 mois). L'ensemble de ces catégories d'animaux peuvent provenir d'exploitations spécialisées dans la production de viande (naisseurs-engraisseurs ou engraisseurs spécialisés) ou de lait, dans les quatre catégories d'élevage décrites en préambule. Les produits viande peuvent comporter une démarcation. En France, on compte pour les viandes bovines et ovines : 40 Labels Rouges, 18 Indications d'Origine Protégée (IGP) et 7 AOC, certains produits cumulant plusieurs dénominations (IGP et Label Rouge) (INAO, 2014b). Au total, les SIQO concernent un peu plus de 3% des abattages pour les gros bovins, 5% pour le veau et plus de 16% pour les agneaux (INAO, 2014b).

Pour la viande de porc, il convient de distinguer la viande fraîche de porc qui représente environ 23% de la consommation et les produits transformés (charcuteries fraîches, sèches, cuites, crues et plats préparés) qui représentent 77% de la consommation et sont élaborés en grande majorité par l'industrie agro-alimentaire (93% ; FranceAgriMer, 2013). Le modèle d'élevage naisseur-engraisseur, réalisant toutes les étapes nécessaires à la production d'un porc destiné à l'abattage (reproduction, élevage des porcelets et engraissement des porcs charcutiers) au sein d'une structure familiale est dominant, et représente 85% du cheptel des truies (Roguet et al., 2015). L'élevage porcin est principalement conventionnel, en bâtiment ; la production biologique est une niche, qui représente 0,8% de la production porcine française en 2013 (Calvar, 2015). La viande de porc est majoritairement issue d'animaux jeunes abattus vers 6 mois ; compte tenu de la prolificité élevée de l'espèce,

⁵ Un animal d'élevage est un animal vendu en vif à un autre éleveur pour être engraisé (ex. broutard, porcelet) ou devenir un animal producteur (ex. génisse amouillante) ou reproducteur (ex. taureau, verrat).

les femelles de réforme représentent une très faible part des abattages (3% de truies et verrats de réforme d'après la Statistique Agricole Annuelle 2010 à 2012). En France, on dénombre 17 Labels Rouge et 7 IGP en viande porcine, et au total 53 SIQO pour les charcuteries et salaisons (environ 3% des volumes produits, pour chacun ; INAO, 2015).

Pour la volaille, on retrouve une forte diversité de produits : les poulets de chair (58,5% des abattages) et les dindes (22%, des abattages) sont les principales espèces élevées, auxquelles il faut ajouter les canards (14%), les pintades (2%) et 3,5% d'autres espèces minoritaires (cailles, pigeons, ...). Le plus souvent, l'élevage avicole (pour les œufs ou la chair) est en bâtiment et dit « intégré » car l'éleveur, propriétaire des bâtiments et des animaux, reçoit les poussins et les aliments de son intégrateur, entreprise qui rachète les animaux finis à un prix de reprise convenu à l'avance. En plus d'une diversité d'espèces, les filières avicoles ont développé une diversité de segments de marché, avec des productions standards (lourd, léger) et une multitude de SIQO (Inra, 2015). Ces derniers représentent 11,2% des volumes en termes de part de la production commercialisée (INAO, 2015). A ces produits provenant des exploitations spécialisées dans la production de viande, il faut ajouter les animaux de réforme c'est à dire le troupeau géniteur des poussins, les pondeuses d'œuf à couver et les poules pondeuses d'œufs de consommation.

Les œufs

Les œufs sont les produits de la ponte des oiseaux. Des souches de poules (*Gallus gallus domesticus*) ont été sélectionnées spécifiquement pour la production d'œufs : les poules pondeuses. Les œufs de poule pèsent entre 55 et 75 g. Les œufs peuvent être commercialisés sous la forme d'œuf « coquille » ou bien d'ovoproduits destinés à l'industrie et à la restauration hors domicile. En France, plus de 40% de la consommation d'œufs se fait sous forme d'ovo-produits (FranceAgriMer, 2015c). Les différentes étapes de la production d'œufs se déroulent généralement dans des élevages différents : les éleveurs sélectionneurs fournissent des souches de poules pondeuses spécialisées, les accouveurs font éclore les œufs fécondés pour produire des poussins d'un jour ; viennent ensuite les éleveurs de poulettes prêtes à pondre, puis enfin les éleveurs de poules pondeuses qui produisent des œufs de consommation. Les élevages sont conduits en bâtiment, avec 69% des poules pondeuses élevées en cage et 31% en systèmes alternatifs (Plein air 13%, Bio 7%, au sol 6%, label rouge 5%) (Itavi, 2016).

Les animaux d'élevage

Les animaux d'élevage sont des animaux jeunes en croissance, pas encore considérés « dans leur phase de production ». Plus spécifiquement en tant que bien animal, un animal d'élevage est un animal vendu en vif (= vivant) à un autre éleveur pour être engraisé (ex. agneau, veau, porcelet en croissance), devenir un animal producteur (ex. poulette prête à pondre) ou reproducteur (ex. agnelles, génisses, truies et dans une moindre mesure béliers, taureaux, verrats). Cette catégorie d'animaux est une catégorie importante pour plusieurs raisons. En premier lieu, elle fournit des animaux essentiels à d'autres types d'élevage. En second lieu, les animaux jeunes destinés à l'engraissement sont une production phare de l'élevage bovin allaitant français : la France exporte 1,14 millions de bovins maigres (ou bovin vif) et 0,75 millions d'ovins et caprins vifs. Ces animaux sont destinés à être engraisés et abattus en Italie (75% des exportations de bovins maigres) ou en Espagne (64% des exportations d'ovins et caprins) (FranceAgriMer, 2013). Citons en particulier la production d'agneaux de Roquefort (890 000 agneaux par an environ, soit 1/5 de la production ovine française) (Bonnet, 2013) ou les broutards du grand bassin allaitant français (FranceAgriMer, 2011). Enfin, cette production est souvent basée sur des surfaces pâturées peu intensifiées (prairies d'altitude, parcours secs ; Jouven et al., 2010) et contribue ainsi à l'entretien d'espaces naturels et à la fourniture de services écosystémiques (Rodriguez-Ortega et al., 2014).

Tableau 10-4-1. Biens animaux produits en France

Bien animal	Volume de production ^a	Effectifs d'animaux en production ^a	Type d'exploitation	Nombre en 2010 ayant un troupeau significatif ^b
Lait et produits laitiers de vache	233 108 282 hl	3 716 276 VL	Laitière bovine	75 636
de brebis	2 653 278 hl	1 324 055 BL	Laitière ovine	4 879
de chèvre	6 484 359 hl	982 177 ChL	Laitière caprine	6 894
Viande bovine (dont réformes laitières)	1 524 634 tec (411 041 tec ^c)	5 162 943 têtes abattues (1 817 703 têtes abattues ^c)	Engraisseur gros bovins	5 151
Viande ovine (dont agneaux de boucherie)	118 710 tec	6 513 656 têtes abattues (4 794 120 têtes abattues)	Ovine viande	11 852
Viande porcine (y compris salaisons et charcuterie)	2 254 611 tec	25 346 144 têtes abattues (24 800 000 têtes abattues de porcs charcutiers)	Porcine sans herbivore	5 561
Viande de volailles (dont poulet de chair) (dont canard) (dont dinde)	1 834 557 tec (1 000 000 tec) (280 000 tec) (400 00 tec)	999 315 000 têtes abattues	Volaille sans herbivore	14 065
Œufs et ovoproduits (dt œufs à couvrir)	15 093 962 000 unités (1,86 milliards)	56 449 000 (dont 9,8 millions de poules pondeuses d'œufs à couvrir)		
Animaux d'élevage Broutards	1 100 000 têtes	4 100 000 VA	Allaitantes bovine	82 141

^a Agreste, Statistique Agricole Annuelle 2010

^b Institut de l'Élevage (2013) à partir de Agreste Recensement agricole 2010.

^c Vaches et génisses laitières de réforme et veaux laitiers de boucherie

10.4.1.2. Déterminants biophysiques clefs de la production de biens animaux

Les déterminants biophysiques de la production de biens animaux associés à la composante animale de l'écosystème sont récapitulés, par bien produit, dans le tableau 10-4-2. Quel que soit le produit, le premier déterminant est le troupeau « en production », c'est-à-dire l'effectif d'animaux qui contribue directement, via un ou plusieurs processus, à la fourniture du bien. Ensuite viennent des processus spécifiques à chaque type de produit (lactation pour le lait, ponte pour les œufs, croissance et engraissement pour la viande, croissance et reproduction pour les animaux d'élevage). Un processus commun à tous les types de biens animaux est l'ingestion/digestion des aliments, fournissant les nutriments nécessaires à la réalisation des autres processus. Il convient de noter ici qu'il existe des différences parfois importantes entre espèces animales (en particulier entre ruminants et monogastriques) dans le déroulement et l'efficacité des processus cités au tableau 2.

Un autre déterminant biophysique clef de la production de biens animaux correspond aux matières premières disponibles pour l'alimentation du bétail. Celles-ci sont en grande majorité d'origine végétale (prairies et parcours, cultures fourragères, céréales, oléo-protéagineux, coproduits, concentrés) ; des sous-produits du lait sont également mobilisés pour certaines productions (en particulier : poudre de lait pour les veaux, sous-produits de transformations laitières pour les porcs). Ces matières premières peuvent être produites au sein de l'écosystème agricole hébergeant les animaux, ou sont produites dans un autre écosystème. Ces matières premières sont utilisées en l'état ou transformées par une firme d'aliments du bétail (aliments transformés mélangeant différentes matières premières végétales ainsi que des oligo-éléments, de vitamines et de minéraux).

Tableau 10-4-2. Déterminants biophysiques associés à la composante animale de l'écosystème, pour les différents biens animaux

Biens animaux	Déterminants biophysiques
Le lait	<ul style="list-style-type: none"> - effectifs de femelles laitières, c'est-à-dire destinées à être mises à la reproduction puis à rentrer en lactation et être traitées - processus de reproduction (nécessaire au déclenchement de la lactation) puis de lactation (avec une durée modulable selon les espèces et les modes de conduite) - processus d'ingestion / digestion des aliments.
Les Œufs	<ul style="list-style-type: none"> - effectifs de femelles destinées à la ponte - processus de ponte - processus d'ingestion / digestion des aliments
La Viande	<ul style="list-style-type: none"> - effectifs d'animaux destinés à l'abattage (jeunes ou femelles de réforme). Ces animaux peuvent être produits par le même écosystème agricole (cas des élevages « naisseurs-engraisseurs »), ou par un autre écosystème - processus de croissance et d'engraissement - processus d'ingestion / digestion des aliments
Les animaux d'élevage	<ul style="list-style-type: none"> - <i>effectifs d'animaux</i> mâles ou femelles mis à la reproduction. - processus de croissance des reproducteurs jusqu'à leur maturité sexuelle - processus de reproduction (chaleur, fécondation, mise bas, allaitement pour les mammifères et fécondation, incubation, éclosion pour les oiseaux) - processus d'ingestion et digestion des aliments

10.4.1.3. Facteurs exogènes clefs de la production de biens animaux

La production de biens animaux dépend du nombre d'animaux en production, de la disponibilité en ressources alimentaires (type, quantité, qualité) localement produites ou achetées, des processus d'ingestion/digestion des aliments par les animaux d'élevage ainsi que de processus spécifiques relatifs à l'animal et spécifiques à chaque type de bien. Les déterminants « nombre d'animaux en production » et « ressources alimentaires » dépendent avant tout de choix stratégiques de structuration de la ferme par l'éleveur, qui eux-mêmes peuvent être contraints par le milieu pédoclimatique local et les débouchés accessibles pour les produits.

Facteurs exogènes anthropiques (conduite)

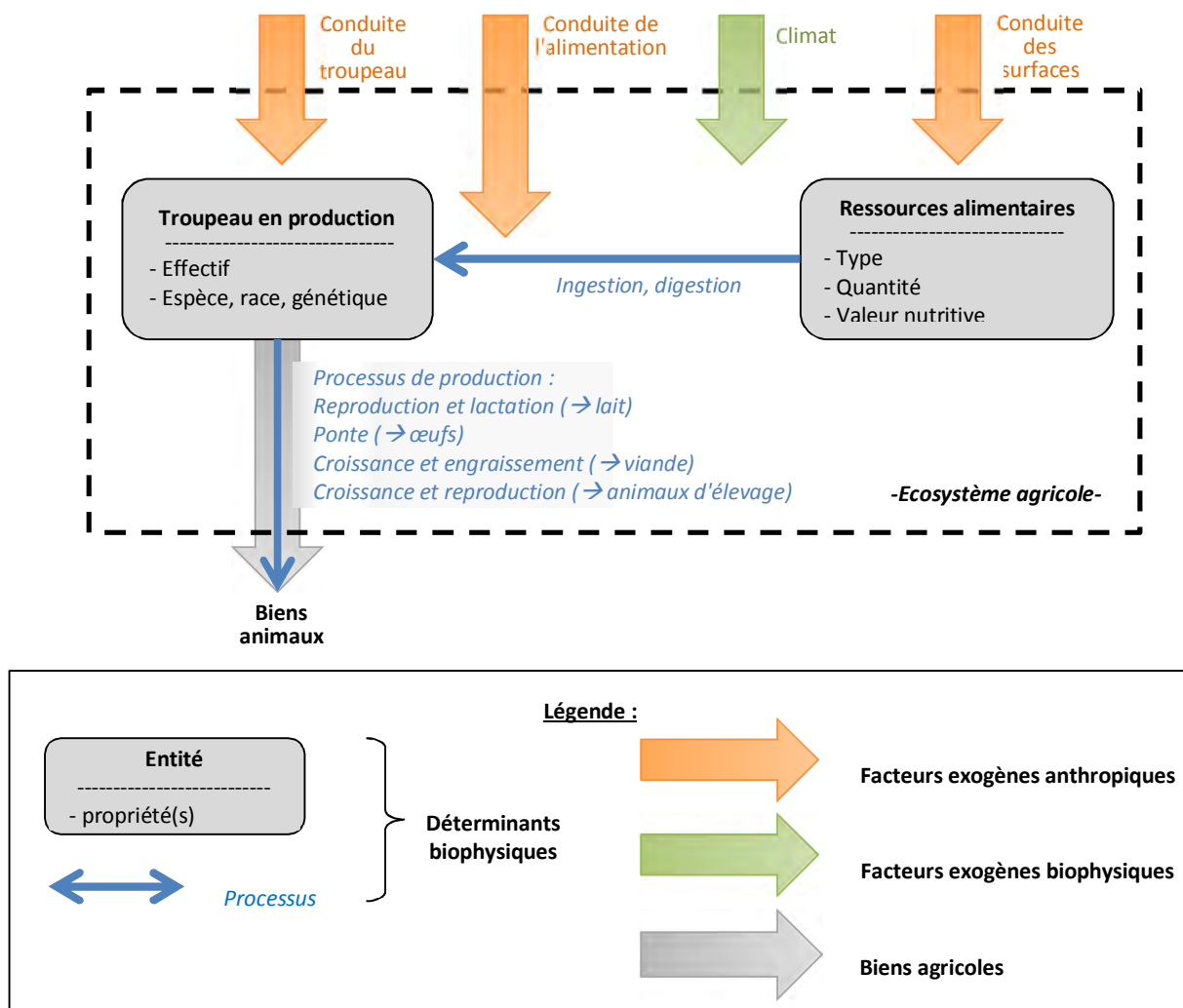
Les ressources alimentaires végétales autoproduites sont modifiées en termes de quantité et qualité par les **pratiques de conduite des surfaces**, et en particulier par la fertilisation, les stades de récolte et les modes de conservation (voir par ex. pour les fourrages : Baumont et al., 2009). Les processus d'ingestion et digestion des aliments par les animaux sont largement influencés par les caractéristiques des aliments à disposition, et donc par les **pratiques de conduite de l'alimentation**. Chez les ruminants, la fibrosité du régime et l'équilibre de la ration modifient le flux digestif et avec lui les quantités ingérées. Les modalités d'alimentation (nombre de distributions d'aliments, mode de conduite du pâturage, complémentation au pâturage) ont un impact sur les quantités ingérées (en particulier via la motivation à ingérer) dans tous les types d'élevage, et sur les choix alimentaires pour les troupeaux au pâturage (Baumont et al., 2000). Le taux de couverture des besoins alimentaires, en interaction avec les caractéristiques génétiques de l'animal, va déterminer le niveau de réalisation des processus de production (Blanc et al., 2006). Parmi les **pratiques de conduite du troupeau**, les pratiques de reproduction et de renouvellement (choix des géniteurs, accouplements raisonnés), via leur impact sur le profil génétique du troupeau, ainsi que les pratiques d'allotement (création de groupes d'animaux, fréquence des remaniements de groupes), via leur impact sur les interactions sociales et le stress des animaux, sont susceptibles de modifier les processus de production (Blanc et al., 2006). Les pratiques sanitaires, en interaction avec les autres pratiques de conduite du troupeau, permettent de maintenir un troupeau sain, condition nécessaire à la bonne réalisation des processus d'ingestion/digestion et des processus de production. En effet, des problèmes sanitaires sur le troupeau peuvent réduire la production directement en cas de non commercialisation des produits, ou indirectement en cas de diminution de la fertilité des reproducteurs ou de baisse de performances de croissance des jeunes.

Facteurs exogènes non anthropiques

Cette deuxième catégorie de facteurs regroupe en particulier les **conditions climatiques** qui influencent les processus à l’œuvre dans les composantes animale et végétale de l’écosystème. La croissance des végétaux est largement déterminée par le régime hydrique et les températures, en interaction avec les caractéristiques des sols et des plantes (Rötter, R. et Van de Geijn, S., 1999 ; voir aussi section 10.1). Côté troupeau, chaque espèce animale (et chaque race) a une zone de confort thermique en-dehors de laquelle les processus d’ingestion et de production sont modifiés et la production de biens animaux est réduite (Nardone et al., 2006). L’impact des conditions climatiques peut être limité par le contrôle de l’ambiance dans les bâtiments d’élevage dans le cas d’animaux conduits en bâtiment, ou par des adaptations comportementales dans le cas d’animaux conduits au pâturage (par ex. pâturage nocturne en période de forte chaleur, stationnement sous abris naturels en cas de chaleur ou d’intempéries). L’impact de la photopériode sur les processus de production des mammifères et des oiseaux domestiques est bien connu (Chemineau et al., 2009 ; Sauveur, 1996). Ces effets naturels sont parfois mimés à escient dans le cas d’élevages en bâtiment pour accélérer des processus saisonniers (par ex. lutte chez les petits ruminants) ou journaliers (par ex. ponte chez la poule).

La figure 10-4-1 fait apparaître les déterminants biophysiques et facteurs exogènes clefs de la production de biens animaux, tous biens confondus. Il est important de noter que si tous les biens mobilisent un troupeau en production et des ressources alimentaires, la nature de ces entités (types d’animaux, types d’aliments) ainsi que la nature des processus autres que l’ingestion et la digestion varient d’un type de bien à un autre. La part des ressources alimentaires issue de l’écosystème agricole hébergeant les animaux en production est moins importante pour les élevages conduits en bâtiment, que l’on retrouve fréquemment en production d’œufs, de viande (porcs et veaux) et parfois de lait (caprins notamment).

Figure 10-4-1. Schéma synthétique récapitulant les déterminants biophysiques et facteurs exogènes impliqués dans la production de biens animaux.



10.4.2. Evaluation biophysique de la production de biens animaux

Experts coordinateurs: Laurence Puillet, Muriel Tichit

Contributeurs scientifiques : Magali Jouven, Thierry Bonaudo, Thomas Poméon

Ingénierie de données : Thomas Poméon, Laurence Puillet, Joao Pedro Domingues Santos, Anne Meillet

10.4.2.1. Méthodologie et indicateurs

Dans les évaluations européennes, les indicateurs proposés pour la cartographie des services dits d'approvisionnement des écosystèmes agricoles ignorent le fait que la production agricole n'est pas un simple produit de l'écosystème, mais résulte d'une interaction entre les processus de l'écosystème et les activités anthropiques. Les différents travaux concluent sur la nécessité de calculer des indicateurs de biens animaux et végétaux en distinguant la part de la production qui relève des processus de l'écosystème et la part qui relève des intrants introduits par activités anthropiques (Maes et al., 2013, 2014, 2016).

Dans le cas des biens animaux, une part importante des intrants introduits dans l'écosystème concerne les ressources alimentaires dont l'achat représente par exemple 38 à 50% du coût des intrants pour les élevages bovins viande et lait respectivement (Teillard et al. 2012). Articuler le niveau de production de biens animaux avec le niveau de disponibilité de ressources alimentaires est un sujet pertinent aussi bien pour les sciences de l'environnement, que les sciences animales et l'économie de la production agricole. On peut ainsi identifier deux grandes approches qui ont proposé des indicateurs permettant d'articuler production animale et consommation de ressources.

La première approche, développée dans les années 70, consiste à calculer la « production autonome » (Cavailhes, 1987). Celle-ci représente la part des biens [animaux] permise par les aliments du bétail **produits localement**. Elle est basée sur la conversion en valeur monétaire des produits (= biens animaux) et de tout ou partie des intrants (*ibid*). Son calcul s'établit de la façon suivante : la production physique totale, exprimée en valeur monétaire, diminuée d'une quantité correspondant, en valeur, au coût des aliments du bétail achetés. La production autonome s'analyse généralement au niveau de l'exploitation et met l'accent sur un type d'intrants (les aliments du bétail). Les résultats dépendent des valeurs monétaires retenues pour les calculs, valeurs qui éloignent des réalités physiques de la production et qui varient dans le temps. L'indicateur d'intensité agricole développé par Teillard (2012) permet d'aborder un large spectre de coûts en intrants (fertilisants, phytosanitaires, aliments, carburant, eau, ...). Ses principaux inconvénients sont la substituabilité des intrants (un même coût total d'intrants peut être obtenu avec différents types d'intrants) et d'autre part la dépendance temporelle des résultats aux valeurs monétaires.

Une deuxième approche, développée dans les années 2000, consiste à calculer la part de la production de biens animaux indépendante des intrants (azote et eau). Cette approche passe par la conversion en azote des produits et des intrants mobilisés pour la production (Billen et al., 2014, Bonaudo et al., 2015) ou leur conversion en énergie (Dorin et al., 2010). L'azote et l'énergie sont deux facteurs essentiels de l'intensification/artificialisation des milieux agricoles et sont présents dans un large éventail d'intrants. L'approche énergétique est développée dans l'outil « planet » (Dia'terre⁶). Les biens animaux sont convertis en MJ d'énergie alimentaire (quantité de MJ contenue dans les produits lait et viande) ; les intrants mobilisés dans l'ensemble du processus de production sont convertis en énergie directe (énergie mécanique et/ou thermique utilisée avec électricité, gaz, pétrole) ou bien en énergie indirecte (énergie contenue dans les aliments du bétail). On en déduit l'énergie nécessaire à la production d'un MJ de biens animaux. La même logique peut être utilisée en prenant comme unité de mesure l'azote (N). L'azote est intéressant en tant que principal facteur limitant de la production agricole, en tant que constituant essentiel des protéines dont sont riches les biens animaux, et en tant qu'élément dont les pertes (par évaporation, lessivage...) ont un fort impact sur l'environnement. Comparativement à une approche monétaire, une méthode basée sur l'azote fournit des résultats stables (la teneur en azote d'un produit ne varie pas au cours du temps) mais elle ne permet pas toujours de prendre en compte la totalité des intrants. Ceci étant la principale faiblesse réside dans la disponibilité de base de données à une échelle fine pour la mise en œuvre de cette méthode.

⁶ <http://www.ademe.fr/expertises/produire-autrement/production-agricole/passer-a-l'action/dossier/evaluation-environnementale-agriculture/loutil-diaterre>

Méthode d'évaluation adoptée dans EFESE-écosystèmes agricoles

La méthode développée dans EFESE-écosystèmes agricoles s'appuie sur la notion de **production de biens animaux sur ressources propres de l'écosystème** (PA_{rp}) ; celle-ci représente la production de biens animaux permise par la production végétale locale d'un territoire donné. Cette notion met l'accent sur la dépendance des biens animaux vis-à-vis des biens végétaux et prend en compte la capacité du territoire à satisfaire la consommation alimentaire de la population animale présente sur le territoire.

La production de biens animaux sur ressources propres de l'écosystème permet d'approcher une production animale **potentielle**, c'est-à-dire une production **réalisée à partir des matières premières végétales (MPV) produites dans l'écosystème**.

Dans ce qui suit nous exposons la démarche de calcul de la production de biens animaux sur ressources propres de l'écosystème (PA_{rp}) à la résolution de la Petite Région Agricole (PRA). L'indicateur est défini pour une PRA p selon :

$$PA_{rp,p} = PA_{tot,p} \cdot \alpha_p$$

avec

- $PA_{tot,p}$ la production totale de biens animaux de la PRA p . Celle-ci agrège la production de lait et de viande (animaux abattus) issus des ruminants (bovins, ovins et caprins), la production d'animaux d'élevage issus des bovins (broutards), la production de viande (animaux abattus) et d'œufs issus des monogastriques (volailles et porcins) ;
- α_p exprime la **capacité du territoire** de la PRA p à **satisfaire la consommation de matière végétale de tous les animaux présents**. Cette capacité prend la forme d'un ratio entre l'offre végétale de la PRA et la consommation de matière végétale par les animaux présents dans la PRA. La capacité est calculée en matière sèche ($\alpha_{p,MS}$) et en matière azotée ($\alpha_{p,MAT}$) et c'est la capacité de la matière la plus limitante qui est retenue.

La variable α_p est donc calculée selon :

$$\alpha_p = \min(1, \alpha_{p,MS}, \alpha_{p,MAT})$$

La valeur de α_p est bornée à 1 car la production sur ressources propres de l'écosystème ne peut pas excéder la production physique totale. Une valeur de α_p inférieure à 1 indique que les MPV disponibles pour l'alimentation des animaux sont insuffisantes pour couvrir la consommation des animaux de la PRA et que la production de biens animaux a mobilisé des MPV issues d'autres PRA ou régions du globe.

La figure 10-4-2 illustre la conceptualisation des étapes pour la mise en œuvre de l'évaluation de la fourniture de biens animaux. Les surfaces végétales de la PRA produisent une offre de MPV au champ à partir de laquelle se construit un disponible de MPV pour l'alimentation animale. Ce disponible pour l'alimentation animale rapporté à la consommation de MPV par les animaux de cette même PRA aboutit à la variable α_p . Celle-ci est alors utilisée pour pondérer la production totale de biens animaux. Comme le montre la figure **10-4-2** la variable α_p nécessite de comptabiliser l'ensemble des consommations de MPV des animaux ruminants et monogastriques présents au sein de la PRA, indépendamment de leurs interactions directes ou indirectes avec les surfaces végétales (voir typologie **section 10-4-1**). La PRA est considérée comme un système fermé : l'offre de MPV est strictement générée par les surfaces de la PRA.

Les surfaces végétales de l'écosystème agricole ont été regroupées pour représenter trois types de flux de MPV disponibles pour l'alimentation des animaux (figure **10-4-2**) :

- I. un flux de MPV générant des aliments concentrés (F1) ;
- II. un flux de MPV issu de la transformation par les industries sous forme de coproduits ou de tourteaux (F2) ;
- III. un flux de MPV correspondant aux fourrages (F3).

Le flux F1 agrège 16 MPV: blé tendre, blé dur, maïs grain, orge et escourgeon, seigle, avoine, méteil, triticale, sorgho, mélanges de céréales, pois protéagineux et secs, fèves et fèvesoles, lupins, colza, tournesol, soja et lin. Il est calculé en matière sèche (MS) et en matière azotée (MAT) en multipliant la production brute au champ de chaque MPV par un coefficient λ_i qui correspond à sa disponibilité pour l'alimentation animale.

Le flux F2 agrège 7 MPV issues de la transformation de cultures par l'industrie (Tableau 10-4-3). Il est calculé en MS et en MAT en multipliant la production brute au champ de chaque MPV par un coefficient γ_j qui correspond à la fois à un taux d'utilisation de la production brute au champ dans l'industrie, au rendement de transformation de la MPV et à la disponibilité du coproduit pour l'alimentation animale (calculs détaillées dans l'Annexe 10-B).

Le flux F3 correspond à 6 fourrages (prairies artificielles, prairies temporaires, prairies naturelles, surfaces peu productives toujours en herbe, maïs fourrage et autres fourrages annuels). Ces fourrages sont exprimés directement en MS / MAT et sont consommés uniquement par les ruminants.

Figure 10-4-2. Représentation schématique du concept de production de biens animaux sur ressources propres de l'écosystème (PA_{rp}) .

La PA_{rp} découle de la production totale de biens animaux (PA_{tot}) pondérée par la capacité du territoire à satisfaire la consommation en matière végétale de tous les animaux présents (α_p) où α_p est le ratio entre l'offre végétale disponible pour l'alimentation animale (MPV_{AA}) et la consommation de matière végétale par le cheptel (MPV_C) présent sur le territoire.

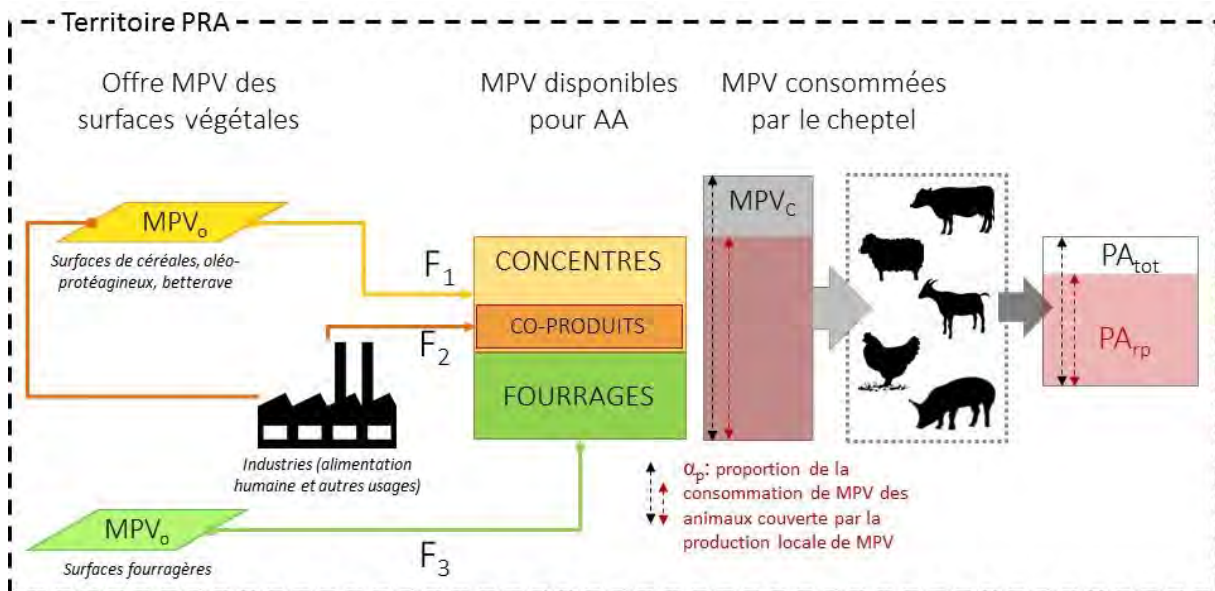


Tableau 10-4-3. Description de la composition du flux d'offre de MPV issues de la transformation par l'industrie (F_2) des quantités brutes produites par les surfaces de la PRA p

Culture	MPV
Blé tendre	Issues de meunerie
Maïs grain	Corn Gluten Feed Gluten 60
Colza	Tourteaux de colza
Tournesol	Tourteaux de tournesol
Soja	Tourteaux de soja
Betterave	Pulpes de betterave Mélasse
Prairies artificielles	Luzerne déshydratée

La formule ci-après détaille le calcul de la variable α_p en considérant les trois types de flux de MPV qui configurent le disponible pour l'alimentation animale :

$$\alpha_p = \min\left(1, \frac{\sum MPV_{o_i,p} \cdot \delta_{i,MS} + \sum MPV_{o_j,p} \cdot \gamma_{j,MS} + \sum MPV_{o_k,p} \cdot \tau_{k,MS}}{\sum MPV_{c_{l,p},MS}}, \frac{\sum MPV_{o_i,p} \cdot \delta_{i,MAT} + \sum MPV_{o_j,p} \cdot \gamma_{j,MAT} + \sum MPV_{o_k,p} \cdot \tau_{k,MAT}}{\sum MPV_{c_{l,p},MAT}}\right)$$

avec

- $MPV_{o_i,p}$ la quantité brute de MPV i produite par les surfaces végétales de la PRA p et utilisées comme aliments concentrés pour l'alimentation animale
- $MPV_{o_j,p}$ la quantité brute de MPV j produite par les surfaces végétales de la PRA p , utilisée dans l'industrie et générant des coproduits (dont les tourteaux) utilisés en alimentation animale
- $MPV_{o_k,p}$ la quantité brute de MPV k produite par les surfaces végétales de la PRA p et utilisées comme fourrages pour l'alimentation animale
- $\delta_{i,MS}$ le coefficient de conversion des quantités brutes en quantités de matière sèche (MS) de chaque MPV i qui correspond à une disponibilité de MS de la MPV i pour l'alimentation animale
- $\delta_{i,MAT}$ le coefficient de conversion des quantités brutes en quantités de matières azotées totales (MAT) de chaque MPV i qui correspond à une disponibilité de MAT de la MPV i pour l'alimentation animale
- $\gamma_{j,MS}$ le coefficient de conversion des quantités brutes en quantités de matière sèche (MS) de chaque MPV j qui est à l'origine d'un coproduit pour l'alimentation animale (Tableau 1)
- $\gamma_{j,MAT}$ le coefficient de conversion des quantités brutes en quantités de matières azotées totales (MAT) de chaque MPV j qui est à l'origine un coproduit pour l'alimentation animale (Tableau 1)
- $\tau_{k,MS}$ le coefficient de conversion des quantités brutes en quantités de matière sèche (MS) de chaque MPV k qui correspond à une disponibilité de fourrages pour l'alimentation animale. Ce coefficient est égal à 1 car les données Agreste expriment directement les productions fourragères en MS
- $\tau_{k,MAT}$ le coefficient de conversion des quantités brutes en quantités de matières azotées totales (MAT) de chaque MPV k qui correspond à une disponibilité de fourrages pour l'alimentation animale
- $MPV_{c_{l,p},MS}$ les quantités, en MS, de MPV l consommées par les animaux de la PRA p ;
- $MPV_{c_{l,p},MAT}$ les quantités, en MAT, de MPV l consommées par les animaux de la PRA p .

Sources de données mobilisées

Les indicateurs de la production totale de biens animaux (viande, animaux d'élevage, lait, œufs) pour les différentes espèces (bovins, ovins, caprins, porcins, volailles) ont été obtenus à partir des données de la Statistique Annuelle Agricole (SAA) produite par le Service de la Statistique et Prospective (SSP) du ministère de l'agriculture. Les indicateurs de production de biens animaux issus des ruminants ont fait l'objet d'un travail spécifique réalisé par C. Perrot de l'Institut de l'Élevage :

- indicateur de production de viande bovine à la résolution PRA a été élaboré à partir de SPIE⁷/BDNI, NORMABEV et Bovins Croissance ;
- indicateurs de production de lait (bovin, ovins, caprins) et de viande (ovine, caprine) à la résolution PRA ont été élaborés à partir de Agreste recensement agricole 2010 et Statistique Agricole Annuelle.

Les indicateurs de consommations alimentaires pour les espèces de ruminants ont été produits par C. Perrot de l'Institut de l'Élevage, dans le cadre du programme AUTOSYSEL « Autonomie alimentaire et protéique des systèmes d'élevage herbivore français » (2014/2017). Ces indicateurs ont été élaborés à partir des données issues du dispositif INOSYS-Réseaux d'élevage 2008, traitées par Devun *et al.* (2012), Jousseins *et al.* (2014) ; Bossis *et al.* (2015) puis extrapolées à la résolution PRA sur la base du recensement agricole 2010 (Institut de l'Élevage, 2013).

⁷ Système Professionnel d'Information d'Élevage (SPIE) constitué d'une base des données de la production bovine et des applications logicielles permettant la mise à jour et la consultation de ces données. BDNI Base de Données Nationale d'Identification Bovine qui recense l'ensemble des mouvements des bovins français sur le territoire. Normabev qui comprend les informations relatives à l'abattage des bovins.

Les indicateurs de consommations alimentaires pour les espèces de monogastriques ont été calculés à partir de la base de données du Céréopa⁸ des matières premières utilisées pour la fabrication d'aliments composés. Cette base de données, non publique, est analysée dans le cadre de la thèse de Joao Pedro Domingues-Santos qui a fourni les indicateurs de consommation de MPV des monogastriques.

Les données sur les productions végétales des surfaces cultivées sont celles produites dans la section 10.1. Les procédures de gestion du secret statistique et de désagrégation des données à la résolution PRA sont présentées dans l'annexe 10-B. Les hypothèses et données mobilisées pour le calcul des différents coefficients appliqués aux productions végétales sont également présentées dans l'annexe 10-B.

10.4.2.2. Résultats et analyse

La production de biens animaux est calculée à la résolution de la PRA. Elle est déclinée en deux indicateurs : la production totale de biens animaux et la production de biens animaux sur ressources propres de l'écosystème.

L'échantillon retenu pour l'analyse comprend 571 PRA, sélectionnées sur la base de leur orientation vers les activités d'élevage (critères détaillés dans l'Annexe 10-B).

Une typologie des PRA a été réalisée pour caractériser les différentes situations (variation spatiale) en termes de production de biens animaux sur ressources propres de l'écosystème. Pour cela, 6 variables ont été utilisées :

- la production totale de biens animaux issus des ruminants (kg protéines/ha SAU)
- la production totale de biens animaux issus des monogastriques (kg protéines/ha SAU)
- la capacité du territoire à satisfaire la consommation en matière sèche issue des fourrages
- la capacité du territoire à satisfaire la consommation en matière azotée issue des fourrages
- la capacité du territoire à satisfaire la consommation en matière sèche issue des aliments concentrés (céréales, oléoprotéagineux, tourteaux et coproduits)
- la capacité du territoire à satisfaire la consommation en matière azotée issue des aliments concentrés (céréales, oléoprotéagineux, tourteaux et coproduits)

Les indicateurs et les variables explicatives sont exprimés par hectare de SAU étant donnée la forte variabilité des superficies des PRA.

La fourniture de biens animaux est ensuite mise en relation avec :

- les déterminants biophysiques de l'écosystème : effectifs animaux et surfaces végétales
- les facteurs exogènes anthropiques, c'est-à-dire l'orientation des systèmes d'alimentation qui peut être approchée par la composition de la SAU: surfaces en céréales et oléoprotéagineux (SCOP), surface fourragère principale (SFP) avec proportion de surfaces en maïs fourrage et surfaces toujours en herbe (STH).

a) Description des indicateurs de fourniture de biens animaux : production totale et capacité des PRA à satisfaire la consommation alimentaire des animaux

La **figure 10-4-3** permet de visualiser le **niveau** des deux indicateurs de fourniture de biens animaux et leur **variation spatiale** au sein du territoire métropolitain. La production totale de biens animaux s'élève à **1.6 M T** de protéines. La capacité des PRA à satisfaire la demande alimentaire des animaux est **globalement élevée** avec une moyenne de 0.86 pour les 571 PRA analysées ; ce qui conduit à une production totale de biens animaux sur ressources propres de l'écosystème de **1.1 M T** de protéines.

Les variations de volume de production de biens animaux et les variations de capacité sont importantes entre PRA. D'une part, 70 % des PRA ont une capacité très élevée >0.78. Ces PRA ont des ressources végétales suffisantes pour couvrir au moins les ¾ de la consommation alimentaire de l'ensemble des animaux présents. Leur production de biens animaux s'élève à 0.614 MT de protéines soit 36 % de la production nationale. Près de 22 % de PRA ont une capacité modérée]0.59- 0.78] et produisent 0.457 M T de protéine soit 27 % de la

⁸ Centre d'Etude et de Recherche sur l'Economie et l'Organisation des Productions Animales

production nationale. Enfin, la capacité à satisfaire la demande alimentaire des animaux est faible pour 8 % des PRA [0.25– 0.59] dont la production de biens animaux s’élève à 0.596 M T soit 36 % de la production nationale. Ces différences de niveau de capacité des PRA ne sont pas distribuées aléatoirement sur le territoire métropolitain :

Les PRA à **capacité élevée [0.78 – 0.92]** sont localisées dans les plaines herbagères à vocation laitière (Basse Normandie, Lorraine) ainsi que dans la zone herbagère de la bordure nord du massif central à vocation allaitante. Les PRA à **capacité très élevée [0.92 – 1.00]** sont localisées dans les zones polyculture-élevage du bassin Aquitain et de la bordure Est-Sud-Ouest du bassin parisien où l’élevage est en forte régression.

Les PRA à **capacité modérée [0.59 – 0.78] voire faible [0.59 – 0.25]** sont concentrées au cœur des grands bassins de production animale: (i) l’ensemble Grand-Ouest (constitué des PRA de Bretagne, Pays de Loire et Nord-ouest du Poitou) où se combine élevage de ruminants, monogastriques et surfaces cultivées pour l’alimentation des animaux; (ii) les montagnes humides du massif central (essentiellement Auvergne) à vocation lait-viande, avec d’importantes surfaces en prairies permanentes de montagne. Les PRA à capacité modérée voire faible sont ponctuellement présentes dans le Nord-Pas de Calais, les montagnes laitières (Vosges, Franche Comté, Alpes) ainsi que la zone pastorale méditerranéenne. La mobilité des troupeaux par rapport à l’utilisation des surfaces pastorales n’est pas prise en compte dans l’étude. Par conséquent, les PRA situées dans des zones d’élevage transhumant (Var, plaine de la Crau, Pyrénées) apparaissent avec une faible capacité à satisfaire la consommation des animaux présents, car les animaux présents utilisent des surfaces végétales dans d’autres PRA pendant 3 à 4 mois de l’année. Par ailleurs, dans les zones périméditerranéennes, toutes les surfaces pastorales utilisées ne font pas l’objet d’une déclaration PAC et la ressource végétale issue de ces surfaces est souvent sous-estimée, en ne prenant en compte que la ressource herbacée alors que les troupeaux consomment aussi des feuillages de ligneux, parfois en quantité importante.

Figure 10-4-3. Cartographie de la production totale de biens animaux par département (PA_{tot}) et de la capacité à satisfaire la consommation alimentaire des animaux par PRA

La mise en classe de la capacité des PRA a été réalisée avec l’algorithme de Jenks (maximisation de la variance interclasses et minimisation de la variance intra-classes). Les zones blanches sur la carte correspondent aux PRA non retenues dans l’analyse.

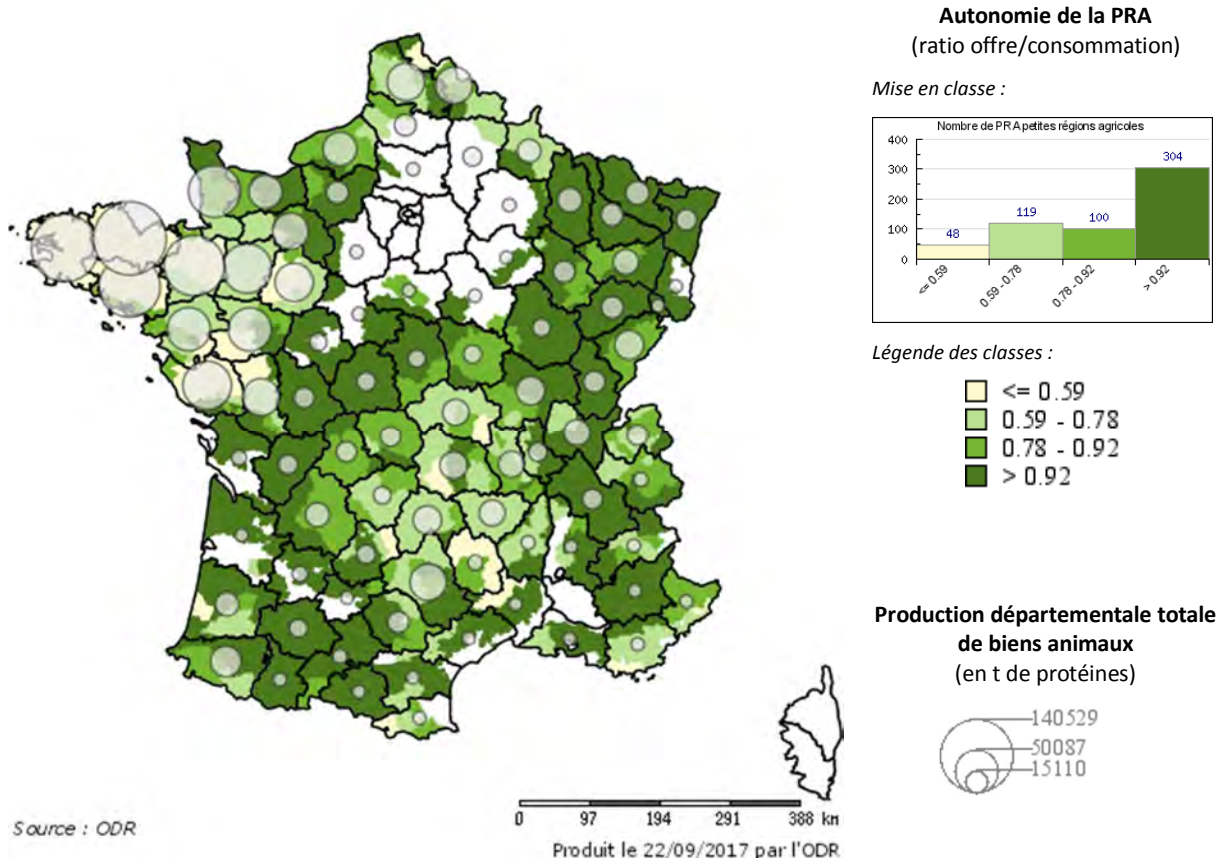


Tableau 10-4-4 Description des indicateurs de production de biens animaux (en kg protéines/ha SAU), production totale PA_{tot} et production sur ressources propres PA_{rp} , et de la capacité du territoire à satisfaire la demande alimentaire des animaux (α_p) à la résolution PRA (n=571).

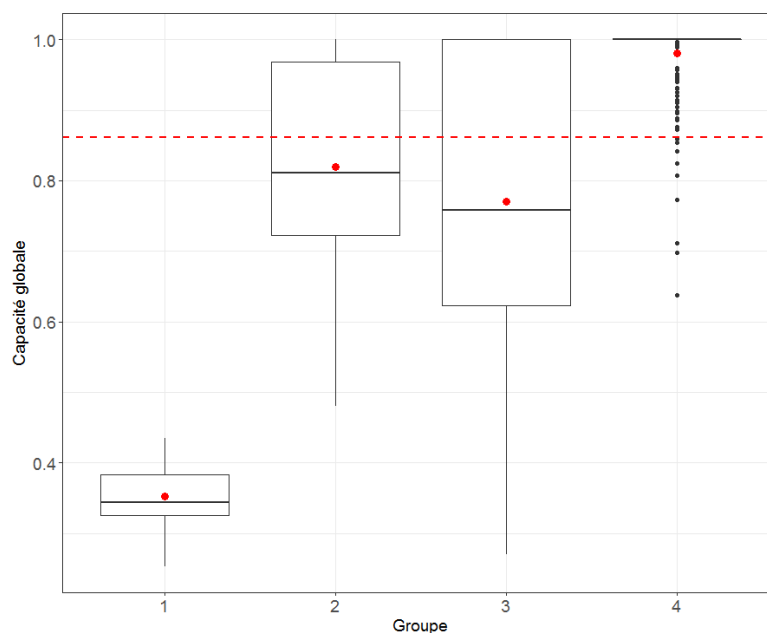
	PA_{tot}	PA_{rp}	α_p
Moyenne	60.5	45.8	0.86
Ecart-type	53.9	27.5	0.17
Médiane	48.6	44.0	0.95
Min	1.6	1.2	0.25
Max	392.3	151.6	1.00

b) Typologie des profils de production et de capacité des PRA

Une analyse multivariée combinant analyse en composante principale et classification ascendante hiérarchique (voir annexe 10-B) a permis d'identifier quatre groupes de PRA dont les caractéristiques moyennes sont présentées ci-dessous. La **Figure 10-4-4** montre que la capacité à satisfaire la consommation alimentaire des animaux est globalement très élevée pour les groupes 2-3-4 qui englobent 98% des PRA. Seul le groupe 1, soit 2% des PRA, présente une capacité globale faible (35%). Le Tableau 10-4-5 détaille la capacité en termes de fourrages et de concentrés ; il montre que pour tous les groupes c'est la capacité à satisfaire la consommation en concentré protéique qui est le facteur le plus limitant de la capacité.

Figure 10-4-4. Capacité du territoire à satisfaire la consommation de matières premières végétales des animaux présents dans les 4 groupes de PRA générés par la typologie.

La moyenne des groupes est figurée avec un point rouge et la moyenne globale des PRA est figurée avec un trait pointillé rouge.



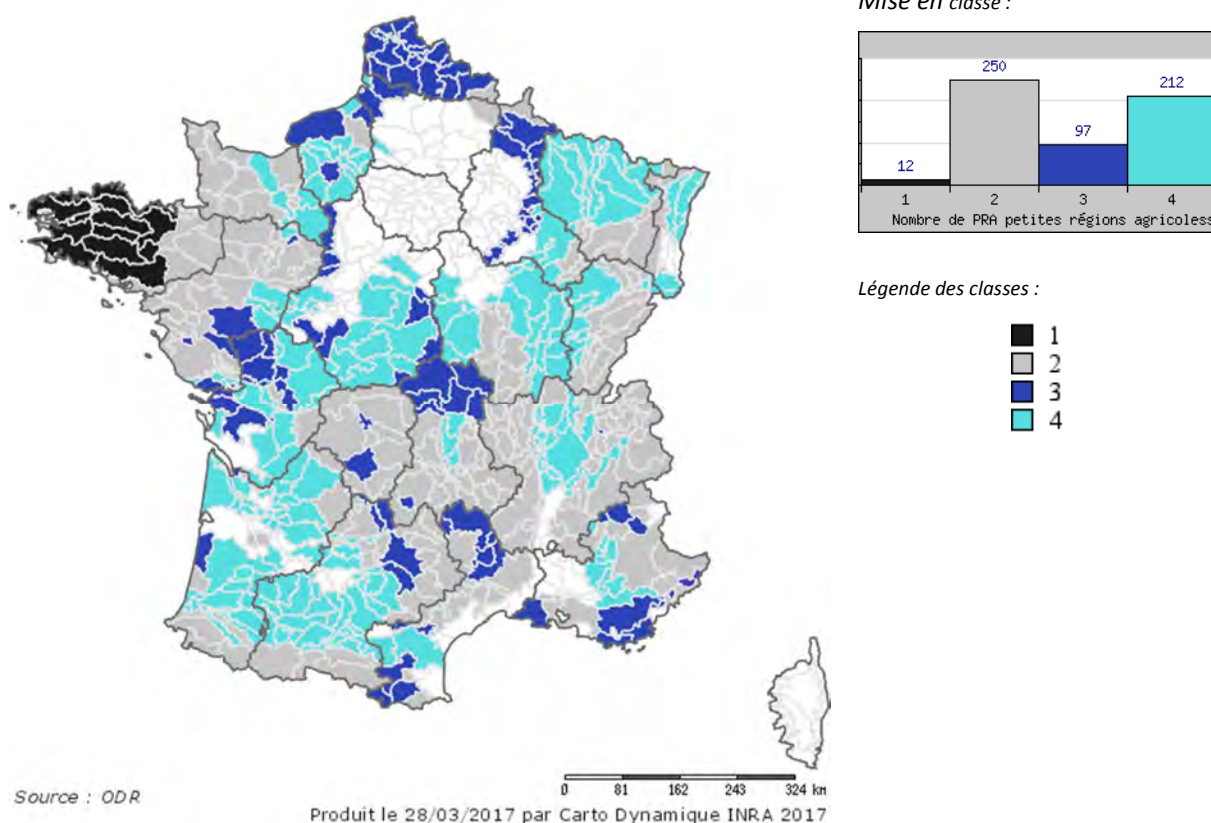
Les caractéristiques des groupes de PRA et leur répartition spatiale sont présentés sur les **figures 10-4-5** et **10-4-6**.

Tableau 10-4-5. Valeurs moyennes des variables utilisées pour la typologie des profils de PRA selon leur niveau de production et de capacité à satisfaire la consommation alimentaire des animaux présents.

Groupe	Nombre de PRA	PA _{tot} (kg de protéines / ha SAU)		Capacité à satisfaire la consommation en fourrages		Capacité à satisfaire la consommation en aliments concentrés	
		issue des ruminants	issue des monogastriques	MS	MAT	MS	MAT
1	12	114.0	189.8	1.00	1.00	0.13	0.08
2	250	56.3	14.3	1.00	0.98	0.34	0.20
3	97	39.7	15.6	0.84	0.77	0.70	0.60
4	212	26.9	10.4	1.00	0.99	1.00	0.91

Figure 10-4-5. Cartographie des types de PRA regroupées selon leur profil de niveau de production et de capacité à satisfaire la consommation alimentaire des animaux présents

Type 1 = « Une production de biens animaux très élevée mais dépendante des biens végétaux produits ailleurs que dans le territoire local » ;
 Type 2 = « Une production de biens animaux élevée et permise en particulier par les fourrages produits sur le territoire » ;
 Type 3 = « Une production de biens animaux modeste et permise en particulier par les cultures produites sur le territoire » ;
 Type 4 = « une faible production de biens animaux totalement permise par les biens végétaux produits sur le territoire ».



Le groupe 1 comprend 12 PRA qui présentent de très hauts niveaux de production de biens animaux combinant ruminants et monogastriques (moyenne de 300 kg de protéine / ha SAU) . Ces hauts niveaux de production sont associés à une très faible capacité à satisfaire la consommation alimentaire en concentrés protéiques (8% en moyenne) et une capacité fourragère satisfaisante. Ces PRA sont toutes situées en Bretagne où se concentrent élevages monogastriques et laitiers intensifs.

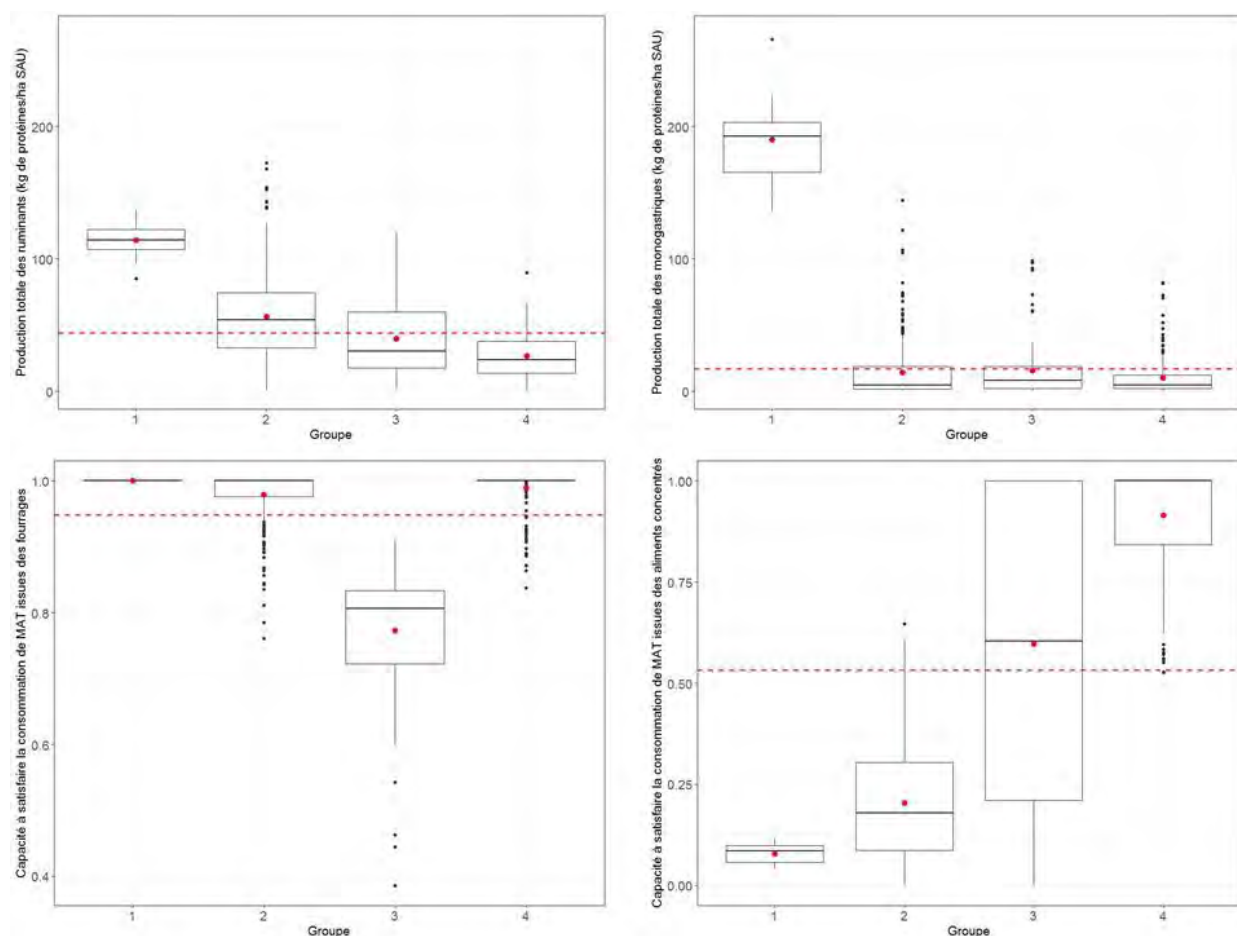
Le groupe 2 comprend 250 PRA dont le niveau moyen de production animale est 4 fois plus faible que dans le groupe 1 avec une moyenne de 70 kg de protéine / ha de SAU principalement issue des ruminants. La capacité à satisfaire la consommation alimentaire des animaux est faible pour les concentrés protéiques (0.20) mais élevée pour la MAT fourrage (0.98). Ce groupe est formé des zones d'élevage herbager de plaine et de moyenne montagne (plutôt sans transhumance). Les PRA se distribuent dans quatre régions. La première recouvre l'essentiel de la Basse Normandie et des Pays de Loire (bassin laitier). La seconde englobe l'essentiel du massif central (Limousin + Auvergne) et sa périphérie Nord-Est-Sud-Ouest (élevage allaitant et systèmes mixtes lait-viande). La troisième englobe la plaine laitière de l'Est ainsi que les montagnes humides également laitière (Vosges Franche Comté). La quatrième recouvre la partie haute montagne des Alpes et des Pyrénées.

Le groupe 3 comprend 97 PRA avec un niveau de production modéré atteignant en moyenne 55 kg de protéine / ha de SAU dont les $\frac{3}{4}$ sont issus des ruminants. La capacité à satisfaire la consommation alimentaire des animaux est modérément limitée par les concentrés protéiques (0.60). La capacité fourragère de ce groupe est plus faible et beaucoup plus variable que pour les groupes 1-2. Les PRA de ce groupe forment un ensemble trop hétérogène au sein duquel il conviendrait de distinguer (i) les PRA englobant la Haute Normandie, le Nord-Pas-de-Calais (élevage laitier intensif en zone de grande culture) ; (ii) les PRA aux marges du groupe 2 plutôt dans la moitié sud de la France (sud du Maine et Loire, nord des Deux-Sèvres, Allier, sud du massif central).

Le groupe 4 comprend 212 PRA à faible niveau de production (37 kg de protéine / ha de SAU) principalement issue des ruminants. La capacité à satisfaire la consommation alimentaire en MAT fourrages et concentrés est élevée. Ces PRA se concentrent dans les zones autour du bassin parisien et du bassin aquitain où l'élevage n'est pas une orientation principale et a très fortement régressé au cours des 30 dernières années.

Figure 10-4-6. Comparaison des 4 groupes de PRA pour les variables de production totale de biens animaux (ruminants et monogastriques) et de capacité du territoire à satisfaire la consommation alimentaire des animaux présents (en MAT fourrages et en MAT concentrés).

Moyenne du groupe figurée avec un point rouge et moyenne globale figurée avec un trait pointillé rouge. Les capacités en MS ne sont pas représentées car elles sont similaires aux capacités en MAT.



Caractéristiques des 4 groupes de PRA : déterminants biophysiques

Les 4 groupes de PRA ont été analysés en fonction du principal déterminant biophysique de la fourniture de biens animaux, c'est-à-dire les effectifs animaux rapportés aux surfaces végétales.

La **Figure 10-4-7** présente la répartition de la densité animale dans les 4 groupes. Le groupe 1 se détache nettement des 3 autres groupes avec une densité moyenne très élevée de 3.6 UGB_{AT}/ha SAU, à relier à la présence de monogastriques (**Figure 10-4-8**). Le groupe 2 et le groupe 3 ont des densités proches de la moyenne globale (1.1 et 0.9 UGB_{AT}/ha SAU). Enfin le groupe 4 présente la densité moyenne la plus faible (0.6 UGB_{AT}/ha SAU). Sur l'ensemble des 571 PRA, les ruminants représentent en moyenne 81% effectifs animaux (**Figure 10-4-8**). Le groupe 1 est très en dessous de la moyenne avec seulement 31% de ruminants, alors que les groupes 2, 3 et 4 ont des proportions moyennes de ruminants proches de la moyenne (86%, 81% et 79% respectivement).

Pour tous les groupes, la fourniture des biens animaux est fortement conditionnée par les déterminants biophysiques : plus la densité animale est élevée, plus la production est élevée. En revanche, la **capacité** de la PRA à satisfaire la consommation des animaux **tend à décroître avec le niveau de densité animale** selon une courbe exponentielle (**Figure 10-4-9**). Au-delà de 1.5 UGB_{AT}/ha SAU, la capacité se dégrade fortement en raison du déséquilibre entre les surfaces végétales conditionnant la disponibilité en ressources alimentaire et les effectifs animaux.

Figure 10-4-7. Répartition de la densité animale dans les 4 groupes de PRA.

La moyenne des groupes est figurée avec un point rouge et la moyenne globale des PRA est figurée avec un trait pointillé rouge.

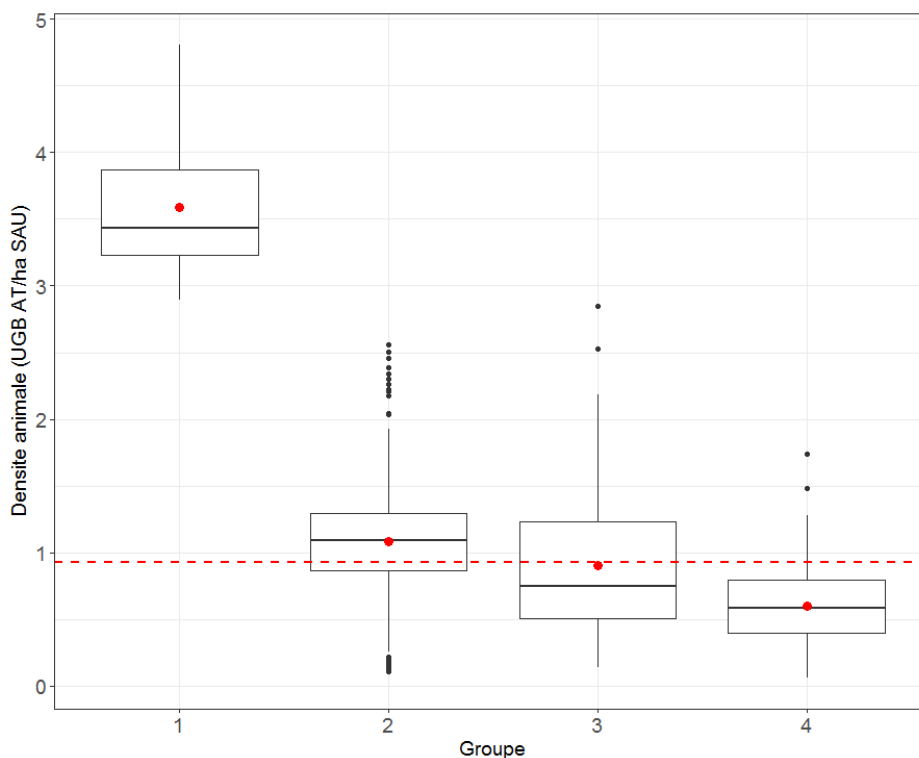


Figure 10-4-8. Répartition de la proportion de ruminants dans l’effectif animal total dans les 4 groupes de PRA.

La moyenne des groupes est figurée avec un point rouge et la moyenne globale des PRA est figurée avec un trait pointillé rouge.

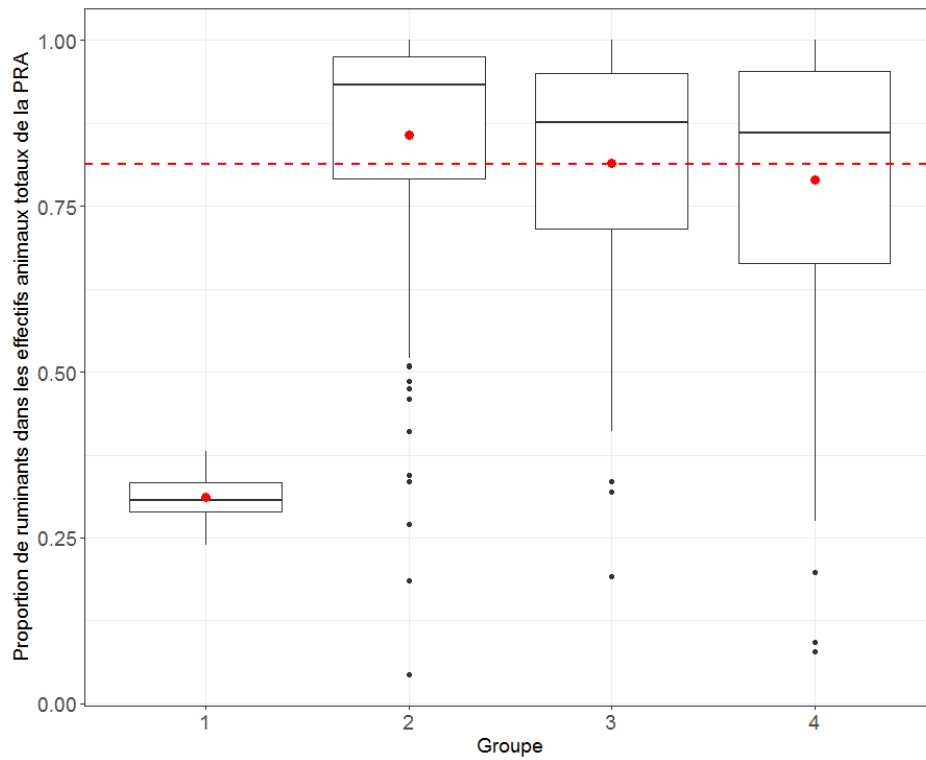
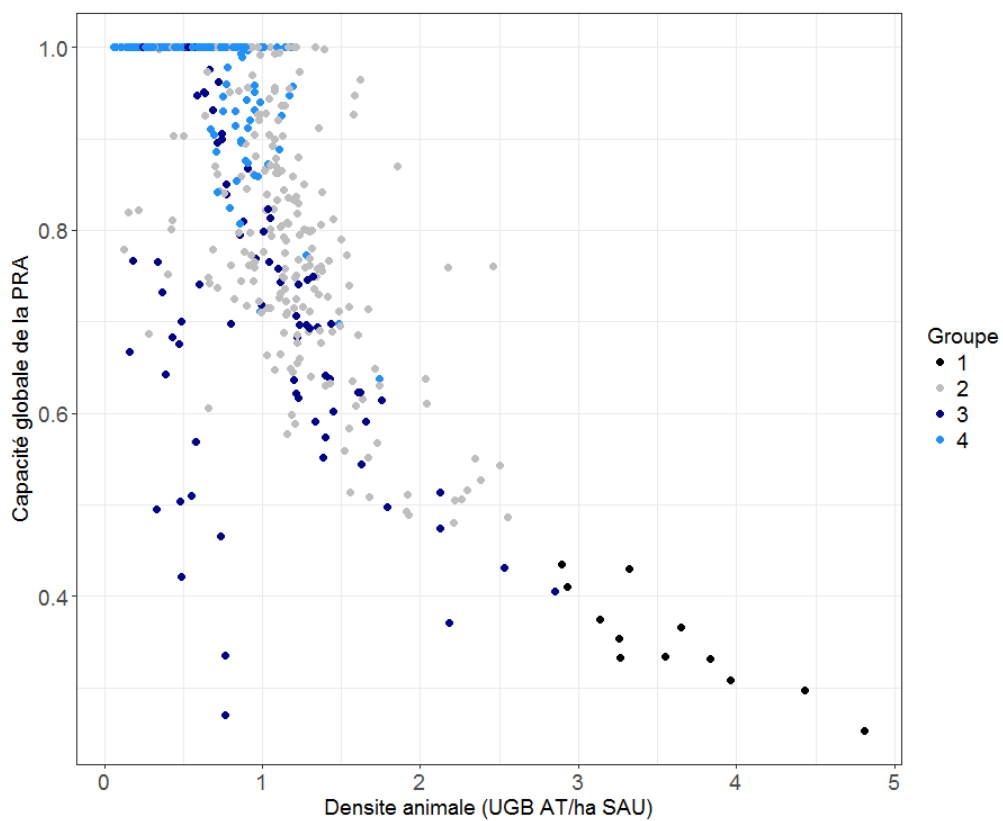


Figure 10-4-9. Relation entre la capacité de la PRA à satisfaire la consommation alimentaire et les déterminants biophysiques de la fourniture de biens animaux, synthétisés par la densité animale.



Caractéristiques des 4 groupes de PRA : facteurs exogènes anthropiques

Les facteurs exogènes anthropiques considérés dans cette analyse sont des indicateurs de composition de la SAU. Ils apportent des informations sur l'orientation des systèmes d'alimentation des animaux, tels que les surfaces en céréales et oléoprotéagineux (SCOP), la surface fourragère principale (SFP), la surface en maïs fourrage et la surface toujours en herbe (STH).

Groupe 1 - « une production de biens animaux très élevée mais dépendante de biens végétaux produits en dehors du territoire local »

Le niveau de fourniture de biens animaux est très élevé (en moyenne, 114 kg/ha SAU de protéines issues des ruminants et 190 kg/ha SAU de protéines issues des monogastriques) et basé sur une forte densité animale combinant ruminants et monogastriques. La bonne capacité fourragère de ces PRA repose sur le maïs (**Figures 10-4-10 & 10-4-11**). La capacité globale reste faible (en moyenne 35%) en raison de l'extrême faiblesse de la capacité à satisfaire la consommation en concentrés protéiques (en moyenne 8%) indispensables au maïs ensilage. La disponibilité en surfaces SCOP par animal est faible (**Figures 10-4-13**) illustrant la surdensité animale et donc le **déséquilibre animal/végétal** qui caractérise ce groupe.

La production de **biens animaux sur ressources propres** (Pa_{rp}) est en moyenne de **105 kg de protéine / ha SAU, soit 1/3 de la production totale du groupe**. Les PRA de ce groupe produisent **11% de la PArp cumulée** des 571 PRA.

Groupe 2 - « une production de biens animaux élevée et permise par les biens végétaux, principalement fourragers, produits sur le territoire »

Le niveau de fourniture de biens animaux est élevé (en moyenne 56 kg/ha SAU de protéines issues des ruminants et 14 kg/ha SAU de protéines issues des monogastriques) et basé sur une densité animale moyenne, reposant surtout sur les ruminants. La capacité fourragère très élevée (98% en moyenne) repose surtout sur la STH (**Figures 10-4-10 & 10-4-11**). La capacité globale est bonne (en moyenne 82%) mais limitée par la disponibilité locale en concentrés protéiques (en moyenne 20%). La densité animale n'est pas le facteur limitant de la capacité. Bien que basé sur les fourrages, le niveau de production élevé implique l'utilisation de concentrés protéiques que la SCOP ne fournit pas en quantité suffisante (**Figures 10-4-13**).

La Pa_{rp} moyenne est de **54 kg de protéine / ha SAU, soit ¼ de la production totale du groupe**. Les PRA de ce groupe produisent **49% de la PArp cumulée** des 571 PRA.

Groupe 3 – « une production de biens animaux modeste et largement permise par les biens végétaux produits sur le territoire »

Le niveau de fourniture de biens animaux est peu élevé (40 kg/ha SAU de protéines issues des ruminants et 16 kg/ha SAU de protéines issues de monogastriques). Ce groupe est très hétérogène en termes de composition de la SAU (forte dispersion des variables, cf **figures 10-4-10 & 10-4-11**). La capacité globale est limitée par la capacité à satisfaire la consommation des animaux en fourrages (en moyenne 77%). Cette limitation de la capacité semble liée à la faible disponibilité de la SFP (**figures 10-4-10 & 10-4-12**).

La Pa_{rp} moyenne est de **39 kg de protéine / ha SAU, soit 2/3 de la production totale du groupe**. Les PRA de ce groupe produisent **16% de la PArp cumulée** des 571 PRA.

Groupe 4 – « une faible production de biens animaux totalement permise par les biens végétaux produits sur le territoire »

Le niveau de fourniture de biens animaux est faible (27 kg/ha SAU de protéines issues des ruminants et 10 kg/ha SAU de protéines issues de monogastriques), et basé sur une faible présence animale. Sa capacité est la plus élevée (en moyenne, 98%) ; elle n'est pas limitée par la disponibilité en concentrés protéiques avec près de 1ha de SCOP / animal (**Figure 10-4-13**).

La Pa_{rp} moyenne (36 kg de protéine / ha SAU) est **quasi équivalente à sa production totale du groupe**. Les PRA de ce groupe produisent **24% de la PArp cumulée** des 571 PRA.

Figure 10-4-10. Répartition de la proportion de SFP dans les 4 groupes de PRA identifiés.

La moyenne des groupes est figurée avec un point rouge et la moyenne globale des PRA est figurée avec un trait pointillé rouge.

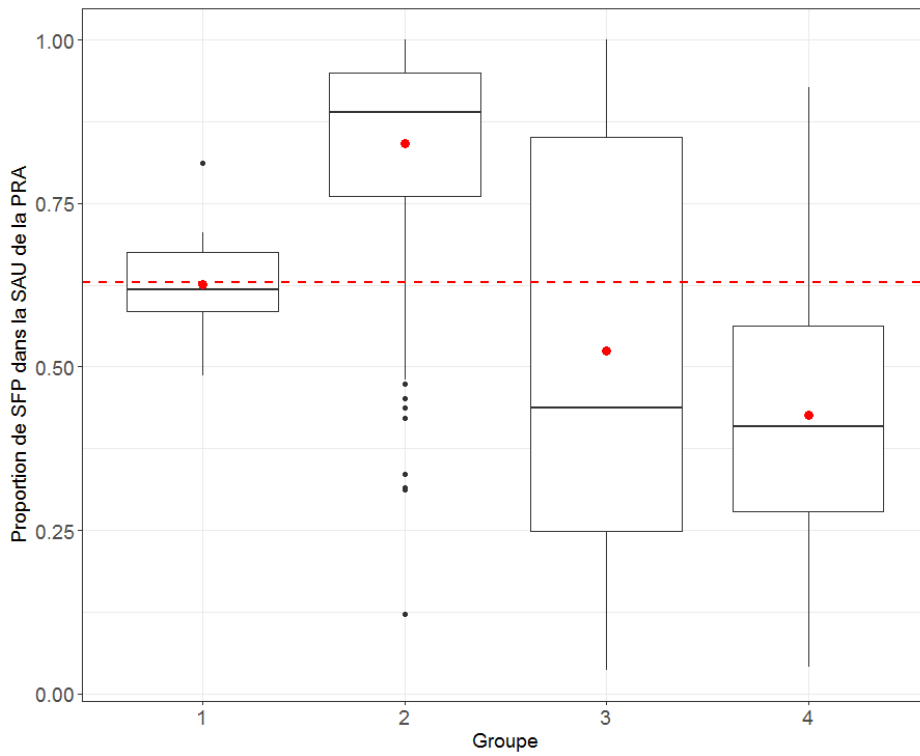


Figure 10-4-11. Répartition de la proportion de maïs fourrager dans la surface fourragère permanente (SFP) dans les 4 groupes de PRA.

La moyenne des groupes est figurée avec un point rouge et la moyenne globale des PRA est figurée avec un trait pointillé rouge.

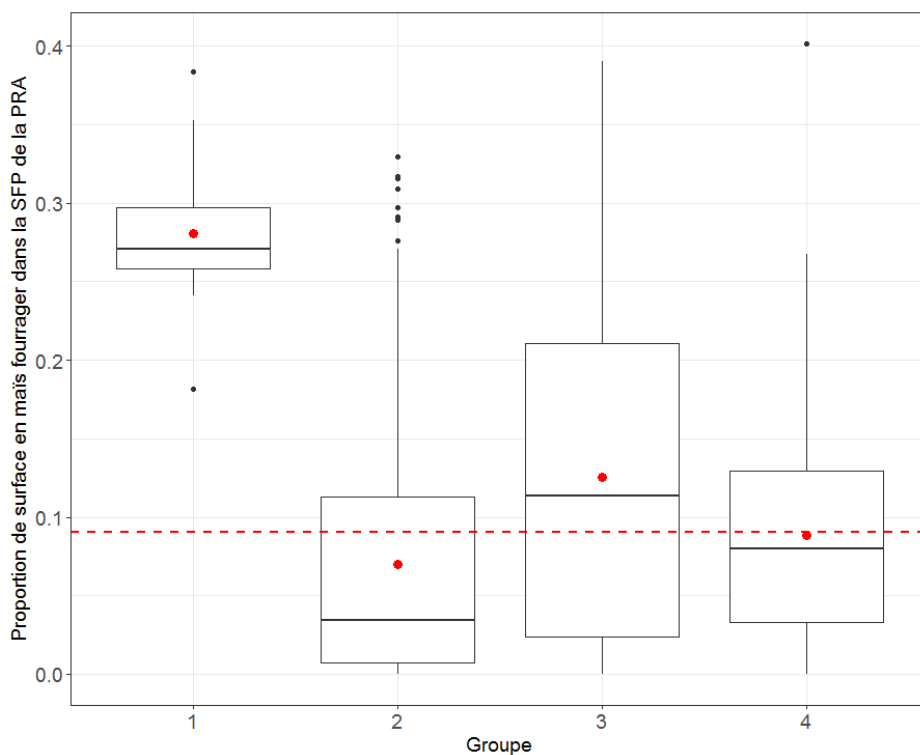


Figure 10-4-12. Disponibilité des surfaces fourragères pour les ruminants (ha SFP/UGB AT ruminants).

La moyenne des groupes est figurée avec un point rouge et la moyenne globale des PRA est figurée avec un trait pointillé rouge.

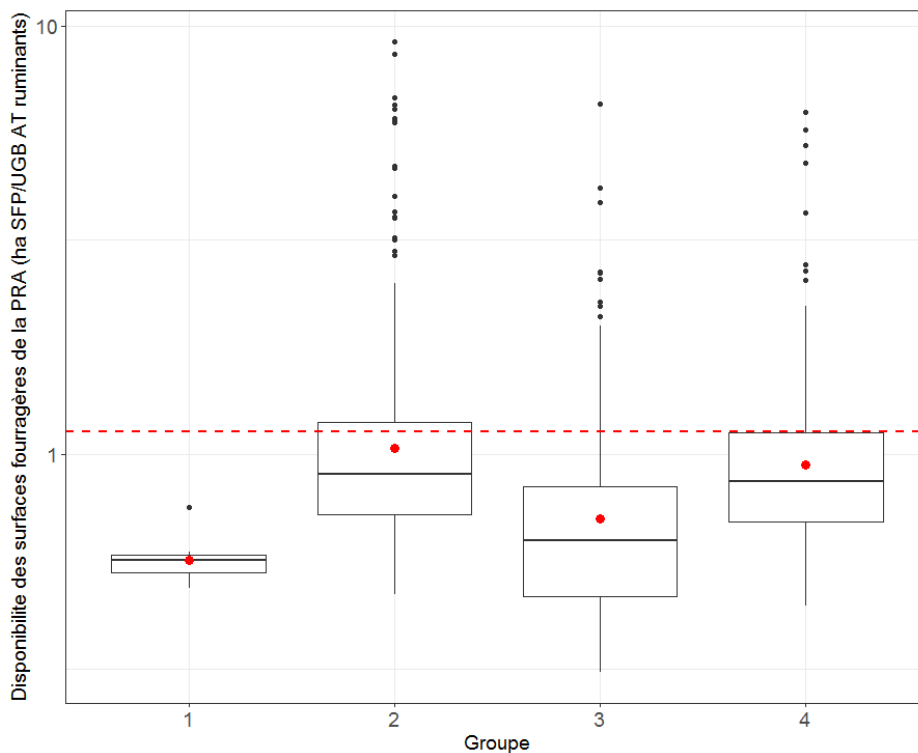
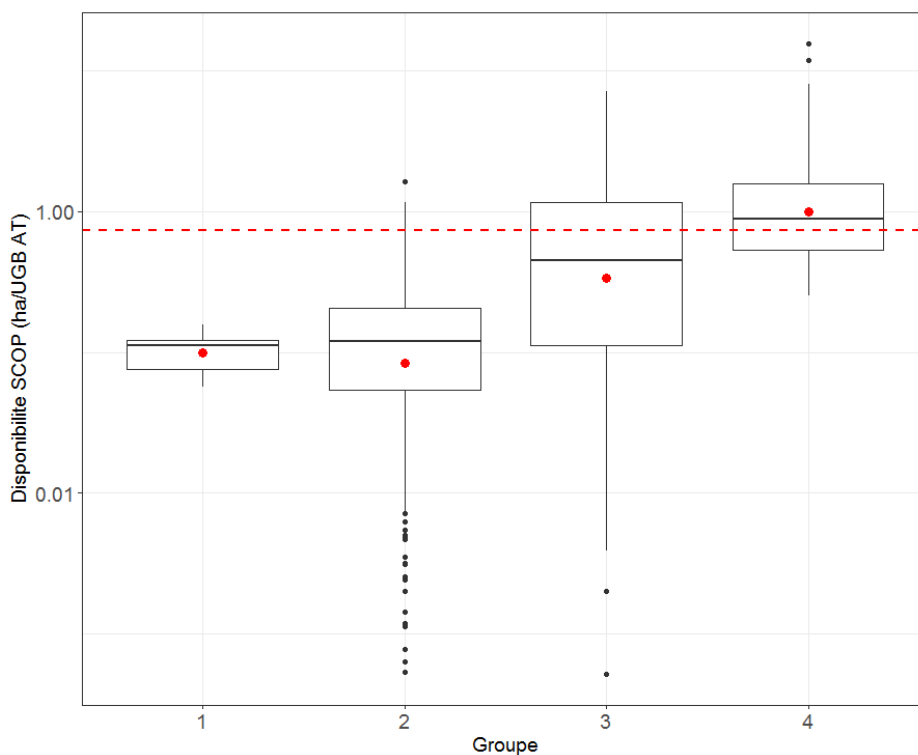


Figure 10-4-13. Disponibilité des surfaces en céréales et oléoprotéagineux (SCOP) par UGB_{AT} présent dans la PRA.

La moyenne des groupes est figurée avec un point rouge et la moyenne globale des PRA est figurée avec un trait pointillé rouge.



10.4.2.3. Discussion et piste d'améliorations

L'approche développée dans l'EFESE-écosystèmes agricoles propose une première estimation de la production de biens animaux sur ressources propres, c'est-à-dire une production **réalisée à partir des matières premières végétales produites dans l'écosystème agricole**. Une prochaine étape consistera à calculer la production de biens animaux permise par les services de fourniture en azote et en eau calculé dans les sections 8.8.2 et 8.7.2

Le calcul de la capacité d'un territoire à satisfaire la consommation de matière végétale de tous les animaux présents (α_p) s'appuie sur des coefficients de disponibilité pour l'alimentation animale établis au niveau national à partir des bilans Agreste et FranceAgriMer. Par exemple, la disponibilité du blé tendre pour l'alimentation animale est la même pour toutes les PRA. Le choix d'appliquer au niveau PRA, un coefficient national masque des disparités régionales concernant l'utilisation des cultures et la disponibilité de coproduits liée à la présence d'infrastructures industrielles. Cependant, ce choix n'a pas un poids écrasant dans le calcul de la capacité des PRA car pour 70% d'entre elles, la consommation de tourteau de soja et le soja en l'état est à l'origine des situations où la couverture de la consommation des animaux n'est pas permise par la production végétale locale. Une piste d'amélioration de la méthode proposée serait donc de calculer des coefficients de disponibilité à une échelle spatiale plus fine ; ceci pourrait améliorer la capacité globale des PRA du groupe 2 mais ne modifierait pas celle des autres groupes.

La capacité du territoire à satisfaire la consommation alimentaire est appréhendée de façon globale car l'ensemble des matières premières végétales est sommé et exprimé en MS et MAT. Ce choix permet des compensations entre matières premières (fourrages / concentrés). Une vision plus stricte de la capacité consisterait à calculer α_p sur la base de la matière végétale la plus limitante ; ceci diminuerait la capacité de tous les territoires au niveau de leur capacité en concentrés protéiques (**Tableau 10-4-5**).

Les surfaces végétales considérées dans les calculs sont issues des données Agreste et basées sur les déclarations PAC. Dans certaines zones pastorales périméditerranéennes des surfaces embroussaillées ou boisées ne sont donc pas prises en compte dans les calculs d'offre végétale, conduisant à une sous-estimation de l'offre végétale et donc de la capacité de la PRA. De même, la mobilité des troupeaux par rapport à l'utilisation des surfaces pastorales n'est pas prise en compte dans l'étude. Les PRA situées dans des zones d'élevage transhumant ont des effectifs animaux qui utilisent des surfaces végétales d'autres PRA pendant 3 à 4 mois de l'année.

Les PRA sont considérées comme des systèmes fermés, sans circulation de l'offre végétale ni des animaux (sauf pour les bovins vendus en vif). Une amélioration de la méthode consisterait à prendre en compte ces flux entrant/sortant pour affiner l'évaluation de la capacité du territoire à couvrir la consommation des animaux. Plus globalement, ce point pose la question du choix du maillage géographique pour estimer la production de biens animaux sur ressources propres de l'écosystème. Une piste d'amélioration de la méthode proposée serait de calculer α_p qui à des niveaux d'organisation supra PRA et pertinents du point de vue des bassins de production et des potentialités pédoclimatiques.

Les données de consommations des animaux sont estimées à partir de différentes sources. Pour les ruminants, cette estimation repose sur des enquêtes dans les fermes des réseaux d'élevage de l'Idèle réalisées à la fin des années 2000 et sur un appariement de ces fermes avec les fermes du recensement général. Il serait intéressant de vérifier la représentativité des fermes de réseaux d'élevage en matière de système d'alimentation. Pour les monogastriques, le flux d'aliments fabriqués à la ferme est estimé à partir du flux d'aliments des fabricants d'aliments du bétail sur la base d'un coefficient de proportionnalité; on pose donc comme hypothèse que la composition des deux flux est identique. Cette hypothèse pourrait également être levée en calculant des coefficients de proportionnalité spécifiques à chaque matière première.

La chaîne de calcul des indicateurs de production de biens animaux au niveau PRA repose sur des sources de données différentes et elle n'est pas pour l'instant automatisée. Une perspective d'amélioration de la méthode serait de mettre en place un traitement automatisé des données. Ceci permettrait d'actualiser les calculs en fonction des données et également de tester le poids de certaines hypothèses en conduisant des analyses de sensibilité.

Annexes.

Notes techniques pour l'évaluation des biens agricoles

Annexe 10-A. Note technique pour l'évaluation de la production de biens végétaux à partir des plantes cultivées

1. Calcul de l'indicateur de production totale de biens végétaux à partir des plantes cultivées

Expert responsable : Olivier Therond

Mise en œuvre de l'évaluation : Camille Dross, Thomas Poméon

Cartographie : Thomas Poméon

Description des sources de données utilisées

- la **Statistique agricole annuelle (SAA)** (Agreste – données publiques¹), qui répertorie pour chaque année calendaire les **surfaces, productions et rendements de l'ensemble des productions** agricoles, végétales et animales. Les données sont produites à l'échelle **Département**, à partir de différentes sources et méthodes (données du Recensement Parcellaire Graphique – déclaration PAC-, données issues des entreprises de collecte et de transformation, des instituts techniques et des différentes organisations interprofessionnelles, etc.).

- le **Recensement agricole (RA)** (Agreste – données publiques) est une enquête **exhaustive** réalisée tous les 10 ans auprès de l'ensemble des exploitations agricoles. Le dernier recensement a été réalisé en 2010 (RA2010). Parmi les informations produites, le RA permet de connaître les surfaces dédiées à chaque production végétale pour l'année concernée. De par son exhaustivité, le RA permet d'avoir des résolutions spatiales fines, la plus fine étant la résolution communale. Le RA est utilisé ici pour désagréger les données de la SAA du niveau Département au niveau Petites Régions Agricoles (PRA).

Toutefois les données du RA sont soumises aux règles du secret statistique: les données qui concernent moins de trois exploitations ou pour lesquelles une seule entreprise représente 85% ou plus de la valeur obtenue n'y sont pas publiées. Il y a donc des valeurs manquantes dans les tableaux de surfaces en 2010 ainsi que dans les tableaux de production. Cela implique que plus les données correspondent à une résolution fine, plus il est probable d'être confronté à des données sous secret (donc non disponibles). La plupart des PRA (plus de 80%) sont soumises au secret statistique pour au moins une culture. Cependant, les surfaces en cultures concernées sont faibles : le secret statistique porte sur moins de 2,5% des surfaces pour les principales céréales², pour le colza et le tournesol, ainsi que pour les betteraves industrielles et les pommes de terre et tubercules.

- les **Bilans d'approvisionnement céréales / oléagineux / protéagineux** (Agreste – documents publics³) calculés par année campagne (1/07- 30/06). Ils présentent la disponibilité des productions végétales (c'est à dire toute la production nationale mise sur le marché ainsi que les importations) et leur utilisation. Ils sont construits essentiellement à partir des données FranceAgriMer. Ils détaillent (i) la production utilisable (collecte et autoconsommation) (ii) les importations, (iii) les exportations, (iv) les stocks en début et en fin de campagne et (v) l'utilisation intérieure. L'utilisation intérieure inclut les postes suivants : semences; pertes; alimentation animale; usages industriels; transformation; consommation humaine. Cette répartition entre postes permet de calculer une clé de répartition de l'utilisation finale des biens végétaux agricoles.

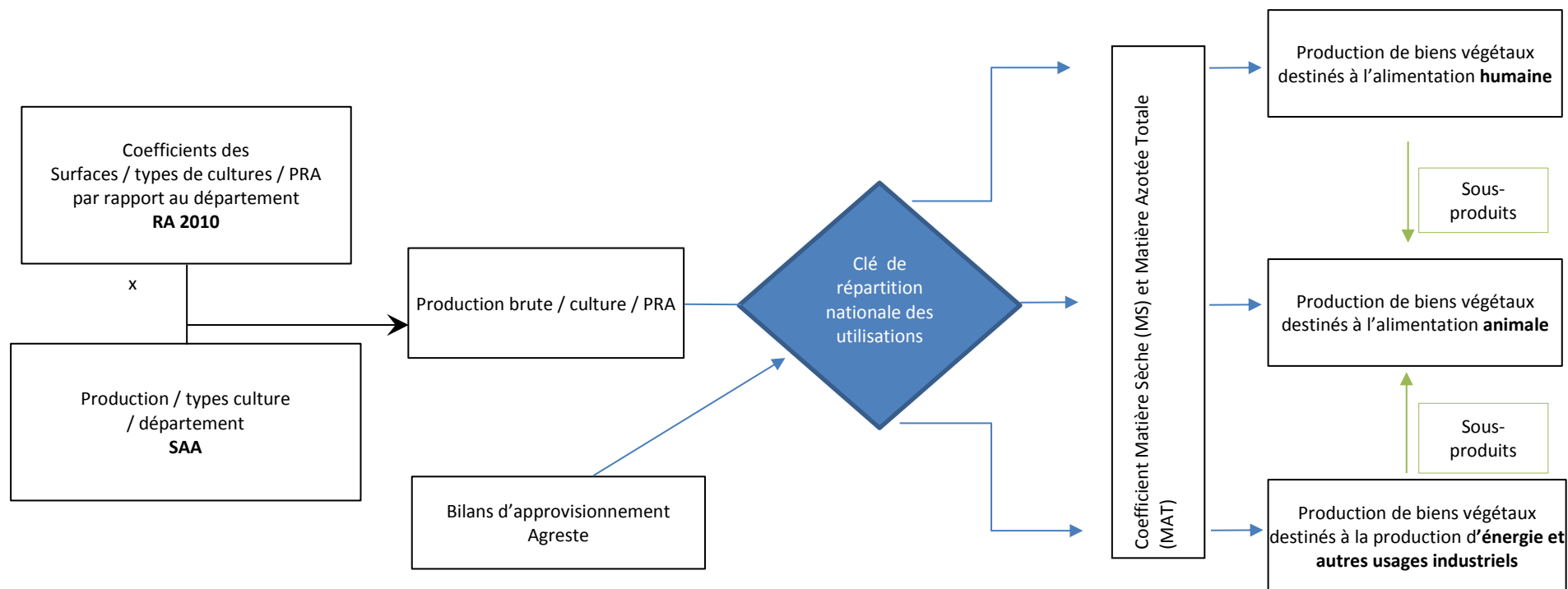
¹ <http://agreste.agriculture.gouv.fr/enquetes/statistique-agricole-annuelle-saa/>

² Blé tendre, blé dur, orge, escourgeon, avoine, triticale, maïs, sorgho. Ces céréales représentent à elles seules plus de 98% des surfaces de céréales.

³ <http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/enquetes/bilans-d-approvisionnement/>

Démarche générale et Articulation des sources

Figure 1. Schématisation de la démarche calculatoire adoptée



Les données issues de la SAA et du RA ne correspondent pas exactement au même champ de référence. En effet, si la SAA est globalement construite en cohérence avec le RA, les données sur les surfaces par culture issues du RA ne concernent que les surfaces des exploitations, hors pacages collectifs. Pour sa part, la SAA couvre également les surfaces collectives pour les cultures fourragères (les prairies de type estives notamment).

De plus, il n'y a pas correspondance exacte entre la classification des cultures dans la SAA et dans le RA.

- Il existe un décalage pour les plantes à fibres entre les catégories RA et SAA : « Chanvre y compris papier » et « Autres plantes textiles » dans le RA ; « Chanvre papier (paille et graine) (y compris semences) » et « Autres plantes textiles (chanvre) (y compris semences) » dans la SAA

- **catégories non prises en compte dans la procédure de désagrégation des données elles ne concernent que 8200 ha pour toute la France ;**

- Un autre décalage concerne les cultures fourragères entre SAA et RA : Dans la SAA, il y a dans le sous thème "fourrages annuels" 2 catégories (i) 'maïs fourrage' et (ii) 'autres fourrages annuels' (voir tableau 1) ; dans le RA, pour le même sous thème, on retrouve la catégorie 'maïs fourrage', ainsi que des catégories 'plantes sarclées fourragères' et 'autres fourrages annuels' (qui incluent légumineuses annuelles et autres fourrages annuelles non légumineuses) (voir tableau 2).

Ce décalage de classification s'additionne au décalage lié à la différence du champ prise en compte (exploitation et hors exploitation). Cela apparaît quand on compare les données entre SAA et RA, qui montre qu'agréger les catégories RA 'plantes sarclées fourragères' et 'autres fourrages annuels' ne résout pas le problème (voir tableau 2).

Tableau 1. SAA 2010

Maïs fourrage et ensilage	Autres fourrages annuels	Prairies artificielles
1 406 106	234 931	280 707

Tableau 2. RA 2010

Maïs fourrage et ensilage	Plantes sarclées fourragères	Autres fourrages annuels	Plantes sarclées fourragères + Autres fourrages annuels	Prairies artificielles
1 387 033	10 782	37 571	48 353	278 029

Au total, sur les cultures fourragères, il existe une différence de 2 000 000 ha dans la SAA par rapport au RA, principalement lié aux pacages collectifs. Ce différentiel se répartit de la manière suivante :

- 972 000 ha (la moitié) en STH peu productives (différence entre les surfaces de STH peu productives dans le RA et le SAA)
- 852 000 ha en STH productives
- une quantité négligeable en prairies artificielles (3 000 ha soit moins de 1%)
- on peut imaginer que le reste, soit 171 000 ha, est constitué de prairies temporaires, considérés comme « les prairies temporaires et fourrages annuels hors exploitation ».

Il est difficile de réaliser dans ce cas de décalages multifactoriels un choix optimal d'un point de vue méthodologique. Etant données les contraintes et le réalisme des hypothèses sous-jacentes, les choix suivants ont été retenus :

- **Calcul d'une clé de répartition DPT/PRA à partir des données RA2010 en agrégeant les catégories « Plantes sarclées fourragères » + « Autres fourrages annuels »**
- **Application de cette clé à la catégorie de la SAA « Autres fourrages annuels » (soit les fourrages annuels moins le maïs ensilage)**
- **Pour toutes les surfaces collectives qui sont comptabilisés dans la SAA mais pas dans le RA2010 (prairies en particulier), on applique la même méthode (calcul des clés de répartition à partir des données RA, donc sans prise en compte des surfaces collectives), puisqu'aucune autre source n'est disponible. Cela revient à faire l'hypothèse qu'au sein de chaque département, la répartition entre PRA des surfaces fourragères est la même pour les surfaces collectives comme pour les surfaces individuelles.**

D'un point de vue géographique, la localisation des surfaces est réalisée sur la même base dans la SAA et le RA, c'est-à-dire sur la base de la commune du siège de l'exploitation.

Au niveau temporel, SAA et RA se réfèrent à la même notion de campagne agricole de production, il n'y a donc pas de décalage majeur sur ce point. Pour prendre en compte la variabilité interannuelle des productions (en termes d'assolement comme de rendement), nous avons choisi de travailler sur la base d'une moyenne de trois années de la SAA (2010, 2011, 2012). En revanche, le RA ne concerne qu'une seule année, 2010. Son utilisation pour désagréger les données départementales au niveau PRA implique donc l'hypothèse que la distribution spatiale entre PRA des surfaces des différentes cultures au sein de chaque département reste constante entre 2010 et 2012.

Enfin, le dernier point à considérer du point de vue de l'articulation des sources est celui du secret statistique. En effet, les données du RA doivent respecter les règles du secret statistique pour leur diffusion. Pour les cultures les plus marginales, cela génère des données non disponibles, en particulier à la résolution PRA.

Dans la SAA, le secret statistique est quasi-absent, du fait de l'élaboration des données au niveau départemental et de la méthodologie (qui repose sur des estimations et des sources administratives et professionnelles, plutôt que des enquêtes statistiques). Toutefois le secret peut exister quand le niveau d'incertitude est trop élevé sur la donnée (pas de sources fiables, notamment pour des cultures très peu représentées). Dans ce cas, le choix a été fait de considérer les données sous secret ou non renseignées comme des valeurs nulles. Cette approximation peut être considérée comme globalement valide étant donné qu'elle ne concerne que peu de cas, qui correspondent à des surfaces de cultures⁴ négligeables et/ou des départements marginaux pour la culture considérée.

Pour le RA, une procédure développée par C. Dross, INRA-SADAPT, a permis d'estimer les valeurs sous secret au niveau département pour l'ensemble des cultures (Dross, 2016).

Etapas de calcul pour les indicateurs de production de biens agricoles végétaux

La production de biens agricoles végétaux est évaluée à la résolution « Petite Région Agricole » (PRA).

Etape 1 : calcul des clés de répartition des surfaces des cultures entre PRA d'un même département pour l'année 2010

Ces clés de répartition serviront ensuite à désagréger les données départementales de la SAA au niveau PRA pour les années 2010, 2011 et 2012

Source utilisée : RA 2010

Pour contourner le secret statistique dans le RA, l'INRA SADAPT (Dross, 2016) a développé une procédure permettant de compléter les données sous secret. A partir de cette table, une clé de répartition des surfaces de cultures entre PRA d'un même département est calculée pour chaque culture. Elle indique pour chaque culture c le pourcentage de la surface départementale correspondant à chacune des PRA p du département d :

$$\text{CléRA}_{c,p} = \text{surfaceRA}_{c,p} / \text{surfaceRA}_{c,d}$$

Etape 2 : désagrégation des surfaces et des productions départementales (contenues dans la SAA) au niveau PRA

Source utilisée : SAA 2010, 2011, 2012 et RA 2010

Les données de la SAA sur les surfaces (en ha) et productions (en quintaux de matière brute) des départements d pour chaque année a et culture c sont désagrégées au niveau des PRA p à partir des $\text{CléRA}_{c,p}$:

$$\text{surfaceSAA}_{c,a,p} = \text{CléRA}_{c,p} * \text{surfaceSAA}_{c,a,d}$$

$$\text{prodSAA}_{c,a,p} = \text{CléRA}_{c,p} * \text{prodSAA}_{c,a,d}$$

⁴ Seules les catégories suivantes présentent des valeurs non renseignées : les légumes secs, les plantes aromatiques, médicinales et à parfum, les plantes à fibres, le houblon et le tabac.

On calcule ensuite la moyenne m des trois années 2010, 2011 et 2012, pour lisser les variations annuelles :

$$\text{surfaceSAA}_{c_m_p} = (\text{surfaceSAA}_{c_2010_p} + \text{surfaceSAA}_{c_2011_p} + \text{surfaceSAA}_{c_2012_p}) / 3$$

$$\text{prodSAA}_{c_m_p} = (\text{prodSAA}_{c_2010_d} + \text{prodSAA}_{c_2011_d} + \text{prodSAA}_{c_2012_d}) / 3$$

A noter que cette formule implique une hypothèse de productivité constante par culture au sein de chaque département, hypothèse non réaliste (plaine vs. montagne, etc.) mais contrainte par la disponibilité et l'accessibilité des données.

Etape 3 : calcul des coefficients de répartition de l'utilisation des biens végétaux

Source utilisée : bilans d'approvisionnement Agreste

La démarche consiste à répartir la production désagrégée de la SAA (c'est-à-dire la récolte) entre les différents usages (humains, animaux, etc.).

Les coefficients de répartition entre les principales utilisations des biens végétaux sont calculés en faisant la **moyenne** pour 4 campagnes (2009/10, 2010/11, 2011/12, 2012/13) de la part destinée à chaque utilisation d'après les bilans d'approvisionnement complets par campagne (voir Complément 1 pour la présentation des différents bilans). Ces coefficients sont calculés à partir de la catégorie « **utilisation intérieure** » qui distingue **semences, pertes, alimentation animale, usages industriels** (pour la production d'alcool), **transformation** (huile et tourteaux, féculs, etc.) et **consommation humaine** (brute). Les agrocarburants sont comptabilisés dans la partie *usages industriels/ dont transformation (alcool) / dont alcool pour carburants* en ce qui concerne les céréales ; et dans la partie *transformation / dont huile EMVH* pour les oléagineux. Les bilans d'approvisionnements ne prenant en compte aucune culture ayant un usage significatif pour la production de fibres, cette utilisation n'est pas incluse ni traitée dans les données suivantes.

Pour les oléagineux, une clé est également calculée sur les produits destinés à la transformation (soit entre 80 et 93% des utilisations) pour prendre en compte les utilisations des huiles et tourteaux, en particulier par rapport à l'alimentation animale. Cette clé a été calculée en moyennant le taux d'extraction des huiles et tourteaux pour 4 campagnes (mais une seule campagne pour les huiles, car seul le bilan 2009/2010 est disponible), à partir des bilans d'approvisionnement « Tourteaux » et « Graisses et huiles végétales » (voir tableau 3). Ensuite, une clé de répartition des usages des huiles et tourteaux a été calculé à partir des mêmes bilans, pour déterminer la part des huiles destinée à l'alimentation animale et celles destinée aux agrocarburants (sachant que l'ensemble des tourteaux concernés sont destinés à l'alimentation animale). Ainsi en multipliant la part des graines d'oléagineux transformés par le taux d'extraction huile/tourteaux et la part des usages on obtient un coefficient sur la part de la production totale de chaque oléagineux qui revient aux animaux sous forme d'huile et de tourteaux, ou qui sont utilisés pour les agrocarburants.

Tableau 3. Taux d'extraction en huile et tourteaux des principaux oléagineux cultivés en France

Espèce	Taux d'extraction d'huile	Taux d'extraction des tourteaux
Colza	44%	55%
Tournesol	45%	54%
Soja	20%	78%
Lin	22%	56%

Le fait d'utiliser le poste d'utilisation intérieure implique l'hypothèse que la destination des biens végétaux produits en France est la même que celle de l'ensemble formée par les biens végétaux d'origine intérieure non exportée et les biens végétaux importés.

Etape 4 : calcul des surfaces et volumes de biens végétaux par utilisation et par PRA

Source utilisée : bilans d'approvisionnement Agreste et SAA

Pour chaque production, on multiplie la surface et la production moyennes par les coefficients obtenus à l'étape 3. On obtient alors une valeur par PRA p et par utilisation u pour chaque culture c :

$$\text{surfaceSAA}_{c,m,p,u} = \text{surfaceSAA}_{c,m,p} * \text{coef}_{c,m,u}$$

$$\text{prodSAA}_{c,m,p,u} = \text{prodSAA}_{c,m,p} * \text{coef}_{c,m,u}$$

A noter que la répartition des utilisations est calculée au niveau national. Cela sous-tend l'hypothèse que la destination des biens végétaux est la même pour chaque département et PRA, hypothèse peu réaliste (par exemple régions sans élevage vs. régions de polyculture-élevage, régions avec des unités de transformation, etc.) mais que l'absence de données plus précises géographiquement nous conduit à faire.

Etape 5 : conversion des volumes produits par PRA et par utilisation en MS, MAT et énergie

Source utilisée : tables de conversion CEREOPA, INRA et FAO

Le volume produit par PRA p et par utilisation u est traduit en Matière Sèche (MS), en Matière Azotée Totale (MAT) et en énergie (en kcal).

$$\text{prodSAA}_{c,m,p,u}(\text{MS/MAT/NRJ}) = \text{prodSAA}_{c,m,p} * \text{coef}_c(\text{MS/MAT/NRJ})$$

Plusieurs sources sont disponibles pour convertir la production en matière brute en MS, MAT et énergie (voir Complément 2 en fin de document). Pour la MS et la MAT, le référentiel issu de la base de données CEREOPA est mobilisé, car il est construit sur la base d'enquêtes auprès de professionnels et est régulièrement actualisé. Par contre certains types de produits ne sont pas disponibles dans cette base. Nous utilisons alors le référentiel issu du « Livre Rouge de l'INRA » (Baumont *et al.*, 2010). Enfin pour l'énergie, les coefficients sont extraits des bilans alimentaires de la FAO de 2003.

Descriptif des bases de données utilisées et références bibliographiques :

Nom de la base : Recensement Agricole (RA)

Fournisseur/source : Ministère de l'Agriculture, Service de la Statistique et de la Prospective

Années : 2010 (publié tous les 10 ans)

Couverture géographique : France métropolitaine

Résolution géographique (maille) : PRA

Variables/informations contenues dans la base et nécessaires au calcul de l'indicateur : surfaces des différentes cultures

Nom de la base : Statistiques Agricoles Annuelles (SAA)

Fournisseur/source : Ministère de l'Agriculture, Service de la Statistique et de la Prospective

Années : 2010, 2011, 2012

Couverture géographique : France métropolitaine

Résolution géographique (maille) : département

Variables/informations contenues dans la base et nécessaires au calcul de l'indicateur : quantités (masses ou volumes) de produits agricoles.

Nom de la base/source de données : bilans d'approvisionnement – Céréales ; Riz ; Pommes de terre ; Protéagineux ; Graines et fruits oléagineux ; Tourteaux ; Graisses et huiles végétales ; Sucres et produits sucrés

Fournisseur/source : SSP – Agreste

Années : années « campagne » du 01/07 au 30/06 : 2009/2010, 2010/2011, 2011/2012, 2012/2013

Couverture géographique : France

Résolution géographique (maille) : France

Variables/informations nécessaires au calcul de l'indicateur : clé de répartition des utilisations intérieures des divers types de MPV en tonnes de matière brute

Nom de la base/source de données : Prospective Aliment

Fournisseur/source : Céréopa (Centre d'Etude et de Recherche sur l'Economie et l'Organisation des Productions Animales) (données non publiques)

Années : 3 années calendaires, 2010-2011-2012

Couverture géographique : France

Résolution géographique (maille) : France et sub-régions (France découpée en 9 supra-régions : Auvergne, Bretagne, Centre, Grand-Est, Nord, Normandie, Pays De Loire, Rhône-Alpes, Sud-Ouest)

Variables/informations nécessaires au calcul de l'indicateur : coefficients de conversion de la matière brute en MS et MAT

Dross. C. 2016. Stratégies d'utilisation des sols agricoles pour concilier production et oiseaux spécialistes des milieux agricoles. Thèse de doctorat Université Paris Saclay, AgroParisTech, ED ABIES <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01467938/>

Livre Rouge = Baumont R, Dulphy JP, Sauvant D, Tran G, Meschy F, Aufrère J, Peyraud JL, Champciaux P. Les tables de la valeur des aliments. In : Alimentation des bovins, ovins et caprins. Besoins des animaux – Valeurs des aliments. Tables INRA 2010 (édition remaniée), J Agabriel (coord), p.185-279

FAO, 2003. Les bilans alimentaires -Manuel.

Caractéristiques des sources de données

Ces données sont disponibles à différents niveaux d'agrégation. Les données du RA sont publiées pour différents niveaux géographiques, de la commune au niveau national, en passant par les niveaux PRA, département et région ; les données issues des SAA ou des comptes de l'agriculture sont publiées uniquement à partir du niveau département (département, région, France métropolitaine, France entière). De plus, ces deux sources de données font références à des catégories d'animaux, de cultures ou de produits imbriqués. Par exemple, la catégorie de cultures « Céréales » peut être subdivisée en « Blé tendre », « Blé dur », « Orge et escourgeon », « Avoine », « Triticale », « Seigle », « Maïs », « Sorgho », « Riz » et « Mélanges et autres céréales ». La catégorie « Blé tendre » est elle-même subdivisée en « Blé tendre d'hiver et épeautre » et « Blé tendre de printemps », et ainsi de suite. Dans la version publique du RPG, les données sont disponibles à n'importe quel niveau géographique mais seulement pour 28 catégories de cultures assez agrégées. La plupart des catégories du RPG regroupent plusieurs catégories du recensement agricole : par exemple la catégorie « maïs » regroupe « maïs grain » et « maïs ensilage ».

Complément 1. Répartition des matières premières végétales selon utilisation

Cultures prises en compte (= bilan et cultures soulignés):

- Bilan **Céréales** : blé tendre, blé dur, maïs grain, orge et escourgeon et autres céréales (seigle, avoine (mce, méteil), triticale, sorgho, autres)
- Bilan **protéagineux** : pois protéagineux, fèves et féveroles, lupins, autres (lentilles, autres pois, vesces, haricots secs)
- Bilan **pommes de terre**
- Bilan **riz**
- Bilan **graines et fruits oléagineux** : colza&navette, tournesol, soja, lin, autres (ricin, arachide, coprah, palmiste, coton, autres)
- Bilan **tourteaux** : pas besoin car les volumes de graines mobilisées sont prises en compte dans le Bilan graines et fruits oléagineux
- Bilan **Graisses et huiles végétales**, Graisses et huiles d'animaux marins et terrestres, Graisses et huiles préparées : pas prise en compte (même raison que pour les tourteaux)
- Bilan **Ressources Fourragères** :
 - Céréales : blé tendre, blé dur, maïs grain, orge, seigle, avoine (et méteil), sorgho, autres (triticale)
 - Riz
 - Légumineuses sèches : pois, fèves, autres (lupins)
 - Pdt
 - Sucre
 - Graisses et huiles végétales

- Fourrages verts transformés : luzerne (pellets), autres
- Manioc
- Autres pdts végétaux : dt graines oléagineuses (colza, tournesol, soja)
- Sous produits de transformation : dont de minoterie, de brasserie, de distillerie, d'amidonnerie, de sucrerie, d'huilerie (tourteaux > par espèce), autres
- Aliments d'origine animale
- Fourrages annuels : plantes sarclées, maïs fourragers, autres fourrages verts
- Fourrages pluri-annuels : prairies temporaires (inclus PA, a priori), Fourrages et pâturages temporaires autres que prairies *, prairies permanentes, STH pp
- Produits fatal des cultures

Complément 2. coefficients de conversion des volumes bruts de biens végétaux en matière sèche, matière azotée totale et énergie

	SOURCE CEREOPA			SOURCE LIVRE ROUGE INRA 2010				SOURCE "Estimation à dire d'experts" ⁵		SOURCE FAO 2003
	précision	Part de MS dans les matières premières (%)	Part de MAT dans les matières premières (%)	précision	Part de MS dans les matières premières (%)	Part de MAT dans la matière sèche (%)	colonne d * e = part de MAT dans les matières premières (%)	Part de MS dans les matières premières (%)	Part de MAT dans les matières premières (ou dans la MS) (%)	coefficient de conversion en énergie (kcal/100g de produit)
Blé (tendre et dur)	réf sur b. tendre	<u>86</u>	<u>11,3</u>	blé tendre	<u>86,8</u>	<u>12,1</u>	<u>10,5</u>			<u>334</u>
Maïs		<u>86,5</u>	<u>8,7</u>		<u>86,4</u>	<u>9,4</u>	<u>8,1</u>			<u>356</u>
Seigle					<u>87,3</u>	<u>10,3</u>	<u>9,0</u>			<u>319</u>
orge		<u>86</u>	<u>10</u>		<u>86,7</u>	<u>11,6</u>	<u>10,1</u>			<u>332</u>
Avoine					<u>88,1</u>	<u>11,1</u>	<u>9,8</u>			<u>385</u>
Sorgho		<u>86</u>	<u>10</u>		<u>86,5</u>	<u>10,9</u>	<u>9,4</u>			<u>343</u>
Triticale		<u>87,3</u>	<u>9,6</u>		<u>87,3</u>	<u>11</u>	<u>9,6</u>			<u>327</u>
Autres Céréales								<u>86,5</u>	<u>10</u>	<u>340</u>
Riz				riz cargo	<u>87,4</u>	<u>9,2</u>	<u>8,0</u>			<u>280</u>
Colza		<u>90</u>	<u>19,8</u>		<u>92,2</u>	<u>20,7</u>	<u>19,1</u>			<u>494</u>
Tournesol					<u>93</u>	<u>17,2</u>	<u>16,0</u>			<u>308</u>
Soja		<u>90</u>	<u>35,4</u>	graine de soja extrudée	<u>88,1</u>	<u>39,5</u>	<u>34,8</u>			<u>335</u>
Lin					<u>90,3</u>	<u>25</u>	<u>22,6</u>			<u>498</u>
Autres oléagineux								<u>90</u>	<u>20</u>	<u>387</u>
fèves & fèves		<u>86,5</u>	<u>24,9</u>	fèves à fleurs blanches	<u>86,1</u>	<u>31,1</u>	<u>26,8</u>			<u>343</u>
Pois		<u>86</u>	<u>20,7</u>		<u>86,4</u>	<u>23,9</u>	<u>20,6</u>			<u>346</u>
Lupin				lupin blanc	<u>88,6</u>	<u>38,5</u>	<u>34,1</u>			<u>390</u>
Autres légumes secs								<u>86,5</u>	<u>27</u>	<u>350 (est.)</u>
Betteraves	pulpes de betteraves déshydratées	90	8,8	betteraves sucrières	<u>23,2</u>	8,4	<u>1,9</u>			70
Pommes de terre					20	2,16	<u>0,4</u>			67
Maïs fourrage				Ensilage Plante entière (maïs)	<u>Valeurs déjà en MS dans la SAA</u>	<u>7</u>	-			<u>445,7 (est.)</u>
Autres fourrages					<u>Valeurs déjà en MS dans la SAA</u>		-	<u>7 (% de la MS)</u>		<u>445,7 (est.)</u>

Les valeurs soulignées correspondent aux coefficients qui ont été utilisés dans les calculs pour convertir les volumes produits en MS, MAT et Energie

⁵ Estimation à dire d'experts : pour les catégories impliquant « Autres » de la statistique agricole, un coefficient moyen a été estimé à partir des valeurs disponibles pour les produits inclus dans chaque catégorie, selon leur disponibilité et leur importance relative estimée.

2. Calcul de l'indicateur de la part de la production végétale permise par les SE de fourniture en azote et de restitution de l'eau aux plantes cultivées

Les systèmes de culture ont été simulés à l'aide du modèle STICS selon deux modalités : l'une considérant les apports d'intrants actuels, l'autre considérant un apport d'intrant nul (voir introduction de la partie 3, section C). Des couples simulation avec intrant et simulation sans intrant sont ainsi formés pour les cultures de rente. Les simulations des systèmes de culture actuels à rendement faibles sont éliminées (rendement inférieur à 0.5 T/ha pour toutes les cultures sauf le maïs fourrage, rendement en matière sèche inférieur à 4 T/ha pour le maïs fourrage), ainsi que les cas où le rendement sans intrant est supérieur au rendement avec intrant. Le pourcentage de production permis par les SE est calculé comme suit pour chaque récolte :

- Cultures hors maïs fourrage : $pct_rdt_permis_par_se = mafruit_n0/mafruit_n1*100$
- Maïs fourrage : $pct_rdt_permis_par_se = masec_n_n0/masec_n_n1*100$

avec :

- o $pct_rdt_permis_par_se$: Le pourcentage de production permis par les SE
- o $mafruit_n0$: rendement en matière sèche des organes récoltés pour les systèmes de culture sans intrants
- o $mafruit_n1$: rendement en matière sèche des organes récoltés pour les systèmes de culture actuels
- o $masec_n_n0$: matière sèche de surface pour les systèmes de culture sans intrants
- o $masec_n_n1$: matière sèche de surface pour les systèmes de culture actuels

Ce pourcentage de production permis par les SE est ensuite moyenné par culture et par simulation pour obtenir une valeur moyennée sur 30 ans par simulation pour chaque culture simulée, à la résolution de l'UPC. Dans le cas d'un calcul par culture, la valeur de l'indicateur à la résolution de l'UPC est calculée comme suit (cas d'une UPC dans laquelle sont simulées deux séquences et caractérisée par deux UTS) :

$$\begin{aligned}
 Val_{UPC-ci} = & \left([Val_{UTS1-seq1-Nmin-ci} \times Poids_{ParcNmin-seq1} + Val_{UTS1-seq1-Norg-ci} \times Poids_{ParcNorg-seq1}] \right. \\
 & \times Poids_{seq1-ci-UPC} \\
 & + [Val_{UTS1-seq2-Nmin-ci} \times Poids_{ParcNmin-seq2} + Val_{UTS1-seq2-Norg-ci} \\
 & \times Poids_{ParcNorg-seq2}] \times Poids_{seq2-ci-UPC) \times Poids_{UTS1} \\
 & + ([Val_{UTS2-seq1-Nmin-ci} \times Poids_{ParcNmin-seq1} + Val_{UTS2-seq1-Norg-ci} \\
 & \times Poids_{ParcNorg-seq1}] \times Poids_{seq1-ci-UPC} \\
 & + [Val_{UTS2-seq2-Nmin-ci} \times Poids_{ParcNmin-seq2} + Val_{UTS2-seq2-Norg-ci} \\
 & \times Poids_{ParcNorg-seq2}] \times Poids_{seq2-ci-UPC) \times Poids_{UTS2}
 \end{aligned}$$

Avec :

- Val_{UPC-ci} : Valeur de l'indicateur pour la culture i pour une UPC donnée
- $Val_{UTS-seq-ferti-ci}$: valeur de la sortie STICS pour la culture i , pour une UTS donnée, une séquence donnée et un type de fertilisation donné
- $Poids_{ParcNmin-seq}$: poids de la fertilisation minérale pour une séquence donnée
- $Poids_{ParcNorg-seq}$: poids de la fertilisation organique pour une séquence donnée
- $Poids_{UTS}$: poids d'une UTS donnée dans l'unité cartographique de sol (UCS) de l'UPC
- $Poids_{seq-ci-UPC}$: poids de la séquence simulée contenant la culture ci par rapport à l'ensemble des séquences simulées contenant la culture ci dans l'UPC

Cette valeur obtenue à la résolution de l'UPC est ensuite agrégée à la résolution de la PRA. La formule pour le changement d'échelle vers une PRA à deux UPC (chaque UPC étant caractérisée par deux UTS et deux séquences simulées) est la suivante :

$$\begin{aligned}
Val_{PRA-ci} = & \left[\left(\left[Val_{UTS1-seq1-Nmin-ci} \times Poids_{ParcNmin-seq1} + Val_{UTS1-seq1-Norg-ci} \times Poids_{ParcNorg-seq1} \right] \right. \right. \\
& \times Poids_{seq1-ci-UPC1} \\
& + \left[Val_{UTS1-seq2-Nmin-ci} \times Poids_{ParcNmin-seq2} + Val_{UTS1-seq2-Norg-ci} \right. \\
& \times Poids_{ParcNorg-seq2} \left. \right] \times Poids_{seq2-ci-UPC1} \left. \right) \times Poids_{UTS1} \\
& + \left(\left[Val_{UTS2-seq1-Nmin-ci} \times Poids_{ParcNmin-seq1} + Val_{UTS2-seq1-Norg-ci} \right. \right. \\
& \times Poids_{ParcNorg-seq1} \left. \right] \times Poids_{seq1-ci-UPC1} \\
& + \left[Val_{UTS2-seq2-Nmin-ci} \times Poids_{ParcNmin-seq2} + Val_{UTS2-seq2-Norg-ci} \right. \\
& \times Poids_{ParcNorg-seq2} \left. \right] \times Poids_{seq2-ci-UPC1} \left. \right) \times Poids_{UTS2} \left. \right) * Poids_{UPC1-ci-PRA} \\
& + \left(\left[\left(Val_{UTS1-seq1-Nmin-ci} \times Poids_{ParcNmin-seq1} + Val_{UTS1-seq1-Norg-ci} \right. \right. \right. \\
& \times Poids_{ParcNorg-seq1} \left. \right] \times Poids_{seq1-ci-UPC2} \\
& + \left[Val_{UTS1-seq2-Nmin-ci} \times Poids_{ParcNmin-seq2} + Val_{UTS1-seq2-Norg-ci} \right. \\
& \times Poids_{ParcNorg-seq2} \left. \right] \times Poids_{seq2-ci-UPC2} \left. \right) \times Poids_{UTS1} \\
& + \left(\left[\left(Val_{UTS2-seq1-Nmin-ci} \times Poids_{ParcNmin-seq1} + Val_{UTS2-seq1-Norg-ci} \right. \right. \right. \\
& \times Poids_{ParcNorg-seq1} \left. \right] \times Poids_{seq1-ci-UPC2} \\
& + \left[Val_{UTS2-seq2-Nmin-ci} \times Poids_{ParcNmin-seq2} + Val_{UTS2-seq2-Norg-ci} \right. \\
& \times Poids_{ParcNorg-seq2} \left. \right] \times Poids_{seq2-ci-PRA} \left. \right) \times Poids_{UTS2} \left. \right) * Poids_{UPC2-ci-PRA}
\end{aligned}$$

Avec :

- Val_{PRA-ci} : Valeur de l'indicateur pour la culture i pour une PRA donnée
- $Val_{UTS-seq-ferti}$: valeur de la sortie STICS pour une UTS donnée, une séquence donnée et un type de fertilisation donné
- $Poids_{ParcNmin-seq}$: poids de la fertilisation minérale pour une séquence donnée
- $Poids_{ParcNorg-seq}$: poids de la fertilisation organique pour une séquence donnée
- $Poids_{UTS}$: Poids d'une UTS donnée dans l'unité cartographique de sol (UCS) de l'UPC
- $Poids_{seq-ci-UPC}$: poids de la séquence simulée par rapport à l'ensemble des séquences simulées dans l'UPC
- $Poids_{UPC-ci-PRA}$: poids des surfaces de séquences simulées dans l'UPC par rapport aux surfaces de séquences simulées dans la PRA

Un seuil de 25% est appliqué aux fertilisations : si le poids d'un des types de fertilisation (minéral ou organique) est inférieur à 25%, il est mis à zéro et le poids de l'autre type de fertilisation devient égal à 100%.

En pratique, on calcule le poids de chaque simulation dans l'UPC et dans la PRA pour les systèmes de culture actuels (N111) mais aussi pour les systèmes sans intrants (N010), sans fertilisation (N011) et sans irrigation (N110). Puis on additionne le produit de ce poids respectivement dans l'UPC ou dans la PRA et de la valeur à pondérer par UPC ou par PRA pour tous les individus d'un même système de culture.

Annexe 10-B. Note technique pour le calcul de la production de biens animaux

Coordination : Laurence Puillet

Mise en œuvre de l'évaluation : Thomas Poméon, Laurence Puillet, Anne Meillet, Elise Maigné, João Pedro Domingues, Camille Dross, Thomas Puech,

Cartographie : Thomas Poméon, Benoît Garcia

Traitement des résultats en vue de leur analyse : Laurence Puillet

A. Principes généraux.....	842
A-1. Démarche globale	842
A-2. Options méthodologiques globales	844
A-3. Bases de données utilisées	845
B. Calcul de la production physique totale de biens animaux à la résolution PRA	846
B-1. Production de lait à la résolution PRA.....	846
B-2. Production d'œufs à la résolution PRA	847
B-3. Production de viande des ovins, caprins, porcins et de volailles à la résolution PRA.....	847
B-4. Production de viande et d'animaux vifs pour la filière bovine à la résolution PRA	848
C. Calcul de la production de biens animaux sur ressources propres de l'écosystème à la résolution PRA ...	849
C-1. Approche générale.....	849
C-2. Calcul de l'offre de matières premières végétales disponibles pour l'alimentation animale (AA) à la résolution PRA.....	849
C-3. Calcul des consommations de MPV au niveau PRA	854
C-4. Calcul de la production sur ressources propres de l'écosystème de la PRA	858
D. Bases de données mobilisées.....	860
E. Références.....	865
F. Compléments	866

A. Principes généraux

A-1. Démarche globale

La méthode développée dans EFESE-écosystèmes agricoles s'appuie sur la notion de **production de biens animaux sur ressources propres de l'écosystème** (PA_{rp}), qui représente la production de biens animaux permise par la production végétale locale d'un territoire donné. Cette notion met l'accent sur la dépendance des biens animaux vis-à-vis des biens végétaux et prend en compte la capacité du territoire à satisfaire la consommation alimentaire de la population animale présente sur le territoire.

La production de biens animaux sur ressources propres de l'écosystème permet d'approcher une production animale **potentielle**, c'est-à-dire une production **réalisée à partir des matières premières végétales (MPV) produites dans l'écosystème**.

Dans ce qui suit nous exposons la démarche de calcul de la production de biens animaux sur ressources propres de l'écosystème (PA_{rp}) à la résolution de la Petite Région Agricole (PRA). L'indicateur est défini pour une PRA p selon :

$$PA_{rp,p} = PA_{tot,p} \cdot \alpha_p \quad [1]$$

avec

- $PA_{tot,p}$ la production totale de biens animaux de la PRA p . Celle-ci agrège la production de lait et de viande (animaux abattus) issus des ruminants (bovins, ovins et caprins), la production d'animaux d'élevage issus des bovins (animaux vendus vivants), la production de viande (animaux abattus) et d'œufs issus des monogastriques (volailles et porcins) ;
- α_p exprime la **capacité du territoire** de la PRA p à **satisfaire la consommation de MPV de tous les animaux présents**. Cette capacité prend la forme d'un ratio entre l'offre végétale de la PRA et la consommation de matière végétale par les animaux présents dans la PRA. La capacité est calculée en matière sèche ($\alpha_{p,MS}$) et en matière azotée ($\alpha_{p,MAT}$) et c'est la capacité de la matière la plus limitante qui est retenue.

La variable α_p est donc calculée selon :

$$\alpha_p = \min(1, \alpha_{p,MS}, \alpha_{p,MAT}) \quad [2]$$

La valeur de α_p est bornée à 1 car la production sur ressources propres de l'écosystème ne peut pas excéder la production physique totale. Une valeur de α_p inférieure à 1 indique que les MPV disponibles pour l'alimentation des animaux sont insuffisantes pour couvrir la consommation des animaux de la PRA et que la production de biens animaux a mobilisé des MPV issues d'autres PRA ou régions du globe.

La figure 1 illustre la conceptualisation des étapes pour la mise en œuvre de l'évaluation de la fourniture de biens animaux. Les surfaces végétales de la PRA produisent une offre de MPV au champ à partir de laquelle se construit un disponible de MPV pour l'alimentation animale. Ce disponible pour l'alimentation animale rapporté à la consommation de MPV par les animaux de cette même PRA aboutit à la variable α_p . Celle-ci est alors utilisée pour pondérer la production totale de biens animaux. Comme le montre la figure 1 la variable α_p nécessite de comptabiliser l'ensemble des consommations de MPV des animaux ruminants et monogastriques présents au sein de la PRA, indépendamment de leurs interactions directes ou indirectes avec les surfaces végétales. La PRA est considérée comme un système fermé : l'offre de MPV est strictement générée par les surfaces de la PRA.

Les surfaces végétales de l'écosystème agricole ont été regroupées pour représenter trois types de flux de MPV disponibles pour l'alimentation des animaux (figure 1) :

- i) un flux de MPV générant des aliments concentrés (F_1) ;
- ii) un flux de MPV issu de la transformation par les industries sous forme de coproduits ou de tourteaux (F_2) ;
- iii) un flux de MPV correspondant aux fourrages (F_3).

Le flux F_1 agrège 16 MPV: blé tendre, blé dur, maïs grain, orge et escourgeon, seigle, avoine, méteil, triticale, sorgho, mélanges de céréales, pois protéagineux et secs, fèves et fèveroles, lupins, colza, tournesol, soja et lin. Il est calculé en matière sèche (MS) et en matière azotée (MAT) en multipliant la production brute au champ de chaque MPV par un coefficient λ_i qui correspond à sa disponibilité pour l'alimentation animale.

Le flux F_2 agrège 7 MPV issues de la transformation de cultures par l'industrie (Tableau 1). Il est calculé en MS et en MAT en multipliant la production brute au champ de chaque MPV par un coefficient γ_j qui correspond à la fois à un taux d'utilisation de la production brute au champ dans l'industrie, au rendement de transformation de la MPV et à la disponibilité du coproduit pour l'alimentation animale.

Le flux F_3 agrège 6 MPV correspondant à des fourrages (prairies artificielles, prairies temporaires, prairies naturelles, surfaces peu productives toujours en herbe, maïs fourrage et autres fourrages annuels). Ces fourrages sont exprimés directement en MS et sont consommés uniquement par les ruminants (disponibilité égale à 1).

Figure 1. Représentation schématique du concept de production de biens animaux sur ressources propres de l'écosystème (PA_{rp}). La PA_{rp} découle de la production totale de biens animaux (PA_{tot}) pondérée par la capacité du territoire à satisfaire la consommation en matière végétale de tous les animaux présents (α_p) où α_p est le ratio entre l'offre végétale disponible pour l'alimentation animale (MPV_{AA}) et la consommation de matière végétale par le cheptel (MPV_c) présent sur le territoire.

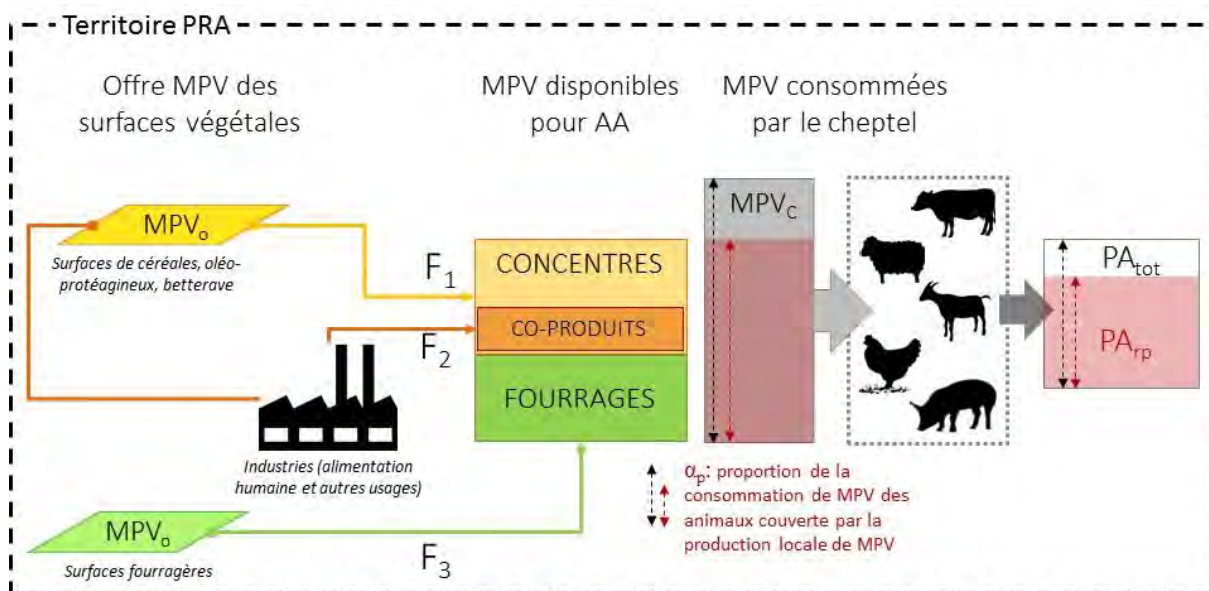


Tableau 1. Description de la composition du flux d'offre de MPV issues de la transformation par l'industrie (F_2) des quantités brutes produites par les surfaces de la PRA p

Culture	MPV
Blé tendre	Issues de meunerie
Maïs grain	Corn Gluten Feed Gluten 60
Colza	Tourteaux de colza
Tournesol	Tourteaux de tournesol
Soja	Tourteaux de soja
Betterave	Pulpes de betterave Mélasse
Prairies artificielles	Luzerne déshydratée

La formule ci-dessous détaille le calcul de la variable α_p en considérant les trois types de flux de MPV qui configurent le disponible pour l'alimentation animale :

$$\alpha_p = \min\left(1, \frac{\sum MPV_{o_i,p} \cdot \delta_{i,MS} + \sum MPV_{o_j,p} \cdot \gamma_{j,MS} + \sum MPV_{o_k,p} \cdot \tau_{k,MS}}{\sum MPV_{c_{l,p,MS}}}, \frac{\sum MPV_{o_i,p} \cdot \delta_{i,MAT} + \sum MPV_{o_j,p} \cdot \gamma_{j,MAT} + \sum MPV_{o_k,p} \cdot \tau_{k,MAT}}{\sum MPV_{c_{l,p,MAT}}}\right) \quad [3]$$

avec

- $MPV_{o_i,p}$ la quantité brute de MPV i produite par les surfaces végétales de la PRA p et utilisées comme aliments concentrés pour l'alimentation animale
- $MPV_{o_j,p}$ la quantité brute de MPV j produite par les surfaces végétales de la PRA p , utilisée dans l'industrie et générant des coproduits (dont les tourteaux) utilisés en alimentation animale
- $MPV_{o_k,p}$ la quantité brute de MPV k produite par les surfaces végétales de la PRA p et utilisées comme fourrages pour l'alimentation animale
- $\delta_{i,MS}$ le coefficient de conversion des quantités brutes en quantités de matière sèche (MS) de chaque MPV i qui correspond à une disponibilité de MS de la MPV i pour l'alimentation animale
- $\delta_{i,MAT}$ le coefficient de conversion des quantités brutes en quantités de matières azotées totales (MAT) de chaque MPV i qui correspond à une disponibilité de MAT de la MPV i pour l'alimentation animale
- $\gamma_{j,MS}$ le coefficient de conversion des quantités brutes en quantités de matière sèche (MS) de chaque MPV j qui est à l'origine d'un coproduit pour l'alimentation animale (Tableau 1)
- $\gamma_{j,MAT}$ le coefficient de conversion des quantités brutes en quantités de matières azotées totales (MAT) de chaque MPV j qui est à l'origine un coproduit pour l'alimentation animale (Tableau 1)
- $\tau_{k,MS}$ le coefficient de conversion des quantités brutes en quantités de matière sèche (MS) de chaque MPV k qui correspond à une disponibilité de fourrages pour l'alimentation animale
- $\tau_{k,MAT}$ le coefficient de conversion des quantités brutes en quantités de matières azotées totales (MAT) de chaque MPV k qui correspond à une disponibilité de fourrages pour l'alimentation animale
- $MPV_{c_{l,p,MS}}$ les quantités, en MS, de MPV l consommées par les animaux de la PRA p ;
- $MPV_{c_{l,p,MAT}}$ les quantités, en MAT, de MPV l consommées par les animaux de la PRA p .

A-2. Options méthodologiques globales

Plusieurs options méthodologiques ont été retenues :

- **Type de production animale** prise en compte : la production animale issue du cheptel de monogastriques et de ruminants. Quatre grands types de produits animaux sont considérés : le lait, la viande (issue d'animaux abattus), les œufs et les animaux d'élevage. Le cheptel français considéré dans cette étude comprend les bovins, porcins, volailles, ovins et caprins. Les petites filières (lapin, poisson, gibier) ainsi que la filière équine (1 millions de têtes inégalement réparties sur le territoire) n'ont pas été considérées.

- **Le calcul des effectifs** par catégorie d'animaux (espèce, sexe, âge, fonction) se base sur l'**effectif instantané** qui représente le nombre d'animaux, en nombre de têtes, présent dans les exploitations en fin d'année i.e. autour du 30 novembre de chaque année. L'effectif instantané est disponible dans la statistique agricole, que ce soit dans le RA2010 ou la SAA. Il est utilisé pour les différents indicateurs présentés ci-dessous dont le calcul inclut un effectif, que ce soit les indicateurs de production (ramenée aux effectifs de femelles reproductrices) ou la consommation de matière première végétale par les animaux (basée sur l'effectifs d'animaux nourris par an et par territoire). Le choix de l'effectif instantané se base sur une comparaison des différentes méthodes de calcul des effectifs¹. Une note de synthèse (complément 1) compare les résultats de quatre méthodes appliquées aux effectifs bovins de deux départements (Aveyron et Vendée). Elle montre que l'effectif instantané implique le moins d'hypothèses et d'incertitudes mais tendrait à sous-estimer les effectifs présents tout au long de l'année, et donc la consommation alimentaire totale par les animaux.

¹ Quatre méthodes ont été comparées : (i) effectif instantané ; (ii) effectif net (iii) effectif moyen présent (iv) effectif présent du SEEA AFF (FAO 2015).

- **Les unités de mesure** utilisées pour comptabiliser les biens animaux sont la quantité brute (T équivalent-carcasse pour la viande et les animaux vifs, hl pour le lait et milliers d'unités pour les œufs) et la quantité de protéines, éventuellement rapportées aux ha de SAU. La conversion des quantités brutes en quantités de protéines (complément 2) s'appuie sur les tables de conversion FAO (2003) et ANSES (2013).

- L'évaluation de la production de biens animaux mobilise les résultats de l'évaluation de la fourniture de **biens végétaux à l'échelle PRA, à savoir les quantités brutes de matière sèche** (1000 T), résultant des rendements départementaux et des superficies des cultures suivantes : blé dur, blé tendre, maïs grain, orge, sorgho, triticale, seigle, mélanges de céréales, fèverole, colza, soja, pois, tournesol, betterave, maïs fourrager, autres fourrages annuels, prairies temporaires, prairies artificielles (dont luzerne déshydratée), prairies permanentes (productives), surfaces toujours en herbe peu productive.

- L'évaluation est réalisée à partir des données disponibles pour les **années 2010-2011-2012**. Les indicateurs produits représentent une moyenne des indicateurs calculés pour ces 3 années. Ce choix permet de tenir compte des contraintes de disponibilité des données et de rester cohérent avec l'ensemble du dispositif EFESE-écosystèmes agricoles. Il permet également de lisser les spécificités annuelles (aléas climatiques, crises sanitaires ou autres facteurs).

A-3. Bases de données utilisées

La description détaillée des bases de données utilisées est présentée en fin de document.

- Les données mobilisées pour les effectifs et les productions physiques (lait, viande et œufs) sont celles de la Statistique Annuelle Agricole (SAA) produite par le Service de la Statistique et Prospective (SSP) du ministère de l'agriculture. Les différentes données sont disponibles annuellement et téléchargeables sur la plateforme DISAR², à la résolution France/Région/Département.
- A la résolution PRA, les données d'effectifs mobilisées sont celles du recensement agricole 2010 (RA 2010)
- Les données relatives à la production de viande bovine (animaux abattus et vendus en vif) sont celles de la base de données nationales d'identification (BDNI) et de la base de données NormaBEV.
- Les effectifs par catégorie de ruminants ont été estimés grâce à une procédure mise en œuvre par l'UMR SAD-APT (Dross, 2016) appliquée aux données du RA 2010 (obtenues via la plateforme DISAR)
- Les effectifs par catégorie de monogastriques ont été estimés grâce à une procédure mise en œuvre par l'ODR (E. Maigné) et appliquée aux données de T. Puech (extraction CASD RA 2010).

Les données comportent du secret statistique, qui a été géré en le reportant sur les valeurs d'effectifs les plus faibles. Pour les effectifs par catégorie d'animaux au niveau des PRA, les valeurs secrètes ont été estimées à partir de procédures de redistribution des valeurs résiduelles (i.e. la différence entre la valeur connue à un niveau agrégé supérieur et la somme des valeurs au niveau inférieur) entre les entités concernées.

Les coefficients Agreste³ établis en 2010 sont utilisés pour convertir les effectifs d'animaux en UGB. Ils permettent de calculer 4 types d'UGB : UGB alimentation grossière (UGB_{AG}, uniquement pour les herbivores), UGB alimentation totale, UGB PAC (utilisée pour calculer les chargements dans le cadre de la PAC) et les UGB Eurostat. Nous utilisons les UGB alimentation totale (UGB_{AT}), qui sont définis pour l'ensemble des catégories animales, contrairement aux UGB alimentation grossière (herbivores uniquement), pour pouvoir exprimer les effectifs animaux dans la même unité. La procédure de Dross (2016) a été appliquée sur des effectifs de ruminants en nombre de têtes. En utilisant les coefficients de conversion en UGB_{AT} et en UGB_{AG}, nous avons pu déterminer un coefficient de conversion UGB_{AT}/UGB_{AG} pour les bovins (1.30 UGB_{AT}/UGB_{AG}), les ovins (1.73 UGB_{AT}/UGB_{AG}) et les caprins (1.25 UGB_{AT}/UGB_{AG}).

² <https://stats.agriculture.gouv.fr/disar/>

³ http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/calcul_UGB.pdf

B. Calcul de la production physique totale de biens animaux à la résolution PRA [$PA_{tot,p}$]

La production physique totale de biens animaux à la résolution PRA, $PA_{tot,p}$, correspond à la somme de la production de lait des bovins, ovins et caprins, de la production de viande issue des animaux abattus (bovins, ovins, caprins, volailles et porcins), de la production de bovins vendus en vif et de la production d'œufs des poules pondeuses (œufs à couver et de consommation).

B-1. Production de lait à la résolution PRA [$PA_{lait,p}$]

Cet indicateur est calculé par espèce (bovins, ovins et caprins) pour chaque PRA en désagrégant les données de production laitière disponibles au niveau du département d , proportionnellement aux effectifs laitiers de la PRA. La production laitière inclue les livraisons à l'industrie et les ventes directes de lait entier et utilisation à la ferme. La quantité de lait pour l'année i à la résolution PRA est estimée par :

$$PA_{lait_{espece},p,i} = UGB_{lait_{espece},p,i} * \left(\frac{PA_{lait_{espece},d,i}}{UGB_{lait_{espece},d,i}} \right) \quad [4]$$

avec

$PA_{lait_{espece},d,i}$ la production de lait de l'espèce considérée dans le département d pour l'année i en HL

$UGB_{lait_{espece},p,i}$ le total des UGB laitiers de l'espèce considérée (en UGB_{AG}) dans la PRA p pour l'année i

$UGB_{lait_{espece},d,i}$ le total des UGB laitiers de l'espèce considérée (en UGB_{AG}) dans le département d pour l'année i

Pour réaliser les calculs à la résolution PRA, l'approche retenue pose comme hypothèse une homogénéité de la productivité laitière entre les PRA d'un même département. Cette hypothèse crée un biais important dans les départements avec étagement altitudinal où les écarts de productivité laitière sont importants.

Les UGB laitiers, au niveau département ou PRA, correspondent aux effectifs de femelles de plus de 1 an dans l'espèce considérée. Pour les bovins, il s'agit des vaches laitières, des génisses laitières de renouvellement de 1 à 2 ans et des génisses laitières de renouvellement de plus de 2 ans. Pour les catégories d'âge de moins de 1 an, les données ne permettent pas de distinguer les animaux du troupeau laitier des animaux du troupeau allaitant. Pour les ovins, les effectifs considérés sont les brebis mères laitières. Pour les catégories d'âge de moins de 1 an, les données ne permettent pas de distinguer les animaux du troupeau laitier (en l'occurrence les agnelles laitières de renouvellement) des autres animaux. Enfin, pour les caprins, il s'agit des chèvres suitées et chevrettes de renouvellement.

Les données de la SAA permettent de calculer les UGB laitiers du département ($UGB_{lait_{espece},d,i}$) et la production laitière du département ($PA_{lait_{espece},d,i}$). Les UGB laitiers de la PRA p pour l'année i ($UGB_{lait_{espece},p,i}$) sont obtenus en désagrégant les effectifs du département d auquel appartient la PRA p avec la clé calculée sur la base du RA 2010 (proportion des effectifs totaux du département localisés dans la PRA p) :

$$UGB_{lait_{espece},p,i} = UGB_{lait_{espece},d,i} * \frac{UGB_{lait_{espece},p,2010}}{UGB_{lait_{espece},d,2010}} \quad [5]$$

La production de lait à la résolution PRA pour une espèce donnée est ensuite calculée en faisant la moyenne des années 2010, 2011 et 2012. Enfin, les productions de lait moyennes de chaque espèce sont converties en quantités de protéines et agrégées dans la variable $PA_{lait,p}$. La conversion des volumes de lait en quantités de protéines pour chaque espèce a utilisé les densités et les teneurs en protéines présentées dans le complément 2.

B-2. Production d'œufs à la résolution PRA [$PA_{oeuf,p}$]

Cet indicateur est calculé pour les volailles à la résolution PRA en désagrégant les données de production disponibles à la résolution région. Ces données ne concernent que les élevages professionnels. La quantité d'œufs pour l'année i à la résolution PRA est donnée par :

$$PA_{oeuf,p,i} = UGB_{oeuf,p,i} \cdot \frac{PA_{oeuf,d,i}}{UGB_{oeuf,r,i}} \quad [6]$$

Avec

$UGB_{oeuf,p,i}$ le total des UGB_{oeuf} de la PRA p en UGB_{AT} pour l'année i

$UGB_{oeuf,d,i}$ le total des UGB_{oeuf} de la région r auquel appartient la PRA p en UGB_{AT} pour l'année i

$PA_{oeuf,r,i}$ la production d'œufs des UGB_{oeuf} de la région r en milliers d'unités pour l'année i

Les UGB_{oeuf} correspondent aux effectifs de poules pondeuses produisant des œufs de consommation et aux effectifs de poules pondeuses produisant des œufs à couver. Les effectifs d'autres espèces produisant des œufs (cailles, cannes,...) ne sont pas considérés.

Les données de la SAA permettent de calculer les UGB_{oeuf} de la région ($UGB_{oeuf,d,i}$) pour l'année considérée et la production d'œufs de la région ($PA_{oeuf,r,i}$). Les UGB_{oeuf} de la PRA p pour l'année i ($UGB_{oeuf,p,i}$) sont obtenus en désagrégant les effectifs de la région r auquel appartient la PRA p avec la clé calculée sur la base du RA 2010 (proportion des effectifs totaux du département localisés dans la PRA p) :

$$UGB_{oeuf,p,i} = UGB_{oeuf,d,i} \cdot \frac{UGB_{oeuf,p,2010}}{UGB_{oeuf,r,2010}}$$

Les productions des années 2010, 2011 et 2012 sont ensuite moyennées et converties en quantités de protéines ($PA_{oeuf,p}$ en T de protéines) sur la base des valeurs présentées dans le complément 2.

B-3. Production de viande des ovins, caprins, porcins et de volailles à la résolution PRA [$PA_{viande,p}$]

Cet indicateur est calculé par espèce: ovins, caprins, porcins et volailles. Il correspond aux quantités de viande issues des abattages d'animaux (Tec). Contrairement aux bovins (voir section D), les animaux vendus en vif pour l'exportation ou pour la reproduction ne sont pas considérés. Les flux d'animaux entre département ou PRA ne sont pas considérés.

La quantité de viande à la résolution PRA est donnée par :

$$PA_{viande_{espece},p,i} = UGB_{viande_{espece},p,i} * \left(\frac{PA_{viande_{espece},d,i}}{UGB_{viande_{espece},d,i}} \right) \quad [7]$$

avec

$UGB_{viande_{espece},p,i}$ le total des UGB_{viande} de la PRA p pour l'année i

$UGB_{viande_{espece},d,i}$ le total des UGB_{viande} de l'espèce considérée dans le département d pour l'année i

$PA_{viande_{espece},d,i}$ la production de viande issue d'animaux abattus de l'espèce considérée dans le département d pour l'année i

Pour les ovins, les UGB_{viande} correspondent aux effectifs de brebis mères (nourrices et laitières) et d'agnelles (pour le renouvellement). Pour les caprins, les UGB_{viande} correspondent aux effectifs de chèvres suitées et aux chevrettes.

Pour les porcins les UGB_{viande} correspondent aux effectifs de porcelets, de porcs charcutiers et d'animaux de réforme (trouilles et verrats).

Pour les volailles, les UGB_{viande} correspondent aux effectifs de poulets de chair et coqs, de poulettes, de poules pondeuses (œufs à couver et œufs de consommation), de pintades, de canards (gras et à rôti) et de dindes. Pour

les volailles, la SAA ne fournit des statistiques sur la production qu'au niveau région. Dans ce cas, ce n'est donc pas le département qui sert de point de départ et de référence pour la désagrégation, mais bien la région (comme dans le cas de la production d'œuf).

Les données de la SAA permettent de calculer les UGB_{viande} du département ($UGB_{viande_{espece,d,i}}$) pour l'année et l'espèce considérées ainsi que la production de viande de l'espèce au niveau du département ($PA_{viande_{espece,d,i}}$). Les UGB_{viande} de la PRA p pour l'année i ($UGB_{viande_{espece,p,i}}$) sont obtenus en désagrégant les effectifs du département d auquel appartient la PRA p avec la clé calculée sur la base du RA 2010 (proportion des effectifs totaux du département localisés dans la PRA p) :

$$UGB_{viande_{espece,p,i}} = UGB_{viande_{espece,d,i}} \cdot \frac{UGB_{viande_{espece,p,2010}}}{UGB_{viande_{espece,d,2010}}} \quad [8]$$

Les productions des années 2010, 2011 et 2012 sont moyennées pour chaque espèce. Les productions moyennes des espèces sont ensuite converties en quantités de protéines sur la base des valeurs présentées dans le complément 2 et agrégées dans la variable $PA_{viande,p}$ (T de protéines).

B-4. Production de viande et d'animaux vifs pour la filière bovine à la résolution PRA [$PA_{bovins,p}$]

Les bovins fournissent à la fois de la viande (issue des abattages) et également des animaux vifs destinés à l'export d'animaux vivants ou à la vente de reproducteurs. Les données relatives à ces productions bovines ont été estimées pour l'année 2010 à la résolution PRA par l'Idel de la façon suivante:

Abattages d'animaux issus de la PRA + exportations en vif (traduites en équivalent carcasse) de la PRA (vers d'autres PRA françaises ou l'étranger) – importations en vif dans la PRA + stock au 31/12/2010 – stock au 01/01/2010.

Les abattages sont connus en kg de carcasse grâce aux données de la base Normabev. Toutes les autres données sont estimées à partir de la race, du sexe et de l'âge des animaux exportés, importés, ou présents en début ou fin de période. Cette estimation a été réalisée grâce à la modélisation de courbes de croissance par race et par sexe, à partir des données d'abattage, des données du contrôle de performances (Bovins croissance ; Poids à la naissance, PAT 120 j), des rendements par race et catégorie animale. Grâce à la collaboration de C. Perrot, les données de 2010 ont pu être utilisées et ensuite été extrapolées pour les années 2011 et 2012 sur la base de l'évolution des effectifs départementaux par rapport à l'année de référence 2010 (sous hypothèse donc d'une productivité par UGB constante dans le temps). Elles ont été converties en quantités de protéines sur la base des valeurs présentées dans le complément 2.

Au terme des étapes de calcul présentées dans les sections A, B, C et D, nous disposons de toutes les variables pour pouvoir calculer la production physique totale de biens animaux de la PRA p :

$$PA_{tot,p} = PA_{oeuf,p} + PA_{lait,p} + PA_{viande,p} + PA_{bovins,p} \quad [9]$$

C. Calcul de la production de biens animaux sur ressources propres de l'écosystème à la résolution PRA ($PA_{rp,p}$)

C-1. Approche générale

L'enjeu est d'élaborer les variables permettant de calculer le ratio α_p . Ce ratio est utilisé pour calculer la production de biens animaux sur ressources propres de l'écosystème à partir de la production physique totale à la résolution PRA. α_p exprime la part des MPV consommées par les animaux de la PRA p qui est fournie par les MPV produites dans la PRA p, suivant la formule :

$$\alpha_p = \min\left(1, \frac{\sum MPV_{oi,p} \cdot \delta_{i,MS} + \sum MPV_{oj,p} \cdot \gamma_{j,MS} + \sum MPV_{ok,p} \cdot \tau_{k,MS}}{\sum MPV_{ci,p,MS}}, \frac{\sum MPV_{oi,p} \cdot \delta_{i,MAT} + \sum MPV_{oj,p} \cdot \gamma_{j,MAT} + \sum MPV_{ok,p} \cdot \tau_{k,MAT}}{\sum MPV_{ci,p,MAT}}\right) \quad [3]$$

Le calcul α_p nécessite donc de connaître d'une part la production de MPV disponibles pour l'alimentation animale (AA) à partir des surfaces végétales de la PRA p (section B) et d'autre part la consommation de MPV par les animaux de la PRA p (section C).

C-2. Calcul de l'offre de matières premières végétales disponibles pour l'alimentation animale (AA) à la résolution PRA

Le chapitre Biens Végétaux fournit les superficies (ha) à la résolution PRA et les rendements (matière brute/ha sauf pour les surfaces fourragères qui sont exprimées en MS/ha) à la résolution PRA. Il est ainsi possible de calculer les quantités produites au champ ($MPV_{oi,p}$, $MPV_{oj,p}$ et $MPV_{ok,p}$).

Les quantités de $MPV_{oi,p}$ correspondent à des MPV qui sont intégrées dans l'alimentation des animaux en l'état ou dans des aliments composés. Les quantités de MPV disponibles pour les animaux peuvent alors être directement calculées à partir de la production au champ corrigée d'un coefficient de disponibilité pour l'alimentation animale, en MS et en MAT ($\delta_{i,MS}$ et $\delta_{i,MAT}$).

Les quantités de $MPV_{oj,p}$ correspondent à des MPV qui sont intégrées dans l'alimentation des animaux après un processus de transformation de la production brute au champ. Il s'agit des coproduits issus d'industries de transformation (industrielle ou pour l'alimentation humaine) dont une partie est disponible pour l'alimentation animale (AA). Les quantités de MPV disponibles pour les animaux sont alors calculées à partir de la production au champ, de l'utilisation de cette production par l'industrie, du rendement de transformation et enfin de la disponibilité du coproduit pour l'alimentation animale ($\gamma_{j,MS}$ et $\gamma_{j,MAT}$).

Les quantités de $MPV_{ok,p}$ correspondent aux MPV issues des fourrages. Elles sont directement exprimées en MS et uniquement consommées par les ruminants. Leur disponibilité en MS ($\tau_{k,MS}$) est donc égale à 1 et converties ensuite en MAT ($\tau_{k,MAT}$).

Calcul des coefficients pour les MPV non transformées : $\delta_{i,MS}$, $\delta_{i,MAT}$ et $\tau_{k,MAT}$

Les MPV donnant lieu à des productions consommées directement par les animaux sont les suivantes : blé tendre, blé dur, orge, avoine, seigle, triticale, maïs grain, sorgho grain, mélanges et autres céréales, colza, tournesol, soja, lin oléagineux, pois protéagineux, fèves et fèveroles, lupin.

Le coefficient $\delta_{i,MS}$ est calculé selon :

$$\delta_{i,MS} = \%MS_i \cdot \text{moyenne} \left(\frac{MB_{indigene_{AA}}}{MB_{champ}} \right)_{\substack{2009-2010, 2010-2011, \\ 2011-2012, 2012-2013}} \quad [10]$$

Avec

$\%MS_i$ la teneur en matière sèche (g/100g) de MPV i

$MB_{indigene_{AA}}$ la quantité de matière brute (1000 T) de MPV i d'origine indigène et utilisée dans l'alimentation animale

MB_{champ} la quantité de matière brute (1000 T) produite au champ

Le coefficient $\delta_{i,MAT}$ est calculé selon :

$$\delta_{i,MAT} = \%MAT_i \cdot \gamma_{MS,i} \quad [11]$$

Avec

$\%MAT_i$ la teneur en matière azotée totale (MAT) de la matière sèche (g MAT/100g MS) de MPV i

Les valeurs des coefficients $\delta_{i,MS}$ et $\delta_{i,MAT}$ sont présentés dans le tableau 2.

Les données utilisées pour $MB_{indigene_{AA}}$ et MB_{champ} proviennent des bilans d'approvisionnement Agreste et plus spécifiquement des bilans Céréales, Graines et Fruits Oléagineux et Protéagineux. Ces bilans fournissent les quantités de MPV produites sur le territoire (utilisée pour la valeur MB_{champ}), importées, exportées et utilisées pour différentes finalités. L'utilisation intérieure comporte une catégorie correspondant à l'utilisation pour l'alimentation animale et détaille les quantités d'origine intérieure. Il a ainsi été possible de calculer $MB_{indigene_{AA}}$ (par exemple ligne 56 dans les bilans d'approvisionnement Céréales). Ces bilans sont calculés par campagne, c'est-à-dire du 1^{er} juillet de l'année $n-1$ au 30 juin de l'année n . Par souci de cohérence avec les données calendaires 2010, 2011 et 2012 (1^{er} janvier – 31 décembre) utilisées pour le reste des calculs, quatre années de bilans (2009-2010, 2010-2011, 2011-2012 et 2012-2013) ont été utilisées.

Les teneurs en MS et en MAT utilisées ($\%MS_i$ et $\%MAT_i$) sont présentées dans le tableau 3. Les teneurs en MAT des MPV sont des données classiquement utilisées en nutrition animale et donc accessibles. Les valeurs de Céréopa et des tables INRA 2010 ont été utilisées. Pour les fourrages, les teneurs MAT sont calculées pour des stades et des conditions de récolte précis (par exemple, ensilage de prairie permanente de Plaine (Normandie), Brins courts avec conservateur, 1^{er} cycle, Épis ou fleurs, 25/05, début épiaison). Dans EFESE-EA, l'objectif est de calculer des quantités de MAT offertes sur l'année par les surfaces fourragères à partir des quantités de MS produites et fournies par le groupe Biens Végétaux. Il faut donc une teneur en MAT moyenne sur l'année, et non une teneur relative à un stade. Les valeurs sont présentées dans le tableau 4. Pour les prairies permanentes, nous avons utilisé les données produites dans le cadre du programme Casdar "*Les prairies permanentes françaises au cœur d'enjeux agricoles et environnementaux : de nouveaux outils pour une nouvelle approche de leur gestion ?*". Ce projet a étudié 190 parcelles de prairies permanentes réparties sur le territoire français pendant 2 ans (2009 et 2010). La production annuelle de biomasse des parcelles a été estimée à partir de la production d'herbe mesurée sur trois périodes (4.8 T de MS en fin de printemps, 1 T MS en été et 0.4 T MS en automne). Pour chacune de ces trois périodes, la teneur en MAT a également été mesurée (9g MAT/100g de MS en fin de printemps, 15g MAT/100g de MS en été et 17 g MAT/100g de MS en autonome). Ainsi, il est possible de calculer la production annuelle de MAT des prairies (650 kg de MAT) et la teneur annuelle moyenne en MAT (10.5 g/100g). Pour les prairies artificielles, les prairies temporaires, le maïs fourrage et les autres fourrages annuels, nous avons utilisé les données de Huyghe (2003).

Les données disponibles ne permettent pas de produire des coefficients à la résolution PRA. Nous faisons donc l'hypothèse que les disponibilités de MPV pour l'AA sont les mêmes dans toutes les PRA. Les différences d'offre de MPV entre PRA ne sont donc liées qu'aux différences de superficies des MPV.

Tableau 2. Valeurs des coefficients de disponibilité pour l'alimentation animale de la matière sèche ($\delta_{MS,i}$ en T MS/T produit brut) et de la matière azotée ($\delta_{MAT,i}$ en T MAT/T produit brut), appliqués aux quantités brutes produites au champ dans le cas des matières premières végétales non transformées

Matière première végétale	$\delta_{MS,i}$	$\delta_{MAT,i}$
Blé tendre	0.175	0.023
Blé dur	0.033	0.005
Orge et escourgeon	0.304	0.035
Avoine, méteil	0.795	0.088
Seigle	0.533	0.055
Triticale	0.821	0.090
Maïs grain et semence	0.318	0.032
Sorgho	0.589	0.068
Mélanges et autres céréales	0.498	0.051
Colza	0.019	0.004
Tournesol	0.075	0.013
Soja	0.157	0.063
Lin oléagineux	0.592	0.148
Pois	0.455	0.109
Féverole	0.217	0.064
Lupin	0.732	0.282

Tableau 3. Teneurs en matière sèche (MS) et en matière azotée totale (MAT) utilisées dans l'étude

Matière première végétale	%MS _i	%MAT _i
Pois protéagineux et secs	86.4	23.9
Ble tendre	86.8	13.0
Ble dur	86.8	16.5
Orge et escourgeon	86.7	11.6
Avoine, méteil	88.1	11.1
Seigle	87.3	10.3
Triticale	87.3	11.0
Maïs grain et semence	86.4	10.1
Sorgho	86.5	11.6
Mélanges et autres céréales	86.5	10.3
Colza	92.2	21.5
Tournesol	93	17.2
Soja	88.1	40.2
Lin	90.3	25.0
Fèves et fêveroles	86.1	29.3
Lupins	88.6	38.5

Tableau 4. Valeurs des coefficients de conversion de la matière sèche issue des MPV fourrages en matières azotées totales (MAT)

Matière première végétale	$\tau_{k,MAT}$
Prairies artificielles*	0.148
Prairies temporaires	0.130
Prairies naturelles	0.105
STHPP	0.105
Maïs fourrager	0.070
Autres fourrages annuels	0.106

*les surfaces en luzerne déshydratée sont déduites des surfaces en prairies artificielles et sont comptées dans la partie coproduits

Calcul de $\gamma_{MS,i}$ et $\gamma_{MAT,i}$ pour les MPV transformées par l'industrie

Les animaux d'élevage valorisent une diversité importante de coproduits issus des industries de transformation des MPV pour l'alimentation humaine et autres usages industriels (par exemple production de biocarburant).

Pour évaluer l'offre de MPV issues de la transformation des cultures, il est nécessaire d'estimer :

- La proportion de matière brute produite au champ qui est transformée par les industries
- Le rendement de la transformation (quantité de coproduits générée à partir de la matière brute)
- La disponibilité du coproduit pour l'AA

Les données relatives à ces différents éléments à estimer ne sont pas disponibles pour tous les coproduits. En effet, après transformation, certains coproduits sont partiellement agrégés dans des produits composés (par exemple les drêches de maïs sont incorporées en partie dans le corn gluten feed). Ainsi, en plus du rendement de transformation, il faut estimer des niveaux d'incorporation de coproduits. Par ailleurs, certains coproduits sont exportés, en étant incorporés ou non dans des produits composés. La complexité de l'utilisation des coproduits en alimentation animale nous a amenés à faire un compromis entre la quantification de l'offre en MPV transformées et les données disponibles pour la quantification. Nous avons choisi de travailler sur les coproduits les plus représentatifs dans la consommation des animaux d'élevage. Ce choix s'est basé sur les bilans d'approvisionnement Agreste « Ressources fourragères » qui fournissent les données détaillées de disponibilité des sous-produits de transformation, i.e. les coproduits, d'origine intérieure. Nous retenons ainsi les tourteaux de soja, colza et tournesol, les issues de meunerie de blé, les pulpes de betterave, la mélasse de betterave, le corn gluten feed (CGF) et le gluten 60, qui représentent en moyenne sur 4 campagnes 89% des quantités totales de MS des sous-produits de transformation.

Les coefficients $\gamma_{MS,i}$ et $\gamma_{MAT,i}$ sont calculés comme suit :

$$\gamma_{MS,i} = \gamma_{industrie_coproduit} \cdot \gamma_{extraction_coproduit} \cdot \gamma_{disponibilité_coproduit} \quad [12]$$

$$\gamma_{MAT,i} = \gamma_{MS,i} \cdot \%MAT_i \quad [13]$$

avec

- $\gamma_{coproduit_industrie}$ la proportion de matière brute produite au champ, dite d'origine indigène, qui est utilisée dans la filière de transformation à l'origine du coproduit considéré (MB/MB)
- $\gamma_{coproduit_extraction}$ la quantité de MS de coproduit extraite par unité de matière brute transformée (MS/MB)
- $\gamma_{coproduit_disponibilité}$ la proportion de MS de coproduit disponible pour l'alimentation animale (MS/MS)
- $\%MAT_i$ la teneur en MAT du coproduit (g/100g MS)

Les coefficients $\gamma_{MS,i}$ et $\gamma_{MAT,i}$ ont été calculés à partir de données nationales, par manque de disponibilité de données à des résolutions plus fines. Ils sont ensuite appliqués à la résolution PRA. Ainsi, les spécificités régionales dans les industries de transformation sont ignorées. Les différences entre PRA reposent donc uniquement sur les différences d'assolement.

Les valeurs des coefficients $\gamma_{MS,i}$ et $\gamma_{MAT,i}$ sont présentées dans le tableau 5 et les données utilisées pour chaque coproduit sont détaillées ci-après.

Tableau 5. Valeurs des coefficients de disponibilité pour l'alimentation animale de la matière sèche ($\gamma_{MS,i}$ en T MS/T produit brut) et de la matière azotée ($\gamma_{MAT,i}$ en T MAT/T produit brut), appliqués aux quantités brutes produites au champ dans le cas des matières premières végétales transformées

Culture	Matière première végétale	$\gamma_{MS,i}$	$\gamma_{MAT,i}$
Betterave	Pulpes de betterave déshydratées	0.0317	0.0031
	Mélasse	0.0013	0.00019
Blé tendre	Issues de meunerie	0.0291	0.0050
	Corn gluten feed	0.0343	0.0080
Maïs	Gluten 60	0.0057	0.0039
	Tourteau de soja	0.2939	0.1517
Colza	Tourteau de colza	0.2642	0.1017
Tournesol	Tourteau de tournesol	0.2403	0.0887
Luzerne	Luzerne déshydratée	1.0000	0.191

Données pour le calcul des coefficients pour les coproduits issus de la betterave

La betterave produite en France est utilisée dans deux filières, sucrerie et alcool, et n'est pas exportée. Seule la filière sucre génère de la mélasse (la filière alcool génère de la vinasse). Les bilans d'approvisionnement du sucre produit par Agreste permettent de connaître les quantités de betterave produites au champ et utilisées dans les filières (compléments 3.1. et 3.2.). Le taux d'extraction de la mélasse est de 3.6% (Agreste, Méthodologie détaillée du bilan Sucre) et sa teneur en matière sèche est de 76.1% (INRA, 2010). Elle est utilisée majoritairement dans l'industrie chimique (fermentation) et en partie pour l'alimentation. Les bilans « Ressources Fourragères » permettent de savoir combien de mélasse d'origine indigène est utilisée pour l'alimentation animale. Comme présenté dans le complément 3.1, le coefficient $\gamma_{mélasse}$ a été calculé pour les 4 campagnes considérées et la moyenne a été utilisée dans les calculs (tableau 5).

La transformation de la betterave par la filière sucre et la filière alcool génère des pulpes de betterave. La transformation d'une tonne de betterave génère 500 kg de pulpes à 90% de matière sèche (CGB, rapport sur l'économie des produits annexes). Les pulpes sont exclusivement valorisées en alimentation animale.

Cependant, une partie est exportée, notamment dans les pays limitrophes des zones de production, Belgique ou Pays Bas. Le recouplement des quantités exportées indiquées dans le rapport CGB avec les quantités disponibles indiquées dans les bilans « Ressources fourragères » et les quantités de pulpes produites estimées à partir des quantités produites au champ est cohérent. Comme présenté dans le complément 3.2, le coefficient γ_{pulpes} a ainsi été calculé pour les 4 campagnes considérées et la moyenne a été utilisée dans les calculs (tableau 5).

Données pour le calcul du coefficient pour les issues de meunerie du blé tendre

Le blé tendre est utilisé dans la filière meunerie pour produire de la farine à destination de l'alimentation humaine. Le rendement de la mouture des grains de blé tendre en farine est de 77% (Agreste, Méthodologie détaillée bilans Céréales). La transformation des grains de blé génère également des sons (14.2%), des remoulages (7.1%) et de la farine basse (0.9%). La base de données Visionet de France Agrimer fournit les quantités de blé tendre d'origine indigène utilisées dans la filière meunerie pour les 4 campagnes étudiées. Comme présenté dans le complément 3.3, le coefficient γ_{issues} a été calculé pour les 4 campagnes et la moyenne a été utilisée dans les calculs (tableau 5).

Données pour le calcul des coefficients pour les coproduits issus de l'amidonnerie de maïs, Corn Gluten Feed (CGF) et Gluten60

La transformation du maïs dans la filière amidonnerie génère de l'amidon, du CGF (incluant les drèches), du gluten de maïs, du tourteau et de l'huile. La méthodologie Agreste pour les bilans Céréales fournit les proportions de CGF et de Gluten60 générées par la transformation des grains de maïs dans la filière amidonnerie (voir compléments 3.4. et 3.5), ainsi que les informations sur l'utilisation du CGF et du Gluten60 dans l'alimentation animale. Enfin, les données de la base VisioNet (FranceAgrimer) permettent de calculer la proportion de maïs utilisée dans la filière amidonnerie. Les valeurs moyennes des 4 campagnes sont présentées dans le tableau 5.

Données pour le calcul des coefficients pour les tourteaux issus des graines de soja, colza et tournesol

Les graines oléagineuses sont pressées pour obtenir de l'huile. Les tourteaux sont les coproduits de cette opération de pressage. Les bilans d'approvisionnement Agreste « Graines et Fruits Oléagineux » et « Tourteaux » sont utilisés pour déterminer les quantités de matière brute indigène utilisées dans l'industrie et les taux d'extraction. Les bilans « Ressources fourragères » permettent de calculer la disponibilité pour l'alimentation animale. Les coefficients sont détaillés en complément (3.6, 3.7 et 3.8) et les valeurs moyennes dans le tableau 5.

Données pour le calcul des coproduits issus de la luzerne ($\gamma_{luzerne}$)

La luzerne cultivée pour être ensuite déshydratée pour l'alimentation animale est explicitement mentionnée dans les données Biens Végétaux. La production en MS des surfaces correspond à la quantité transformée. Ainsi dans ce cas, la production au champ en MS correspond directement à la quantité de coproduit disponible. Les surfaces en luzerne sont également comptabilisées dans les surfaces de prairies artificielles. Elles ont donc été déduites pour le calcul des fourrages issus des prairies artificielles.

Les coefficients $\gamma_{MAT,i}$ ont ensuite été déterminés à partir des coefficients $\gamma_{MS,i}$ et des valeurs %MATi présentées dans le tableau 6.

Tableau 6. Teneurs en matières azotées totales (%MATi) utilisées pour le calcul de $\gamma_{MAT,i}$

Matière première végétale	%MAT _i (g/100g MS)
Pulpes betterave	9.88
Mélasse betterave	14.45
Issues de meunerie de blé tendre	17.30
Corn gluten feed	23.33
Gluten 60 de maïs	69.30
Tourteau soja	51.59
Tourteau colza	38.50
Tourteau tournesol	36.90
Luzerne Déshydratée	19.10

Au terme des calculs présentés dans la section B, les quantités disponibles pour les animaux, en MS et en MAT, à la résolution PRA sont déterminées pour 16 MPV de type céréales ou oléo-protéagineux, 6 MPV de type fourrager et 9 MPV de type coproduits, incluant 3 tourteaux (soja, colza et tournesol).

C-3. Calcul des consommations de MPV au niveau PRA

Ruminants

Les données d'estimation des consommations de MS des MPV des ruminants ont été fournies par l'Idele au niveau PRA grâce à une collaboration avec C. Perrot. Ces données ont été produites dans le cadre du projet AUTOSYSEL et ont remobilisé et combiné deux types d'information :

- i) La description des rations moyennes, par système d'élevage, des animaux présents dans les exploitations des réseaux de fermes de référence (Bossis et al., 2015 ; Devun et al., 2012 ; Jousseins et al., 2014)
- ii) Une analyse typologique quantifiée des exploitations ayant de l'élevage réalisée à l'aide du recensement agricole (Institut de l'Élevage, 2013)

Une première étape de travail a consisté à homogénéiser la description de l'alimentation des ruminants entre espèces. Les valeurs proposées par Jousseins et al. (2014) avec une nomenclature d'aliments spécifique aux ovins et par Bossis et al. (2015) avec une nomenclature spécifiques aux caprins, ont été reventilées au prix de certaines hypothèses dans les catégories proposées pour les bovins par Devun et al (2012) qui ont été utilisées comme grille de référence pour l'ensemble du travail. La reventilation des catégories entre espèces est récapitulée dans le complément 4. L'origine des fourrages (achat ou produit sur la ferme) n'est pas mentionnée dans le cas des bovins, en raison de la forte autonomie constatée en fourrages (98% sans effet système notable d'après Devun et al., 2012). En moyenne cette autonomie en fourrages est également très forte en systèmes ovins viande (97%) ou lait (93%), avec une variabilité plus forte entre systèmes et une autonomie plus faible dans les exploitations ovins viande des zones de cultures (84%) ou de haute montagne (87%). Cette autonomie est plus faible dans les systèmes caprins (de 57 à 85%) mais les informations sur les achats de fourrages n'ont pas pu être valorisées, faute de détail pour les autres espèces. En termes de flux, ce sont néanmoins les bovins qui sont à l'origine des flux d'achats les plus élevés. D'autre part, sauf exception (foin de Crau par exemple), une grosse partie des achats de fourrages est très probablement réalisée localement par les éleveurs. Pour l'étude EFESE-EA qui se focalise sur le niveau territoire et non sur le niveau exploitation, nous supposons que ces achats sont faits au sein de la PRA, même si cette hypothèse est probablement moins valable en ce qui concerne les zones de montagne. La ventilation par nature d'aliment des concentrés achetés pour les ovins a été réalisée à l'aide d'informations sur la composition des aliments composés, compilées par Jousseins et al. (2014), à partir de données du SNIA pour les ovins viande et du programme *Phenofinlait* pour les ovins laitiers. Les données pour les ovins laitiers ont été utilisées pour les caprins. Au final, les données de consommation d'aliments par les ruminants fournies par l'Idele concernent les catégories de MPV suivantes : herbe pâturée ; herbe conservée ; maïs ensilage ; autres fourrages ; céréales intra-consommées (en l'état ou aliment composé) ; protéagineux intra-consommés ; céréales achetées ; protéagineux achetés ; tourteau de soja ; tourteaux autres que soja ; divers (mélasse, issues de céréales, luzerne déshydratée, pulpes de betteraves,...) ; aliments minéraux et vitaminiques.

La deuxième étape de travail a consisté à rapprocher les typologies utilisées pour décrire l'alimentation des animaux d'une part, avec les exploitations ayant de l'élevage d'autre part.

Les publications de Devun et al. (2012), Jousseins et al. (2014) et Bossis et al. (2015) font ainsi appel à des typologies d'exploitations. Les clés d'entrée spécifiques de ces typologies ont été rapprochées des typologies plus génériques sur les systèmes de production quantifiées à l'aide du RA 2010 (Institut de l'Élevage, 2013) pour les exploitations ayant de l'élevage. Cet appariement des exploitations pour lesquelles les consommations des ruminants ont été estimées avec l'ensemble des exploitations d'élevage possédant des ruminants a permis une estimation quantifiée de la consommation alimentaire des ruminants au niveau de chaque PRA. A chaque ruminant (bovin, ovin ou caprin) recensé dans le RA 2010 a été affectée une ration (complément 5). Ces données de consommation ont ensuite été agrégées par PRA en trois sous-ensembles :

- La consommation des bovins présents dans des exploitations laitières ou mixtes
- La consommation des bovins présents dans des exploitations bovins viande (i.e. sans lait)
- La consommation des ovins-caprins présents dans toutes les exploitations (y compris les exploitations bovins-ovins déjà comptabilisées ci-dessus pour évaluer la consommation de leurs bovins).

Les données fournies par l'Idele correspondent aux consommations exprimées en MS pour l'année 2010. Les estimations en MS pour les années 2011 et 2012 ont été fournies par l'US ODR. Le principe de calcul a été d'utiliser les données de 2010 pour définir une consommation de MS par MPV et par UGB. Ces consommations par UGB sont appliquées aux effectifs UGB des années 2011 et 2012. Pour les bovins, le ratio EABLx/EABV (nombre de bovins présents dans les exploitations laitières ou mixtes / nombre de bovins présents dans les exploitations bovins viande) a été considéré comme constant de 2010 à 2012 au sein de chaque PRA. Il a été appliqué aux effectifs bovins des années 2011 et 2012 pour reconstituer les effectifs EABLx et EABV pour 2011 et 2012. Les données de consommation de MS des 3 années sont ensuite moyennées.

Les quantités de MAT consommées pour chaque catégorie d'aliments sont calculées à partir des données Idele (quantités de MS consommées) et d'une teneur en MAT (g/100 MS) de la catégorie d'aliments. Les teneurs MAT fournies par les tables d'alimentation INRA ou par le Céréopa sont relatives à des aliments déterminés et non à des catégories agrégées. En dehors des tourteaux (soja, colza et tournesol), les données Idele ne détaillent pas la composition des catégories agrégées. Par exemple, dans la catégorie « Céréales achetées », la composition en céréales n'est pas fournie. Il n'est donc pas possible de recalculer la teneur globale de la catégorie à partir des valeurs des aliments qui la composent.

L'option retenue est d'utiliser les données produites dans les calculs de l'offre végétale pour déterminer les teneurs en MAT des catégories agrégées. Comme le calcul de l'autonomie repose sur la confrontation d'une offre et d'une consommation, il nous a semblé que de considérer une homogénéité des teneurs entre ces deux composantes du ratio présentait le moins de biais possible.

Ainsi, la teneur de la catégorie « Céréales » (achetées et intra-consommées) est obtenue en divisant les quantités totales de MS disponibles dans 713 PRA pour les MPV blé tendre, blé dur, orge, avoine, seigle, triticale, maïs grain et semence, sorgho, mélanges et autres céréales par les quantités de MAT de ces mêmes MPV. Pour la catégorie « Protéagineux » (achetés et intra-consommés), la teneur moyenne en MAT est obtenue à partir des MPV pois protéagineux et secs, fèves et fêveroles et lupins. Pour la catégorie « Divers », la teneur moyenne est obtenue à partir des MPV issues de meunerie, pulpes de betterave, mélasse de betterave, corn gluten feed, gluten 60 et luzerne déshydratée.

Pour les catégories agrégées de fourrages « herbe conservée » et « herbe pâturée », il n'est pas possible de partir des données de l'offre qui ne sont pas relatives à des usages de l'herbe mais à des types surfaces (prairies naturelles, temporaires, etc).

Pour estimer la teneur MAT de la catégorie « herbe pâturée », nous avons utilisé les travaux de Devun et Legarto (2011) pour les modes d'usage des prairies et les teneurs en MAT des surfaces fourragères présentées dans la section B. Nous avons pu estimer que les surfaces pâturées sont composées de 58.7% de prairies naturelles (avec %MAT = 10.5 g/100g MS), 20.7 % de prairies temporaires (avec %MAT = 13.05 g/100g) et 20.6% de STHPP (avec %MAT = 10.5 g/100g de MAS). Sur la base de ces estimations, nous avons pu déterminer que la catégorie « Herbe Pâturée » avait une teneur en MAT de 11g/100g de MS.

Pour estimer la teneur MAT de la catégorie « Herbe conservée », nous avons utilisé les travaux de Devun et Legarto (2011) pour estimer la proportion d'herbe conservée par voie sèche (75% de l'herbe conservée sous forme de foin) et par voie humide (25% de l'herbe conservée sous forme d'ensilage et enrubannage). Ces mêmes travaux ont permis d'estimer la composition de l'herbe conservée par voie sèche en herbe issue de prairies permanentes (4%), temporaires (40%) et artificielles (56%) et la composition de l'herbe conservée par voie humide en herbe issue de prairies permanentes (4%), temporaires (60%) et artificielles (36%). Sur la base des

tables INRA, nous avons calculé les valeurs MAT qui correspondent à la médiane des différents fourrages appartenant à la catégorie combinant le type de prairie et le mode de conservation (foin de prairies naturelles par exemple). Ces données sont présentées dans le tableau 7. Sur la base de ces estimations, nous avons pu déterminer que la catégorie « Herbe Conservée » avait une teneur en MAT de 14.9g/100g de MS. L'ensemble des teneurs MAT des catégories d'aliments de l'Idèle sont présentées dans le tableau 8.

Tableau 7. Valeurs estimées à partir de Devun et Legarto (2011) et des tables INRA (2010) pour la composition de la catégorie « Herbe conservée » des données de consommation fournies par l'Idèle en type de prairies (PT : prairies temporaires, PA : prairies artificielles, PN : prairies naturelles)

Mode de conservation de l'herbe	Proportion d'herbe issue du type de prairie			Teneur MAT du fourrage issu du type de prairie et du mode de conservation		
	PT	PA	PN	PT	PA	PN
Voie sèche	0.40	0.56	0.04	11.4	17.9	12.5
Voie humide	0.60	0.36	0.04	12.7	18.2	13.5

Tableau 8. Valeurs de teneur en matières azotées totales (MAT) utilisées pour convertir les consommations de matière sèche (MS) des ruminants

Catégorie de MPV	Teneur en MAT (g/100g de MS)
Céréales	11.6
Protéagineux	23.6
Tourteau de soja	51.6
Autres tourteaux	38.0
Divers	17.5
Herbe pâturée	11.0
Herbe conservée	14.9
Maïs ensilage	7
Autres fourrages	10.6

Monogastriques

Les consommations de MPV par les monogastriques (volailles et porcins) ont été estimées à partir de la base de données du Céréopa⁴ des matières premières utilisées pour la fabrication d'aliments composés (base de données non publique analysée dans le cadre de la thèse de Joao Pedro Domingues-Santos). Les données du Céréopa correspondent aux flux de MPV utilisées par les fabricants d'aliments du bétail, que nous dénommons FAB (figure 2), pour la fabrication d'aliments composés. Les estimations des flux FAB de MPV des monogastriques sont basées sur le modèle Prospective Aliment développé par le Céréopa, qui évalue les tonnages d'aliments des fabricants d'alimentation du bétail. Les flux FAB ne prennent pas en compte la Fabrication d'Aliment à la Ferme (FAF), basées sur des matières premières végétales intra-consommées ou achetées en l'état. Ainsi, les données du Céréopa ne fournissent pas l'intégralité des consommations de MPV des monogastriques. Il manque les MPV achetées « en l'état » ou produites à la ferme (que nous dénommons flux FAF pour Fabrication des Aliments à la Ferme). La première étape de travail consiste à désagréger les données de consommation FAB des supra-régions à la résolution département. La clé de désagrégation utilisée est basée sur la proportion d'UGB de la filière animale concernée du département concerné par rapport aux UGB totaux de la supra-région à laquelle le département appartient. Nous avons choisi de désagréger par rapport à des UGB et non des effectifs exprimés en têtes pour tenir compte des différences de consommation entre les animaux (par exemple, une tête de poule pondeuse ne consomme pas la même quantité d'aliments qu'une tête de poulette). Les effectifs animaux en UGB ne sont pas disponibles pour toutes les catégories détaillées dans la base Céréopa, les catégories poulets de chair labels et poulets de chair hors label ont ainsi été regroupées. Au final, nous avons considéré 5 filières volailles (poules et poulettes, poulets de chair et coqs, dindes et dindons, canards (à gaver et à rôtir) et pintades) et 2

⁴ Le Céréopa (Centre d'Etude et de Recherche sur l'Economie et l'Organisation des Productions Animales) est un bureau d'étude (Association loi 1901) qui fonctionne au sein d'AgroParisTech (<http://www.cereopa.com/index.php>).

filières porcines (troues et porcs charcutiers). La désagrégation du FAB de chaque MPV_i de la base Céréopa a été réalisée au sein de chacune de ces filières, selon la formule :

$$FAB_{MPV_{i,j,k}} = FAB_{MPV_{i,supra-région,k}} \cdot \frac{UGB_{j,k}}{UGB_{supra-région,k}} \quad [14]$$

avec :

$FAB_{MPV_{i,supra-région,k}}$ le flux FAB de la MPV *i* pour la filière *k* dans la supra-région à laquelle appartient le département *j*

$UGB_{j,k}$ le nombre d'UGB de la filière *k* dans le département *j* pour l'année 2010

$UGB_{supra-région,k}$ le nombre d'UGB de la filière *k* dans la supra-région à laquelle appartient le département *j* pour l'année 2010

La clé de désagrégation de la résolution supra-région à la résolution département est calculée sur la base de l'année 2010 et cette même clé est utilisée ensuite pour les années 2011 et 2012. En effet, les données d'effectifs par filière ne sont disponibles pour l'ensemble des filières et des départements que pour 2010 grâce au Recensement Agricole.

Comme mentionné ci-dessus, la base de données Céréopa ne fournit que les flux FAB. La littérature et les données disponibles permettent d'estimer la part du flux FAF dans l'alimentation totale des animaux, désignée par un coefficient β . Le flux FAF de chacune de ces filières est alors calculé selon :

$$FAF_{MPV_{i,j,k}} = FAB_{MPV_{i,j,k}} \cdot \beta_k / (1 - \beta_k) \quad [15]$$

avec β_k la part du FAF dans le total des MPV consommées (i.e. somme des flux FAF et FAB) dans la filière *k*.

Pour les porcins, les données de l'étude IFIP de Berthelot et Badouard (2011) fournissent les valeurs du coefficient β_k pour chaque supra-région Céréopa. Ceci permet de prendre en compte des différences régionales pour la part du FAF dans le total des consommations des porcins (tableau 9). En revanche, il n'a pas été possible de distinguer des valeurs de β_k par filière : les porcs charcutiers et les troues ont les mêmes valeurs.

Pour les volailles, les données Agreste fournissent les valeurs de β_k par filière (tableau 10) mais sans distinguer de spécificité régionale.

Tableau 9. Valeur du coefficient β_{pig} selon les régions (Berthelot & Badouard, 2011)

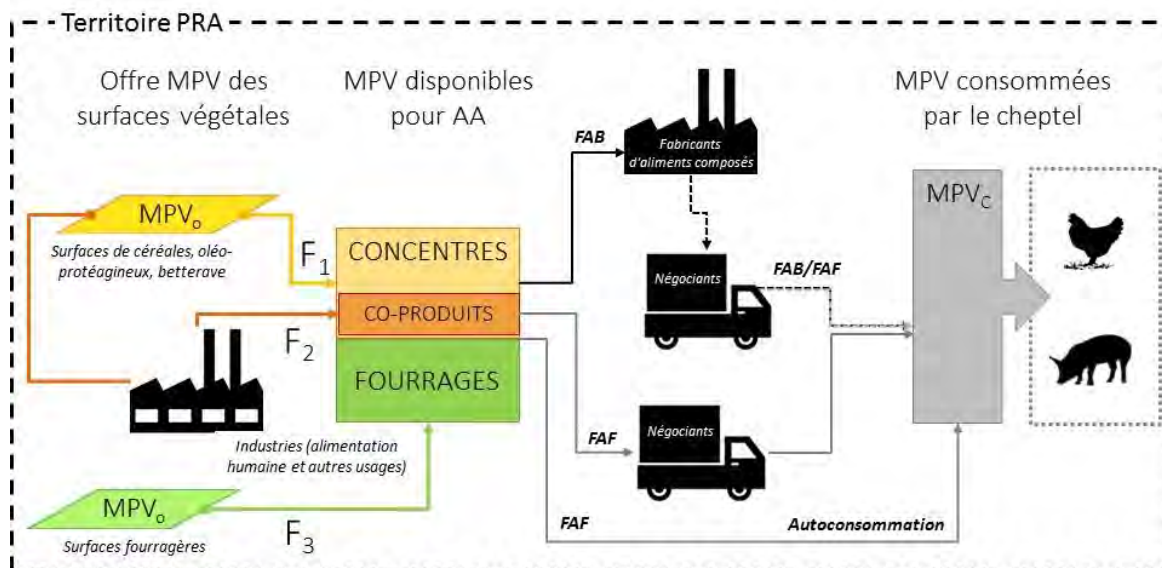
Région	Valeur coefficient β_{pig}	Départements appartenant à la supra-région
Bretagne	0.29	22, 29, 35, 56
Centre-Ouest	0.38	16, 17, 18, 28, 36, 37, 41, 44, 45, 49, 53, 72, 79, 85, 86
Centre-Est	0.62	1, 7, 21, 25, 26, 38, 39, 42, 58, 69, 70, 71, 73, 74, 89, 90
Massif central	0.27	3, 15, 19, 23, 43, 63, 87
Nord	0.70	2, 8, 10, 51, 52, 59, 60, 62, 75, 77, 78, 80, 91, 92, 93, 94, 95
Nord-Est	0.83	54, 55, 57, 67, 68, 88
Sud-Ouest	0.46	9, 12, 24, 31, 32, 33, 40, 46, 47, 64, 65, 81, 82
Normandie	0.32	14, 27, 50, 61, 76
National	0.34	4, 5, 6, 11, 13, 30, 34, 48, 66, 83, 84

Tableau 10. Valeur du coefficient β_k selon les différentes filières de volailles

Filière	Valeur coefficient β_k pour 2010	Sources mentionnées par Agreste
Poulet	0.046	Enquêtes SSP 1996, 2004, 2008 et interpolations
Dinde	0.005	Enquête SSP 96
Pintade	0.096	Enquête SSP 96
Palmipèdes	0.105	Enquête SSP 96 - Ratio moyen des différentes espèces, pondération par effectifs SAA
Pondeuses	0.175	Enquête SSP 96
Ensemble volailles	0.088	

Nous considérons dans les calculs que la composition du flux FAF est (qualitativement) identique à celle du flux FAB. Ainsi, la procédure d'estimation du flux FAF est appliquée à chaque matière première de la base Céréopa. Par ailleurs, les procédures de désagrégation de la résolution supra-région à la résolution département et d'estimation du flux FAF sont effectuées pour 2010, 2011 et 2012 puis moyennée sur les trois années pour aboutir aux quantités totales de MPV_i consommées par les monogastriques, à la résolution département. La désagrégation de la résolution département à la résolution PRA se base sur la même formule que pour la désagrégation de la supra-région au département, en utilisant les effectifs UGB estimés par espèce et catégorie par Puech et Maigné pour l'année 2010. Au terme de ces étapes de calcul, les quantités moyennes des 21 MPV de la base Céréopa (en MS et en MAT) consommées par les monogastriques sont calculées à la résolution PRA.

Figure 2. Structuration des données de consommations des monogastriques avec d'une part les flux d'aliments des fabricants du bétail (FAB) et les flux d'aliments fabriqués à la ferme (FAF) d'autre part



C-4. Calcul de la production sur ressources propres de l'écosystème de la PRA

Au terme des calculs présentés dans les sections précédentes, nous disposons de l'ensemble des variables nécessaires pour le calcul de l'indicateur de production de biens animaux sur ressources propres de l'écosystème de la PRA, à savoir la production physique totale de biens animaux dans la PRA et les composantes du ratio α , c'est-à-dire la disponibilité et la consommation de MPV (équation [3]). Différentes sources de données ont été mobilisées pour parvenir à rassembler les différentes variables du calcul. Sur les 714 PRA du territoire métropolitain français, nous disposons de l'ensemble des valeurs pour **673 PRA**. Les catégories de MPV pour la disponibilité et les consommations ne sont pas équivalentes comme le montre le tableau 11. A partir de la production de biens végétaux de la PRA, 31 catégories d'aliments ont été calculées. Les données de consommation des monogastriques, élaborées à partir de la base de données du Céréopa portent sur 21 catégories d'aliments. Enfin les données de consommation des ruminants fournies par l'Idelc portent sur 12 catégories d'aliments. Les minéraux et acides aminés sont ignorés car non issus des surfaces végétales de la PRA. Les MPV restantes ont été ventilées dans 5 catégories agrégées (tableau 11): céréales, oléo-protéagineux, tourteaux, coproduits et fourrages. Pour chaque unité (MS et MAT), les quantités disponibles dans chacune des 5 catégories sont sommées pour obtenir une quantité totale de MPV, en MS et en MAT, disponible dans la PRA. Les quantités consommées par les monogastriques et par les ruminants pour chacune des 5 catégories sont également sommées pour obtenir une consommation totale de MPV, en MS et en MAT, par les animaux présents dans la PRA. Le ratio entre disponibilité et consommation est calculé pour la MS et pour la MAT. L'autonomie de la PRA correspond finalement au plus petit des 2 ratios (MS ou MAT) ou à 1.

Tableau 11. Catégories de matières premières végétales (MPV) présentes dans les différentes données utilisées (disponibilité de MPV, consommation de MPV par les ruminants et consommation de MPV par les monogastriques) et regroupement en catégories agrégées.

MPV disponibles	MPVc ruminants	MPVc monogastriques	Catégorie agrégée
Blé tendre		Blé tendre	Céréales
Orge		Orge	
Triticale		Triticale	
Maïs grain et semence		Maïs	
Blé dur	Céréales intra-consommées et achetées		
Seigle			
Avoine		Autres céréales	
Sorgho grain			
Mélanges et autres céréales			
Colza	<i>Non consommés</i>	Graines et huiles	Oléo-protéagineux
Tournesol			
Soja			
Lin oléagineux			
Pois protéagineux	Protéagineux intra-consommés et achetés	Graines Protéagineuses	
Fèves et fêveroles			
Lupin			
Tourteaux de soja	Tourteau de soja	Tourteaux de soja	Tourteaux
Tourteaux de colza	Tourteaux autres que soja	Tourteaux de colza	
Tourteaux de tournesol		Tourteaux de tournesol Autres tourteaux	
Pulpes betterave	Divers (coproduits)	Pulpes betteraves	Coproduits
Mélasse betterave		Coproduits liquides sucrerie	
Issues de meunerie		Issues de meunerie	
Luzerne déshydratée		Luzernes	
CGF		Coproduits maïs	
Gluten 60		Coproduits blé Divers	
Maïs fourrage	Maïs ensilage	<i>Non consommés</i>	Fourrages
Autres fourrages annuels	Autres fourrages		
STHPP			
Prairies naturelles ou semées de plus de 6 ans	Herbe pâturée et herbe conservée		
Prairies temporaires			
Prairies artificielles			

La stratégie de calcul de α est basée sur une agrégation totale des MPV et non sur un calcul du ratio par catégorie d'aliments. Cette hypothèse de calcul autorise ainsi des compensations entre catégories d'aliments : par exemple un déficit de céréales peut être compensé par un excédent de coproduit.

Les consommations des monogastriques et des ruminants ont été agrégées car il n'est pas possible de distinguer une offre spécifique pour espèce et donc de calculer un coefficient de capacité à satisfaire la consommation d'aliments spécifique aux ruminants et un spécifique aux monogastriques. En revanche il est possible de calculer une capacité à satisfaire la consommation de fourrages et une capacité à satisfaire la consommation de concentrés (coproduits et tourteaux inclus). Ces deux types de capacités ont été utilisés dans l'analyse des types de profil de PRA (complément 6).

D. Bases de données mobilisées

Effectifs (bovins, ovins, caprins, porcins, volaille)

Les effectifs correspondent au nombre d'animaux, en nombre de têtes, présents dans les exploitations en fin d'année. i.e. un effectif instantané autour du 30 novembre de chaque année. Ces données sont construites par le SSP à partir de la Base de Données Nationale de l'identification (BDNI) pour les bovins et à partir de « l'Enquête cheptel, résultats de l'année N » pour les autres espèces. Les résultats de l'enquête cheptel sont régionaux et extrapolés à toutes les régions. Les niveaux départementaux ne sont pas fournis car non représentatifs dans cette enquête. Des sources et une expertise locales sont mobilisées pour estimer les chiffres au niveau département. Pour les animaux laitiers, l'Enquête mensuelle laitière est mobilisée pour la mise en cohérence des effectifs d'animaux et de la production de lait.

Nom de la base/source de données : Saa_06 : Effectifs de bétail hors équidé

Fournisseur/source : SSP – Agreste

Années : années 2010, 2011, 2012

Couverture géographique : France

Résolution géographique (maille) : Département

Variables/informations nécessaires au calcul de l'indicateur : Nombre d'animaux, en nombre de têtes, présents dans les exploitations en fin d'année

Catégories d'animaux :

Bovins

Vaches laitières
Vaches nourrices
Toutes vaches
Génisses laitières de renouvellement de plus de 2 ans
Génisses nourrices de renouvellement de plus de 2 ans
Génisses de boucherie de plus de 2 ans
Mâles de type laitier de plus de 2 ans
Mâles de type viande de plus de 2 ans
Total bovins de plus de 2 ans
Génisses laitières de renouvellement de 1 à 2 ans
Génisses nourrices de renouvellement de 1 à 2 ans
Génisses de boucherie de 1 à 2 ans
Mâles de type laitier de 1 à 2 ans
Mâles de type viande de 1 à 2 ans
Total autres bovins de 1 à 2 ans
Veaux de boucherie
Autres femelles de moins de 1 an
Autres mâles de moins de 1 an
Total bovins de moins de 1 an
Ensemble espèce bovine

Porcins

Porcelets
Jeunes porcs de 20 à 50 kg
Truies de 50 kg et plus
Verrats de 50 kg et plus
Porcs à l'engrais de 50 kg et plus
Ensemble espèce porcine

Caprins

Chevrettes
Chèvres (femelles ayant mis bas)
Autres caprins (y compris boucs)
Ensemble espèce caprine

Ovins

Agnelles
Brebis-mères (y c. réforme)
dont brebis-mères laitières
Autres ovins (y compris béliers)
Ensemble espèce ovine

Nom de la base/source de données : Saa_08 : Effectifs de volailles et de lapins des exploitations agricoles

Fournisseur/source : SSP – Agreste

Années : années 2010, 2011, 2012

Couverture géographique : France

Résolution géographique (maille) : région

Variables/informations nécessaires au calcul de l'indicateur : Nombre d'animaux, en nombre de milliers de têtes présents dans les exploitations en fin d'année

Catégories d'animaux :

Poules

Poules pondeuses d'oeufs à couvrir
Poules pondeuses d'oeufs de consommation
Poulettes
Poulets de chair (y compris coqs et coquelets)
Ensemble gallus

Autres volailles

Canards à gaver
Canards à rôtir
Dindes et dindons (au 1er octobre)
Oies au 1er octobre (à rôtir, à gaver)
Pintades
Cailles d'élevage

Lapins

Lapines reproductrices

Nom de la base/source de données : Saa_09 : Production de bétail fini

Fournisseur/source : SSP – Agreste

Années : années 2010, 2011, 2012

Couverture géographique : France

Résolution géographique (maille) : Département

Variables/informations nécessaires au calcul de l'indicateur : production en tonnes équivalent-carcasse, d'après le département d'origine des animaux avant abattage

Produits :

Bovins

Vaches de réforme laitières
Vaches de réforme nourrices
Total vaches de réforme
Génisses laitières de plus de 2 ans
Génisses viande de plus de 2 ans
Total génisses de plus de 2 ans
Génisses laitières de 1 à 2 ans
Génisses viande 1 à 2 ans
Total génisses de 1 à 2 ans
Génisses de 6 mois à 1 an
Total génisses
Mâles de plus de 2 ans
Mâles de 1 à 2 ans
Mâles de 6 mois à 1 an
Total mâles
Veaux de boucherie laitiers
Veaux de boucherie viande
Total veaux de boucherie
Ensemble bovins

Porcins

Porcelets
Porcs charcutiers
Truies et verrats de réforme
Ensemble porcins

Caprins

Chevreaux de lait
Autres chevreaux
Caprins de réforme
Ensemble caprins

Ovins

Agneaux de lait
Autres agneaux
Moutons et ovins de réforme
Ensemble ovins

Nom de la base/source de données : Saa_10 : Production de volailles et de lapins des exploitations agricoles

Fournisseur/source : SSP – Agreste

Années : années 2010, 2011, 2012

Couverture géographique : France

Résolution géographique (maille) : région

Variables/informations nécessaires au calcul de l'indicateur : production en tonnes équivalent-carcasse, d'après la région d'origine des animaux avant abattage

Produits :

Poules

Coqs et poules de réforme
Poulets de chair (mâles et femelles) et coquelets

Autres volailles

Canards gras
dont foies gras de canards
Canards à rôtir
Dindes et dindons
Oies grasses
dont foies gras d'oies
Oies à rôtir
Pintades
Cailles d'élevage

Lapins

Lapins

Nom de la base/source de données : Saa_12 : Production de lait et utilisation à la ferme

Fournisseur/source : SSP – Agreste

Années : années 2010, 2011, 2012

Couverture géographique : France

Résolution géographique (maille) : Département

Variables/informations nécessaires au calcul de l'indicateur : hl de lait, incluant les livraisons de lait à l'industrie, le lait utilisé pour les fabrications fermières, les ventes directes et l'autoconsommation de lait

Produits :

Lait de vache
Lait de chèvre
Lait de brebis

Nom de la base/source de données : Saa_13 : Production d'œufs des élevages professionnels

Fournisseur/source : SSP – Agreste

Années : années 2010, 2011, 2012

Couverture géographique : France

Résolution géographique (maille) : région

Variables/informations nécessaires au calcul de l'indicateur : milliers d'unités par an

Produits :

Œufs de consommation

Œufs à couvrir

Nom de la base/source de données : Saa_11 : Mouvements d'animaux maigres et reproducteurs

Fournisseur/source : SSP – Agreste

Années : années 2010, 2011, 2012

Couverture géographique : France

Résolution géographique (maille) : Département hors DOM

Variables/informations nécessaires au calcul de l'indicateur : Sorties des élevages (tête), Entrées dans les élevages (tête), Solde sorties-entrées (tête)

Catégories d'animaux :

Bovins

Vaches laitières

Vaches nourrices

Génisses laitières de plus de 2 ans

Génisses viande de plus de 2 ans

Génisses laitières de 1 à 2 ans

Génisses viande 1 à 2 ans

Génisses de 6 mois à 1 an (broutardes)

Mâles de plus de 2 ans

Mâles de 1 à 2 ans

Mâles de 6 mois à 1 an (broutards)

Veaux à remettre laitiers

Veaux à remettre viande

Porcins

Porcelets et jeunes porcs de moins de 50 kg

Cochettes et truies

Verrats

Caprins

Caprins reproducteurs (mâles et femelles)

Autres caprins

Ovins

Ovins reproducteurs femelles

Ovins reproducteurs mâles

Agneaux à remettre

Autres ovins d'engraissement

Nom de la base/source de données : bilan d'approvisionnement – ressources fourragères

Fournisseur/source : SSP – Agreste

Années : années « campagne » du 01/07 au 30/06 : 2009/2010, 2010/2011, 2011/2012, 2012/2013

Couverture géographique : France

Résolution géographique (maille) : France

Variables/informations nécessaires au calcul de l'indicateur : disponibilité totale en divers types de MPV pour l'alimentation animale, en tonnes de matière brute et en matière sèche

Ce bilan utilise comme données d'entrée les données du poste alimentation animale issues des bilans d'approvisionnement céréales, oléo protéagineux, tourteaux etc.

Le poste alimentation animale de ces bilans distingue l'origine indigène (nationale) (part autoconsommée et part achetée sur le marché national) et l'origine importée. A noter que la **part achetée sur le marché**, obtenue par différence entre les MPV d'origine indigène et l'autoconsommation, représente le **flux de MPV nationales acheté par les organismes de stockage et les négociants**. Ce flux acheté sur marché additionné aux importations forme la **disponibilité pour les fabricants d'aliments du bétail et l'achat de MPV en l'état par les agriculteurs**.

Nom de la base/source de données : bilan fourrager, méthode détaillée

Fournisseur/source : SSP – Agreste

Années : 10 années calendaires, de 2001 à 2010

Couverture géographique : France

Résolution géographique (maille) : France

Variables/informations nécessaires au calcul de l'indicateur : décomposition FAB/FAB de l'utilisation des différentes ressources alimentaires pour les principales filières d'élevage (6 types)

Le bilan détaillé « ressources fourragères » décompose chaque flux par filière animale (vaches laitières; autres bovins, porcins, volailles, ovin-caprins-lapins et autres animaux). Les ressources incluent des MPV et des aliments concentrés

d'origine animale. Il est exprimé en matière brute sauf pour les fourrages qui sont exprimés en matière sèche. Les données du bilan sont disponibles sur 10 ans.

En combinant les données du bilan approvisionnement – ressources fourragère et plusieurs autres sources ce bilan permet le calcul la disponibilité des ressources en distinguant deux grands flux : (i) les ressources incorporées aux aliments composés (que nous dénommons flux FAB pour Fabrication par l'industrie d'Alimentation du Bétail); (ii) les ressources achetées « en l'état » ou produites à la ferme (que nous dénommons flux FAF pour Fabrication des Aliments à la Ferme).

Nom de la base/source de données : Prospective Aliment

Fournisseur/source : Céréopa (Centre d'Etude et de Recherche sur l'Economie et l'Organisation des Productions Animales) (données non publiques)

Années : 3 années calendaires, 2010-2011-2012

Couverture géographique : France

Résolution géographique (maille) : France et sub-régions (France découpée en 9 supra-régions : Auvergne, Bretagne, Centre, Grand-Est, Nord, Normandie, Pays De Loire, Rhône-Alpes, Sud-Ouest)

Variables/informations nécessaires au calcul de l'indicateur⁵ : valeurs des tonnages de matières premières végétales utilisées par les fabricants d'aliments du bétail (FAB) en tonnes de matière brute, matière sèche et matière azotée totale, pour 21 MPV et 12 filières d'élevage (bovin lait, bovin viande, ovin-caprin, poulet chair-hors label, poulet chair label, poudeuse, canard, dinde, pintade, porc charcutier, truie).

Nom de la base/source de données : données obtenues dans le cadre du projet AUTOSYSEL

Fournisseur/source : IDELE (données non publiques)

Années : 2010

Couverture géographique : France

Résolution géographique (maille) : France et PRA

Variables/informations nécessaires au calcul de l'indicateur : flux FAB+FAF pour 3 filières : bovins lait, bovins viande (agrégés de la viande issus des troupeaux lait et viande au niveau national) et ovin-caprin (lait et viande), en tonnes de MS matière sèche pour 9 groupes de MPV

Nom de la base/source de données : Bilans céréaliers et oléo-protéagineux de FranceAgriMer

Fournisseur/source : FranceAgriMer (données non publiques)

Années : une « année campagne » (1/07 – 30/06)

Couverture géographique : France

Résolution géographique (maille) : France et NUTS3

Variables/informations nécessaires au calcul de l'indicateur : autoconsommation et stock de report pour les divers types de céréales

<http://www.franceagrimer.fr/fam/content/download/17122/133001/file/Bilan%20C%C3%A9r%C3%A9alier%202012-Web.pdf>

Ces bilans détaillent pour les principales des MPV : la production, l'autoconsommation, le stock, la collecte, l'importation, l'utilisation et les exportations au niveau national. La base de données Visionet⁶ fournit notamment au niveau NUTS3 (département) : le stock, la collecte, et l'utilisation par l'industrie des aliments du bétail (FAB). Le FAB couvre 100% du tonnage d'aliment produit en France par les fabricants d'aliment du bétail. Les données sont exprimées en **matière brute**.

⁵ Les estimations des flux FAB de MPV des monogastriques sont basées sur le modèle Prospective Aliment développé par le Céréopa, qui évalue les tonnages d'aliments des fabricants d'alimentation du bétail. Le modèle Prospective Aliment porte sur 95% du tonnage d'aliment produit en France par les Fabricants d'Aliment du Bétail (FAB). L'évaluation de la FAB par le Céréopa, s'appuie sur des données fournies par les syndicats de l'alimentation animale française (Snia-Coop de France) et un modèle d'optimisation des rations (programmation linéaire) utilisée par les entreprises du secteur pour décider de leurs politiques d'achat et de formulation. La base de données donne les volumes mensuels d'aliments composés produits par espèce animale, stade de développement (aliment démarrage, croissance, finition, gestation, lactation...) et cahiers des charges spécifiques (conventionnel, label...). A partir de ces données, les volumes de chaque matière première incorporée dans chaque aliment sont calculés par espèce et par zone (Auvergne, Bretagne, Centre, Grand-Est, Nord, Normandie, Pays De Loire, Rhône-Alpes, Sud-Ouest). Le modèle Prospective Aliment établit des formules alimentaires mensuelles en fonction des compositions nutritionnelles des matières premières, des besoins des différentes catégories d'animaux, des prix des matières premières et des coûts de transport régionalisés.

⁶ VisioNet couvre tous les opérateurs FAB ce qui représente une petite différence (5%) avec Céréopa (communication personnelle N. Hombert (FAM - Unité "Enquêtes et données filières" FranceAgriMer).

Sources de données utilisées pour calculer les effectifs de bétail dans chaque filière d'élevage :

Nom de la base/source de données : Recensement agricole 04_RA_001A : Cheptels selon la taille du troupeau

Fournisseur/source : SSP – Agreste (public)

Années : 2010

Couverture géographique : France

Résolution géographique (maille) : région, département, PRA

Variables/informations nécessaires au calcul de l'indicateur : effectifs des filières ruminants et monogastriques par département et PRA ; clé de répartition des effectifs et productions entre département et PRA

Nom de la base/source de données : Normabev

Fournisseur/source : base de données professionnelles regroupant l'ensemble des données relatives à l'identification et à la pesée / classement / marquage

Années : 2010

Couverture géographique : France

Résolution géographique (maille) : région, département, PRA

E. Références

- Agreste, Méthodologies détaillées des bilans d’approvisionnement Céréales, Protéagineux, Graines et Oléagineux, Tourteaux et Ressources Fourragères. <http://agreste.agriculture.gouv.fr/donnees-de-synthese/bilans-d-approvisionnement/>
- Agreste, 2013. Bilan d’approvisionnement fourrager – Méthode détaillé. Texte général et tableau final 2010. MAAPAR SCEES - 122p.
- ANSES, 2013. Ciqua French food composition table version 2013. <https://pro.anses.fr/TableCIQUAL/> Accessed 25 June 2014.
- Baumont R., Dulphy J.P., Sauvant D., Tran G., Meschy F., Aufrère J., Peyraud J.L., Champciaux P., 2010. Les tables de la valeur des aliments. In : Alimentation des bovins, ovins et caprins. Besoins des animaux – Valeurs des aliments. Tables INRA 2010 (édition remaniée), J Agabriel (coord), p.185-279
- Berthelot N., Badouard B., 2011. Importance et diversité des aliments fabriqués à la ferme en élevages de porcs. TechniPorc, Vol. 34, N°1, 2011
- Bossis N., Jost J., Guinamard C., de Boissieu C., Boutin M. 2015. Accompagner le développement de l’autonomie alimentaire en élevage caprin laitier. IDELE, collection résultats, 36p.
- Confédération Générale Des planteurs de Betterave. Rapport filière betterave. 4ème partie : L’économie des produits annexes, 265-286. www.labetterave.com/getFile.aspx?FILEID=494
- Devun J. et Legarto J., 2011. Fourrages conservés et modes de récolte : la situation selon les systèmes d’élevage en France. Fourrages (2011) 206, 91-105.
- Devun J., Brunschwig P., Guinot C. 2012. Alimentation des bovins : rations moyennes et niveaux d’autonomie alimentaire. IDELE, collection résultats, 44p.
- Dross. C. 2016. Stratégies d’utilisation des sols agricoles pour concilier production et oiseaux spécialistes des milieux agricoles. Thèse de doctorat Université Paris Saclay, AgroParisTech, ED ABIES <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01467938/>
- FAO, 2003. Les bilans alimentaires -Manuel. <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/011/x9892f/x9892f00.pdf>
- Huyghes C. 2003. Les fourrages et la production de protéines. Fourrages, 174, 145-162.
- Institut de l’Elevage, 2013. L’élevage d’herbivores au recensement agricole 2010. Exploitations, cheptels, productions. Dossier Economie de l’Elevage, 2013, 440-441, 90 p. + annexes
- Institut de l’Elevage, Programme sur l’autonomie alimentaire et protéique des systèmes d’élevage herbivore français « AUTOSYSEL » (2014/2017) d’après Agreste recensement agricole 2010 ; Institut de l’Elevage, 2013 ; Devun et al., 2012 ; Jousseins et al., 2014 ; Bossis et al. 2015.
- Jousseins C., Tchakérian E., deBoissieu C., Morin E., Turini T. 2014. Alimentation des ovins : rations moyennes et niveaux d’autonomie alimentaire. IDELE, collection résultats, 50p.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations and United Nations 2015. System of Environmental -Economic Accounting for Agriculture, Forestry and Fisheries (SEEA AFF), Consultation draft. <http://unstats.un.org/unsd/envaccounting/aff/chapterList.asp>
- Launay F. (Directeur), Baumont R., Plantureux S., Farrie J.-P., Michaud A., Pottier E. 2011. Prairies permanentes: des références pour valoriser leur diversité. Paris, FRA : Institut de l’Elevage, 128.
- Réséda, 2008. Enquête sur les gisements et la valorisation des coproduits issus de l’agro-industrie. 164p
- Ryschawy J., Tichit M., Bertrand S., Allaire G., Plantureux S., Perrot C., Guinot C., Josien E., Aznar O., Lasseur J., Aubert C., Tchakerian E., Disenhaus C. 2015. Comment évaluer les services rendus par l’élevage ? Une première approche méthodologique sur le cas de la France. INRA Productions Animales, 28 (1), 23-38.
- Travel A., Nys Y., Lopes E., 2010. Facteurs physiologiques et environnementaux influençant la production et la qualité de l’œuf. INRA Productions Animales, 2010, 23 (2), 155-166

F. Compléments

Complément 1. Synthèse des méthodes de calcul des effectifs de bovins

Objectif : comparer quatre méthodes de calcul des effectifs de bovins et les appliquer sur un département naisseur (Aveyron) et un département engraisseur (Vendée).

Données :

Tableau effectif : nombre d'animaux, en nombre de têtes, présents dans les exploitations en fin d'année i.e. un effectif instantané autour du 30 novembre de chaque année. La source de données est la BDNI.

Tableau mouvement : nombre d'animaux maigres et reproducteurs qui entrent et sortent (sortie de l'élevage ou mise en pension) i.e. un flux d'animaux entrés et sortis sur une année. La source de données est la BDNI.

Tableau production finie : production totale d'animaux finis en nombre de têtes, i.e. un flux d'animaux abattus pendant l'année, pour la boucherie ou l'autoconsommation. La source de données est la BDNI.

On notera quelques variations sur les types d'animaux présents dans les trois tableaux utilisés.

Principe Méthode 1 – Effectif instantané

Pour chaque type d'animal de plus de 1 an, on calcule l'effectif en moyennant les effectifs instantanés sur trois années. On utilise uniquement les tables effectifs 2010-2011-2012

Principe Méthode 2 – Effectif net

Pour chaque type d'animal de plus de 1 an, on considère que l'effectif instantané en année n est un proxy de l'effectif initial pour n+1, auquel on ajoute les entrées d'animaux maigres n+1, on soustrait les sorties d'animaux maigres n+1, on soustrait les animaux abattus n+1, tel que :

Effectif net n+1 = effectif instantané n + entrées n+1 – sorties n+1 – animaux abattus n+1

Principe Méthode 3 – Effectif moyen présent

Pour chaque type d'animal, de plus de 1 an, on estime un effectif moyen présent (EMP) en pondérant les effectifs entrés et sortis ou abattus par un temps de présence (voir figure A.1.).

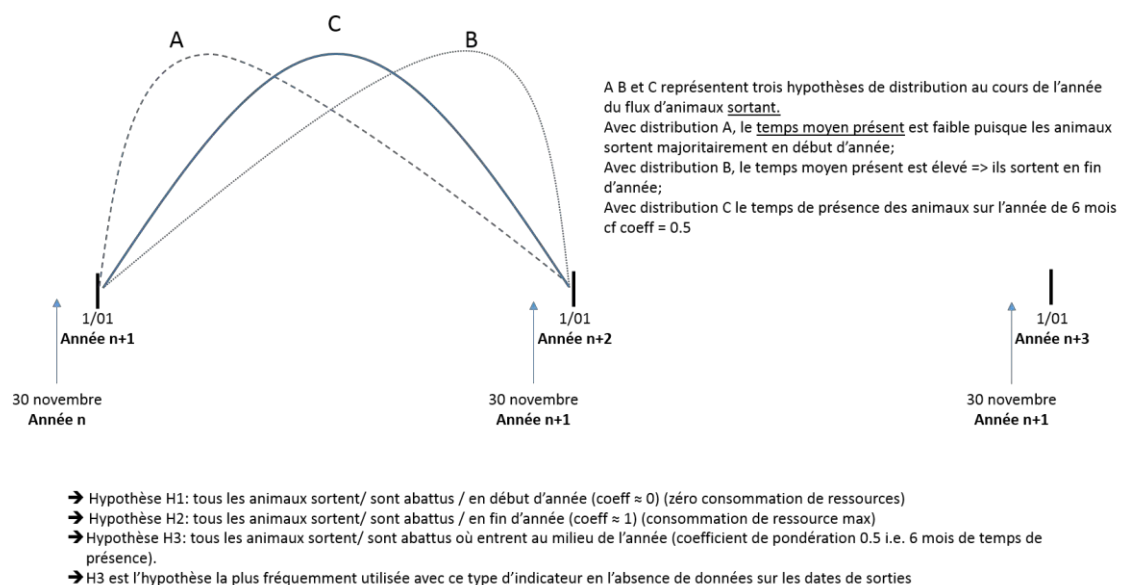


Figure A.1. Représentation des hypothèses utilisées dans la méthode 3

Il y a deux façons de formuler l'EMP:

3A - En partant de l'effectif en début d'année auquel on ajoute ½ animaux entrants **n+1**, on soustrait ½ sorties d'animaux maigres **n+1**, on soustrait ½ animaux abattus **n+1**

3B - En partant de l'effectif en fin d'année auquel on soustrait ½ animaux entrants **n+1**, on ajoute ½ sorties d'animaux maigres **n+1**, on ajoute ½ animaux abattus **n+1**

Pour estimer l'EMP, on applique un coefficient de temps de présence à l'effectif des tables Mouvement et Production finie. Les animaux entrés / sortis ou abattu ont séjourné et donc consommé des ressources alimentaires pendant l'année.

Principe Méthode 4 – Effectif présent – SEEA AFF

Cette méthode a été développée d'après les lignes directrices pour la description des flux physiques et comptage des effectifs animaux dans les systèmes d'élevage (System of Environmental-Economic Accounting for Agriculture, Forestry and Fisheries - SEEA AFF. UN Statistical Division, 2014).

Equations pour mise en œuvre des calculs Méthode 2 – Effectif net

Calcul de l'effectif net 2010 des vaches laitières VL

$$VL_{2010} = VL_{2009} + E_{VL_{2010}} - S_{VL_{2010}} - V_{VLR_{2010}}$$

Avec :

VL₂₀₀₉ = effectif vaches laitières 2009 [Tableau effectifs]

E_{VL₂₀₁₀} = entrées vaches laitières 2010 [Tableau mouvements]

S_{VL₂₀₁₀} = sorties vaches laitières 2010 [Tableau mouvements]

V_{VLR₂₀₁₀} = ventes vaches laitières réforme 2010 [Tableau production finie]

Calcul de l'effectif net 2010 des vaches nourrices VN

$$VN_{2010} = VN_{2009} + E_{VN_{2010}} - S_{VN_{2010}} - V_{VNR_{2010}}$$

Avec :

VN₂₀₀₉ = effectif vaches nourrices 2009 [Tableau effectifs]

E_{VN₂₀₁₀} = entrées vaches nourrices 2010 [Tableau mouvements]

S_{VN₂₀₁₀} = sorties vaches nourrices 2010 [Tableau mouvements]

V_{VNR₂₀₁₀} = ventes vaches nourrices réforme 2010 [Tableau production finie]

Calcul de l'effectif net 2010 des génisses laitières de renouvellement de plus de 2 ans GLR2

$$GLR2_{2010} = GLR2_{2009} + E_{GL2_{2010}} - S_{GL2_{2010}} - V_{GL2_{2010}}$$

Avec :

GLR2₂₀₀₉ = effectif génisses laitières renouvellement 2009 [Tableau effectifs]

E_{GL2₂₀₁₀} = entrées génisses laitières de plus de 2 ans 2010 [Tableau mouvements]

S_{GL2₂₀₁₀} = sorties génisses laitières de plus de 2 ans 2010 [Tableau mouvements]

V_{GL2₂₀₁₀} = ventes génisses laitières de plus de deux ans 2010 [Tableau production finie]

Calcul de l'effectif net 2010 des génisses nourrices de renouvellement de plus de 2 ans GNR2

$$GNR2_{2010} = GNR2_{2009} + E_{GV2_{2010}} - S_{GV2_{2010}}$$

Avec :

GNR2₂₀₀₉ = effectif génisses nourrices renouvellement de plus de deux ans 2009 [Tableau effectifs]

E_{GV2₂₀₁₀} = entrées génisses viande de plus de 2 ans 2010 [Tableau mouvements]

S_{GV2₂₀₁₀} = sorties génisses viande de plus de 2 ans 2010 [Tableau mouvements]

A noter que la production finie de génisse viande de plus de 2 ans n'est pas intégrée ici; elle sera intégrée sur l'effectif de génisses de boucherie ; en revanche on a intégré les mouvements d'animaux vifs en considérant qu'il s'agit d'achat ou vente de futures reproductrices.

Calcul de l'effectif net 2010 des génisses de boucherie de plus de 2 ans GB2

$$GB2_{2010} = GB2_{2009} - V_{GV2_{2010}}$$

Avec :

GB2₂₀₀₉ = effectif génisses boucherie de plus de 2 ans 2009 [Tableau effectifs]

V_{GV2₂₀₁₀} = ventes génisses viande de plus de 2 ans 2010 [Tableau production finie]

Calcul de l'effectif net 2010 des mâles de type laitier de plus de 2 ans ML2

$$ML2_{2010} = ML2_{2009} + E_{ML2_{2010}} - S_{ML2_{2010}} - V_{ML2_{2010}}$$

Avec :

ML2_2009 = effectif mâles laitiers de plus de 2 ans 2009 [Tableau effectifs]

E_ML2_2010 = entrées mâles laitiers de plus de 2 ans 2010 [Tableau mouvements]

S_ML2_2010 = sorties mâles laitiers de plus de 2 ans 2010 [Tableau mouvements]

V_ML2_2010 = ventes mâles laitiers de plus de deux ans 2010 [Tableau production finie]

Calcul de l'effectif net 2010 des mâles de type viande de plus de 2 ans MV2

$$MV2_{2010} = MV2_{2009} + E_{MV2_{2010}} - S_{MV2_{2010}} - V_{MV2_{2010}}$$

Avec :

MV2_2009 = effectif mâles viande de plus de 2 ans 2009 [Tableau effectifs]

E_MV2_2010 = entrées mâles viande de plus de 2 ans 2010 [Tableau mouvements]

S_MV2_2010 = sorties mâles viande de plus de 2 ans 2010 [Tableau mouvements]

V_MV2_2010 = ventes mâles viande de plus de deux ans 2010 [Tableau production finie]

Calcul de l'effectif net 2010 des génisses laitières de renouvellement de 1 à 2 ans GLR1

$$GLR1_{2010} = GLR1_{2009} + E_{GL1_{2010}} - S_{GL1_{2010}} - V_{GL1_{2010}}$$

Avec :

GLR1_2009 = effectif génisses laitières renouvellement de 1 à 2 ans 2009 [Tableau effectifs]

E_GL1_2010 = entrées génisses laitières de 1 à 2 ans 2010 [Tableau mouvements]

S_GL1_2010 = sorties génisses laitières de 1 à 2 ans 2010 [Tableau mouvements]

V_GL1_2010 = ventes génisses laitières de de 1 à 2 ans 2010 [Tableau production finie]

Calcul de l'effectif net 2010 des génisses nourrices de renouvellement de 1 à 2 ans GNR1

$$GNR1_{2010} = GNR1_{2009} + E_{GV1_{2010}} - S_{GV1_{2010}}$$

Avec :

GNR1_2009 = effectif génisses nourrices renouvellement de 1 à 2 ans 2009 [Tableau effectifs]

E_GV1_2010 = entrées génisses nourrices de 1 à 2 ans 2010 [Tableau mouvements]

S_GV1_2010 = sorties génisses nourrices de 1 à 2 ans 2010 [Tableau mouvements]

Calcul de l'effectif net 2010 des génisses de boucherie de 1 à 2 ans GB1

$$GB1_{2010} = GB1_{2009} - V_{GB1_{2010}}$$

Avec :

GB1_2009 = effectif génisses boucherie de 1 à 2 ans 2009 [Tableau effectifs]

V_GV1_2010 = ventes génisses viande de 1 à 2 ans 2010 [Tableau production finie]

Calcul de l'effectif net 2010 des mâles de type laitier de 1 à 2 ans ML1

Si pas de mouvement et pas de production finie alors

$$ML1_{2010} = ML1_{2010}$$

Calcul de l'effectif net 2010 des mâles de type viande de 1 à 2 ans MV1

$$MV1_{2010} = MV1_{2009} + E_{MV1_{2010}} - S_{MV1_{2010}} - V_{MV1_{2010}}$$

Avec :

MV1_2009 = effectif mâles viande de 1 à 2 ans 2009 [Tableau effectifs]

E_MV1_2010 = entrées mâles viande de de 1 à 2 ans 2010 [Tableau mouvements]

S_MV1_2010 = sorties mâles viande de 1 à 2 ans 2010 [Tableau mouvements]

V_MV1_2010 = ventes mâles viande de de 1 à 2 ans 2010 [Tableau production finie]

Equations pour mise en œuvre des calculs Méthode 3 – Effectif moyen présent

Pour mémoire il y a deux méthodes ; soit on considère que 30 novembre est l'effectif initial de l'année suivante ou bien l'effectif final de l'année en cours.

3A – EMP n+1 = effectif année n + ½ animaux entrants n+1 - ½ sorties n+1 - ½ animaux abattus n+1

3B – EMP n+1 = effectif année n+1 - ½ animaux entrants n+1 + ½ sorties n+1 + ½ animaux abattus n+1

On détaille pour chaque type d'animal la formule 3A

Calcul de EMP 2010 des vaches laitières VL

$$VL_{2010} = VL_{2009} + (0.5 * E_{VL_{2010}}) - (0.5 * S_{VL_{2010}}) - (0.5 * V_{VLR_{2010}})$$

Avec :

VL₂₀₀₉ = effectif vaches laitières 2009 [Tableau effectifs]

E_{VL₂₀₁₀} = entrées vaches laitières 2010 [Tableau mouvements]

S_{VL₂₀₁₀} = sorties vaches laitières 2010 [Tableau mouvements]

V_{VLR₂₀₁₀} = ventes vaches laitières réforme 2010 [Tableau production finie]

Calcul de EMP 2010 des vaches nourrices VN

$$VN_{2010} = VN_{2009} + (0.5 * E_{VN_{2010}}) - (0.5 * S_{VN_{2010}}) - (0.5 * V_{VNR_{2010}})$$

Avec :

VN₂₀₀₉ = effectif vaches nourrices 2009 [Tableau effectifs]

E_{VN₂₀₁₀} = entrées vaches nourrices 2010 [Tableau mouvements]

S_{VN₂₀₁₀} = sorties vaches nourrices 2010 [Tableau mouvements]

V_{VNR₂₀₁₀} = ventes vaches nourrices réforme 2010 [Tableau production finie]

Calcul de EMP 2010 des génisses laitières de renouvellement de plus de 2 ans GLR2

$$GLR2_{2010} = GLR2_{2009} + (0.5 * E_{GL2_{2010}}) - (0.5 * S_{GL2_{2010}}) - (0.5 * V_{GL2_{2010}})$$

Avec :

GLR2₂₀₀₉ = effectif génisses laitières renouvellement 2009 [Tableau effectifs]

E_{GL2₂₀₁₀} = entrées génisses laitières de plus de 2 ans 2010 [Tableau mouvements]

S_{GL2₂₀₁₀} = sorties génisses laitières de plus de 2 ans 2010 [Tableau mouvements]

V_{GL2₂₀₁₀} = ventes génisses laitières de plus de deux ans 2010 [Tableau production finie]

Calcul de EMP 2010 des génisses nourrices de renouvellement de plus de 2 ans GNR2

$$GNR2_{2010} = GNR2_{2009} + (0.5 * E_{GV2_{2010}}) - (0.5 * S_{GV2_{2010}})$$

Avec :

GNR2₂₀₀₉ = effectif génisses nourrices renouvellement de plus de deux ans 2009 [Tableau effectifs]

E_{GV2₂₀₁₀} = entrées génisses viande de plus de 2 ans 2010 [Tableau mouvements]

S_{GV2₂₀₁₀} = sorties génisses viande de plus de 2 ans 2010 [Tableau mouvements]

A noter que la production finie de génisse viande de plus de 2 ans n'est pas intégrée dans ce calcul ; elle sera intégrée sur l'effectif de génisses de boucherie ; en revanche on a intégré les mouvements d'animaux vifs en considérant qu'il s'agit d'achat ou vente de futures reproductrices.

Calcul de EMP 2010 des génisses de boucherie de plus de 2 ans GB2

$$GB2_{2010} = GB2_{2009} - (0.5 * V_{GV2_{2010}})$$

Avec :

GB2₂₀₀₉ = effectif génisses boucherie de plus de 2 ans 2009 [Tableau effectifs]

V_{GV2₂₀₁₀} = ventes génisses viande de plus de 2 ans 2010 [Tableau production finie]

Calcul de EMP 2010 des mâles de type laitier de plus de 2 ans ML2

$$ML2_{2010} = ML2_{2009} + (0.5 * E_{ML2_{2010}}) - (0.5 * S_{ML2_{2010}}) - (0.5 * V_{ML2_{2010}})$$

Avec :

ML2₂₀₀₉ = effectif mâles laitiers de plus de 2 ans 2009 [Tableau effectifs]

E_{ML2₂₀₁₀} = entrées mâles laitiers de plus de 2 ans 2010 [Tableau mouvements]

S_{ML2₂₀₁₀} = sorties mâles laitiers de plus de 2 ans 2010 [Tableau mouvements]

V_{ML2₂₀₁₀} = ventes mâles laitiers de plus de deux ans 2010 [Tableau production finie]

Calcul de EMP 2010 des mâles de type viande de plus de 2 ans MV2

$$MV2_{2010} = MV2_{2009} + (0.5 * E_{MV2_{2010}}) - (0.5 * S_{MV2_{2010}}) - (0.5 * V_{MV2_{2010}})$$

Avec :

MV2₂₀₀₉ = effectif mâles viande de plus de 2 ans 2009 [Tableau effectifs]

E_{MV2₂₀₁₀} = entrées mâles viande de plus de 2 ans 2010 [Tableau mouvements]

S_{MV2₂₀₁₀} = sorties mâles viande de plus de 2 ans 2010 [Tableau mouvements]

V_{MV2₂₀₁₀} = ventes mâles viande de plus de deux ans 2010 [Tableau production finie]

Calcul de EMP 2010 des génisses laitières de renouvellement de 1 à 2 ans GLR1

$$\text{GLR1}_{2010} = \text{GLR1}_{2009} + (0.5 * \text{E_GL1}_{2010}) - (0.5 * \text{S_GL1}_{2010}) - (0.5 * \text{V_GL1}_{2010})$$

Avec :

GLR1_2009 = effectif génisses laitières renouvellement de 1 à 2 ans 2009 [Tableau effectifs]

E_GL1_2010 = entrées génisses laitières de 1 à 2 ans 2010 [Tableau mouvements]

S_GL1_2010 = sorties génisses laitières de 1 à 2 ans 2010 [Tableau mouvements]

V_GL1_2010 = ventes génisses laitières de de 1 à 2 ans 2010 [Tableau production finie]

Calcul de EMP 2010 des génisses nourrices de renouvellement de 1 à 2 ans GNR1

$$\text{GNR1}_{2010} = \text{GNR1}_{2009} + (0.5 * \text{E_GV1}_{2010}) - (0.5 * \text{S_GV1}_{2010})$$

Avec :

GNR1_2009 = effectif génisses nourrices renouvellement de 1 à 2 ans 2009 [Tableau effectifs]

E_GV1_2010 = entrées génisses nourrices de 1 à 2 ans 2010 [Tableau mouvements]

S_GV1_2010 = sorties génisses nourrices de 1 à 2 ans 2010 [Tableau mouvements]

Calcul de EMP 2010 des génisses de boucherie de 1 à 2 ans GB1

$$\text{GB1}_{2010} = \text{GB1}_{2009} - (0.5 * \text{V_GB1}_{2010})$$

Avec :

GB1_2009 = effectif génisses boucherie de 1 à 2 ans 2009 [Tableau effectifs]

V_GV1_2010 = ventes génisses viande de 1 à 2 ans 2010 [Tableau production finie]

Calcul de EMP 2010 des mâles de type laitier de 1 à 2 ans ML1

Si pas de mouvement et pas de production finie alors

$$\text{ML1}_{2010} = \text{ML1}_{2010}$$

Calcul de EMP 2010 des mâles de type viande de 1 à 2 ans MV1

$$\text{MV1}_{2010} = \text{MV1}_{2009} + (0.5 * \text{E_MV1}_{2010}) - (0.5 * \text{S_MV1}_{2010}) - (0.5 * \text{V_MV1}_{2010})$$

Avec :

MV1_2009 = effectif mâles viande de 1 à 2 ans 2009 [Tableau effectifs]

E_MV1_2010 = entrées mâles viande de de 1 à 2 ans 2010 [Tableau mouvements]

S_MV1_2010 = sorties mâles viande de 1 à 2 ans 2010 [Tableau mouvements]

V_MV1_2010 = ventes mâles viande de de 1 à 2 ans 2010 [Tableau production finie]

Equations pour mise en œuvre des calculs Méthode 4 – Effectif présent SEEA AFF

Calcul Effectif Présent (période n) = effectif (période n-1) + taux de croissance sur la période n (TC_n)

EP n = effectif n-1 + TC_n

EP n = effectif n-1 + [effectif n + sorties n + ventes n – effectif n-1 – entrées n]

EP n = effectif n + sorties n + ventes n – entrées n

On détaille pour chaque type d'animal la formule 4

Calcul de EP 2010 des vaches laitières VL

$$\text{VL}_{2010} = \text{VL}_{2009} + (\text{S_VL}_{2010}) + (\text{V_VLR}_{2010}) - (\text{E_VL}_{2010})$$

Avec :

VL_2009 = effectif vaches laitières 2009 [Tableau effectifs]

S_VL_2010 = sorties vaches laitières 2010 [Tableau mouvements]

V_VLR_2010 = ventes vaches laitières réforme 2010 [Tableau production finie]

E_VL_2010 = entrées vaches laitières 2010 [Tableau mouvements]

Calcul de EP 2010 des vaches nourrices VN

$$\text{VN}_{2010} = \text{VN}_{2009} + (\text{S_VN}_{2010}) + (\text{V_VNR}_{2010}) - (\text{E_VN}_{2010})$$

Avec :

VN_2009 = effectif vaches nourrices 2009 [Tableau effectifs]

S_VN_2010 = sorties vaches nourrices 2010 [Tableau mouvements]

V_VNR_2010 = ventes vaches nourrices réforme 2010 [Tableau production finie]

E_VN_2010 = entrées vaches nourrices 2010 [Tableau mouvements]

Calcul de EP 2010 des génisses laitières de renouvellement de plus de 2 ans GLR2

$$\text{GLR2}_{2010} = \text{GLR2}_{2009} + (\text{S}_{\text{GL2}}_{2010}) + (\text{V}_{\text{GL2}}_{2010}) - (\text{E}_{\text{GL2}}_{2010})$$

Avec :

GLR2_2009 = effectif génisses laitières renouvellement 2009 [Tableau effectifs]

S_GL2_2010 = sorties génisses laitières de plus de 2 ans 2010 [Tableau mouvements]

V_GL2_2010 = ventes génisses laitières de plus de deux ans 2010 [Tableau production finie]

E_GL2_2010 = entrées génisses laitières de plus de 2 ans 2010 [Tableau mouvements]

Calcul de EP 2010 des génisses nourrices de renouvellement de plus de 2 ans GNR2

$$\text{GNR2}_{2010} = \text{GNR2}_{2009} + \text{V}_{\text{GV2}}_{2010} + \text{S}_{\text{GV2}}_{2010} - \text{E}_{\text{GV2}}_{2010}$$

Avec :

GNR2_2009 = effectif génisses nourrices renouvellement de plus de deux ans 2009 [Tableau effectifs]

S_GV2_2010 = sorties génisses viande de plus de 2 ans 2010 [Tableau mouvements]

V_GV2_2010 = ventes génisses viande de plus de 2 ans 2010 [Tableau production finie]

E_GV2_2010 = entrées génisses viande de plus de 2 ans 2010 [Tableau mouvements]

La catégorie « Génisses de boucherie de plus de 2 ans » est renseigné dans le tableau de l'effectif mais pas dans le tableau de la production finie et des mouvements. Par conséquent on ne pourrait pas calculer l'effectif présent pour cette catégorie mais on propose le calcul du total de la catégorie « génisses » (laitières, nourrices et de boucherie) dans la formule qui suit :

Calcul de EP 2010 du total génisses de plus de 2 ans TG1

$$\text{TG2}_{2010} = \text{TG2}_{2009} + \text{V}_{\text{TG2}}_{2010} - \text{S}_{\text{TG2}}_{2010} + \text{E}_{\text{TG2}}_{2010}$$

Avec :

TG2_2009 = effectif génisses laitières de renouvellement de plus de 2 ans 2009 [Tableau effectifs]

+ effectif génisses nourrices de renouvellement de plus de 2 ans [Tableau effectifs]

+ effectif génisses boucherie de plus de 2 ans 2009 [Tableau effectifs]

V_TG2_2010 = ventes génisses laitières de plus de 2 ans 2010 [Tableau production finie]

+ ventes génisses viande de plus de 2 ans 2010 [Tableau production finie]

S_TG2_2010 = sorties génisses laitières de plus de 2 ans 2010 [Tableau mouvements]

+ sorties génisses viande plus de 2 ans 2010 [Tableau mouvements]

E_TG2_2010 = entrées génisses laitières de plus de 2 ans 2010 [Tableau mouvements]

+ entrées génisses viande plus de 2 ans 2010 [Tableau mouvements]

Calcul de EP 2010 des mâles de type laitier de plus de 2 ans ML2

$$\text{ML2}_{2010} = \text{ML2}_{2009} + \text{S}_{\text{ML2}}_{2010} + \text{V}_{\text{ML2}}_{2010} - \text{E}_{\text{ML2}}_{2010}$$

Avec :

ML2_2009 = effectif mâles laitiers de plus de 2 ans 2009 [Tableau effectifs]

S_ML2_2010 = sorties mâles laitiers de plus de 2 ans 2010 [Tableau mouvements]

V_ML2_2010 = ventes mâles laitiers de plus de deux ans 2010 [Tableau production finie]

E_ML2_2010 = entrées mâles laitiers de plus de 2 ans 2010 [Tableau mouvements]

Calcul de EP 2010 des mâles de type viande de plus de 2 ans MV2

$$\text{MV2}_{2010} = \text{MV2}_{2009} + \text{S}_{\text{MV2}}_{2010} + \text{V}_{\text{MV2}}_{2010} - \text{E}_{\text{MV2}}_{2010}$$

Avec :

MV2_2009 = effectif mâles viande de plus de 2 ans 2009 [Tableau effectifs]

S_MV2_2010 = sorties mâles viande de plus de 2 ans 2010 [Tableau mouvements]

V_MV2_2010 = ventes mâles viande de plus de deux ans 2010 [Tableau production finie]

E_MV2_2010 = entrées mâles viande de plus de 2 ans 2010 [Tableau mouvements]

Calcul de EP 2010 des génisses laitières de renouvellement de 1 à 2 ans GLR1

$$\text{GLR1}_{2010} = \text{GLR1}_{2009} + \text{S}_{\text{GL1}}_{2010} + \text{V}_{\text{GL1}}_{2010} - \text{E}_{\text{GL1}}_{2010}$$

Avec :

GLR1_2009 = effectif génisses laitières renouvellement de 1 à 2 ans 2009 [Tableau effectifs]

E_GL1_2010 = entrées génisses laitières de 1 à 2 ans 2010 [Tableau mouvements]

S_GL1_2010 = sorties génisses laitières de 1 à 2 ans 2010 [Tableau mouvements]

V_GL1_2010 = ventes génisses laitières de de 1 à 2 ans 2010 [Tableau production finie]

Calcul de EP 2010 des génisses nourrices de renouvellement de 1 à 2 ans GNR1

$$\text{GNR1}_{2010} = \text{GNR1}_{2009} + \text{S_GV1}_{2010} + \text{V_GV1}_{2010} - \text{E_GV1}_{2010}$$

Avec :

GNR1_2009 = effectif génisses nourrices renouvellement de 1 à 2 ans 2009 [Tableau effectifs]

S_GV1_2010 = sorties génisses nourrices de 1 à 2 ans 2010 [Tableau mouvements]

V_GV1_2010 = ventes génisses viande de 1 à 2 ans 2010 [Tableau production finie]

E_GV1_2010 = entrées génisses nourrices de 1 à 2 ans 2010 [Tableau mouvements]

La catégorie « Génisses de boucherie de 1 à 2 ans » est renseigné dans le tableau de l'effectif mais pas dans le tableau de la production finie et des mouvements. Par conséquent on ne pourrait pas calculer l'effectif présent pour cette catégorie mais on propose le calcul du total de la catégorie « génisses » (laitières, nourrices et de boucherie) dans la formule qui suit :

Calcul de EP 2010 du total génisses de 1 à 2 ans TG1

$$\text{TG1}_{2010} = \text{TG1}_{2009} + \text{V_TG1}_{2010} - \text{S_TG1}_{2010} + \text{E_TG1}_{2010}$$

Avec :

TG1_2009 = effectif génisses laitières de renouvellement de 1 à 2 ans 2009 [Tableau effectifs]

+ effectif génisses nourrices de renouvellement de 1 à 2 ans [Tableau effectifs]

+ effectif génisses boucherie de 1 à 2 ans 2009 [Tableau effectifs]

V_TG1_2010 = ventes génisses laitières de 1 à 2 ans 2010 [Tableau production finie]

+ ventes génisses viande de 1 à 2 ans 2010 [Tableau production finie]

S_TG1_2010 = sorties génisses laitières de 1 à 2 ans 2010 [Tableau mouvements]

+ sorties génisses viande 1 à 2 ans 2010 [Tableau mouvements]

E_TG1_2010 = entrées génisses laitières de 1 à 2 ans 2010 [Tableau mouvements]

+ entrées génisses viande 1 à 2 ans 2010 [Tableau mouvements]

Calcul de EP 2010 du total mâles (lait et viande) de 1 à 2 ans MV1

$$\text{MV1}_{2010} = \text{MV1}_{2009} + \text{V_MV1}_{2010} + \text{S_MV1}_{2010} - \text{E_MV1}_{2010}$$

Avec :

MV1_2009 = effectif mâles viande de 1 à 2 ans 2009 [Tableau effectifs]

+ effectif lait viande de 1 à 2 ans 2009 [Tableau effectifs]

V_MV1_2010 = ventes mâles de de 1 à 2 ans 2010 [Tableau production finie]

S_MV1_2010 = sorties mâles de 1 à 2 ans 2010 [Tableau mouvements]

E_MV1_2010 = entrées mâles de de 1 à 2 ans 2010 [Tableau mouvements]

Calcul de EP 2010 des autres femelles de moins de 1 an F-1

$$\text{F-1}_{2010} = \text{F-1}_{2009} + \text{V_F-1}_{2010} + \text{S_F-1}_{2010} - \text{E_F-1}_{2010}$$

F-1_2009 = effectif autres femelles de moins de 1 an 2009 [Tableau effectifs]

V_F-1_2010 = ventes génisses de 6 mois à 1 an 2010 [Tableau production finie]

S_F-1_2010 = sorties génisses de 6 mois à 1 an (broutardes) [Tableau mouvements]

E_F-1_2010 = entrées génisses de 6 mois à 1 an (broutardes) [Tableau mouvements]

Calcul de EP 2010 des veaux de boucherie VB-1

$$\text{VB-1}_{2010} = \text{VB-1}_{2009} + \text{V_VB-1}_{2010} + \text{S_VB-1}_{2010} + \text{E_VB-1}_{2010}$$

Avec :

VB-1_2009 = effectif veaux de boucherie 2009 [Tableau effectifs]

V_VB-1_2010 = ventes mâles de 6 mois à 1 an (broutards) [Tableau production finie]

+ ventes veaux à remettre viande [Tableau production finie]

S_VB-1_2010 = sorties mâles de 6 mois à 1 an (broutards) [Tableau mouvements]

+ sorties veaux à remettre viande [Tableau mouvements]

E_VB-1_2010 = entrées mâles de 6 mois à 1 an (broutards) [Tableau mouvements]

+ entrées veaux à remettre viande [Tableau mouvements]

Calcul de EP 2010 des mâles de moins de 1 an M-1

$$M-1_{2010} = M-1_{2009} + V_{M-1_{2010}} + S_{M-1_{2010}} - E_{M-1_{2010}}$$

Avec :

M-1₂₀₀₉ = effectif autres mâles de moins de 1 an 2009 [Tableau effectifs]

V_{M-1₂₀₁₀} = ventes mâles de 6 mois à 1 an 2010 [Tableau production finie]

S_{M-1₂₀₁₀} = sorties veaux à remettre laitiers 2010 [Tableau mouvements]
+ sorties veaux à remettre laitiers 2010 [Tableau mouvements]

E_{M-1₂₀₁₀} = entrées veaux à remettre laitiers 2010 [Tableau mouvements]
+ entrées veaux à remettre laitiers 2010 [Tableau mouvements]

Comparaison des méthodes 1,2, 3 et 4 pour l'Aveyron et la Vendée sur les années 2010-2011-2012

Tableau 1. Comparatif méthodes pour le calcul de l'effectif bovin (UGB) en Vendée sur les années 2010, 2011 et 2012. Les méthodes 2, 3A, 3B et 4 sont exprimés en variation en pourcentage par rapport à la méthode 1.

Vendée	Méthode 1	Méthode 2	Méthode 3A	Méthode 3B	Méthode 4
vaches_laitieres	78363	-26%	-13%	12%	25%
vaches_nourrices	118770	-26%	-13%	13%	26%
genisses_laitieres_+2	10938	-10%	-4%	7%	14%
genisses_nourrices_+2	35451	6%	5%	-1%	39%
genisses_boucherie_+2	9103	-160%	-77%	80%	3%
males_type_laitier_+2	688	1%	1%	0%	1%
males_type_viande_+2	4113	-45%	-21%	24%	3%
genisses_laitieres_1_a_2	15895	-1%	-1%	0%	1%
genisses_nourrices_1_a_2	27827	-2%	0%	1%	11%
genisses_boucherie_1_a_2	6508	-35%	-17%	18%	1%
males_type_laitier_1_a_2	5998	12%	12%	0%	-10%
males_type_viande_1_a_2	16555	-229%	-113%	116%	3%
Total animaux de plus de 1 an	330209	-32%	-16%	17%	21%

Tableau 2. Comparatif méthodes pour le calcul de l'effectif bovin (UGB) en Aveyron sur les années 2010, 2011 et 2012. Les méthodes 2, 3A, 3B et 4 sont exprimés en variation en pourcentage par rapport à la méthode 1.

Aveyron	Méthode 1	Méthode 2	Méthode 3A	Méthode 3B	Méthode 4
vaches_laitieres	54811	-21%	-10%	11%	24%
vaches_nourrices	140597	-13%	-6%	7%	14%
genisses_laitieres_+2	7793	-2%	-1%	1%	3%
genisses_nourrices_+2	18448	10%	10%	-1%	21%
genisses_boucherie_+2	2698	-141%	-67%	74%	7%
males_type_laitier_+2	259	11%	11%	0%	11%
males_type_viande_+2	5496	-29%	-13%	16%	3%
genisses_laitieres_1_a_2	8790	0%	0%	0%	1%
genisses_nourrices_1_a_2	14484	-26%	-11%	15%	43%
genisses_boucherie_1_a_2	2395	3%	3%	0%	3%
males_type_laitier_1_a_2	260	20%	20%	0%	-4%
males_type_viande_1_a_2	2614	-83%	-42%	41%	-1%
Total animaux de plus de 1 an	258645	-16%	-7%	9%	17%

La méthode 4 aboutit à des valeurs plus élevées pour les deux départements car cette méthode utilise à peu près les mêmes principes de calcul que la méthode 3B mais sans pondération des imports, exports et ventes de bovins. Cette absence de pondération explique pourquoi la méthode aboutit systématiquement à des valeurs plus élevées pour toutes les catégories de bovins. Il faut également noter que la méthode 1 est une forme de moyenne des méthodes 3A et 3B, qui fournissent alors les valeurs les plus élevées et les plus faibles indiquant un temps de séjour plus ou moins dans le troupeau.

Complément 2. Tableau des coefficients de conversion des productions physiques en quantités de protéines (FAO, 2003 ; ANSES, 2013)

Production	Teneur en protéines (g/100g)	Densité (kg/L)
Viande bovins	18.5	
Viande ovins	13.5	
Viande caprins	14	
Viande porcins	11	
Viande volaille	12.3	
Oeuf de poule*	10.7	
Lait de vache entier	3.3	1.03
Lait de brebis	5.9	1.04
Lait de chèvre	3.6	1.03

*Poids moyen d'un œuf de poule égal à 60g (Travel et al., 2010)

Complément 3. Valeurs des coefficients de disponibilité pour l'alimentation animale de la matière sèche ($\gamma_{MS,i}$ en T MS/T produit brut) et de la matière azotée ($\gamma_{MAT,i}$ en T MAT/T produit brut), appliqués aux quantités brutes produites au champ dans le cas des matières premières végétales transformées

Complément 3.1: Mélasse de betterave

Variable	Unité	Campagne				Source
		2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013	
Production brute au champ	1000 T MB	35161.49	31836.33	38105.29	33078.64	Agrete, bilans d'approvisionnement Sucre
Production destinée à la filière sucre	1000 T MB	27124.15	24984.05	30103.93	26300.00	
Production destinée à la filière alcool	1000 T MB	8037.33	6852.28	8001.36	6778.64	
Rendement extraction mélasse	MB/MB	0.031	0.031	0.031	0.031	Agrete, méthodologie détaillée du bilan sucre
Teneur MS mélasse	MS/MS	0.761	0.761	0.761	0.761	INRA (2010)
Mélasse disponible alimentation animale	1000 T MB	60.00	56.00	68.00	60.00	Agrete, bilans approvisionnement "Ressources Fourragères"
	1000 T MS	45.66	42.62	51.75	45.66	
$\gamma_{industrie\ mélasse}$	MB/MB	0.771	0.785	0.790	0.795	Calcul
$\gamma_{extraction\ mélasse}$	MS/MB	0.024	0.024	0.024	0.024	
$\gamma_{disponibilité\ mélasse}$	MS/MS	0.071	0.072	0.073	0.074	
$\gamma_{MS\ mélasse}$	MS/MB	0.0013	0.0013	0.0014	0.0014	
$\gamma_{MAT\ mélasse}$	MAT/MB	0.000188	0.000193	0.000196	0.000199	

Complément 3.2: Pulpes de betterave

Variable	Unité	Campagne				Source
		2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013	
Production brute au champ	1000 T MB	35161.49	31836.33	38105.29	33078.64	Agrete, bilans approvisionnement "Sucre"
$\gamma_{extraction\ pulpes}$	MS/MB	0.05	0.05	0.05	0.05	
Production totale pulpes	1000 T MS	1758.07	1591.82	1905.26	1653.93	Calcul
Pulpes disponibles alimentation animale	1000 T MS	1050.00	1033.00	1188.00	1099.00	Agrete, bilans approvisionnement "Ressources Fourragères"
Différentiel production-disponibilité	1000 T MS	708.07	558.82	717.26	554.93	Calcul
$\gamma_{industrie\ pulpes}$	MB/MB	1	1	1	1	
$\gamma_{disponibilité\ pulpes}$	MS/MS	0.597	0.649	0.623	0.664	
$\gamma_{MS\ pulpes}$	MS/MB	0.030	0.032	0.031	0.033	
$\gamma_{MAT\ pulpes}$	MAT/MB	0.00295	0.00320	0.00308	0.00328	

Complément 3.3: Issues de meunerie

Variable	Unité	Campagne				Source
		2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013	
Production brute au champ	1000 T MB	36235.70	35655.07	33967.16	35502.94	Agreste, bilans approvisionnement "Céréales"
Quantité indigène utilisée en meunerie	1000 T MB	4930.14	5663.44	5812.04	4923.00	FranceAgrimer, base Visionet
$\gamma_{industrie\ issues}$	MB/MB	0.136	0.159	0.171	0.139	Calcul
$\gamma_{extraction\ issues}$	MS/MB	0.193	0.193	0.193	0.193	Reseda ¹ et tables INRA ²
$\gamma_{disponibilité\ issues}$	MS/MS	1	1	1	1	Agreste
$\gamma_{MS, issues}$	MS/MB	0.026	0.031	0.033	0.027	Calcul
$\gamma_{MAT, issues}$	MAT/MB	0.00453	0.00529	0.00570	0.00462	Calcul

¹: référence utilisée pour déterminer les proportions de produits obtenus à partir de la mouture du blé tendre (77.7% de farine, 14.9% de sons, 7.1% de remoulages, 0.9% de farine basse et 0.1% de pertes).²: teneurs en MS des composants des issues de meunerie (sons, remoulages et farine basse) utilisées pour calculer la MS globale des issues de meunerie.

Complément 3.4: Corn gluten feed (CGF)

Quantité	Unité	Campagne				Source
		2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013	
Production brute au champ	1000T MB	15513.84	13975.28	15913.88	15393.50	Agreste
Quantité indigène utilisée en amidonnerie de maïs	1000T MB	1968.00	2185.26	2174.32	2252.00	Visionet
$\gamma_{industrie\ CGF}$	MB/MB	0.127	0.156	0.137	0.146	Calcul
$\gamma_{extraction\ CGF}$	MS/MB	0.242	0.242	0.242	0.242	Reseda ¹ et Céréopa ²
$\gamma_{disponibilité\ CGF}$	MS/MS	1	1	1	1	Agreste, méthodologie des bilans Céréales
$\gamma_{MS, CGF}$	MS/MB	0.0307	0.0379	0.0331	0.0354	Calcul
$\gamma_{MAT, CGF}$	MAT/MB	0.00717	0.00883	0.00772	0.00826	Calcul

1 : proportion de CGF obtenus à partir du maïs transformé (26.9%) ; 2 : Teneur en MS du CGF (90%)

Complément 3.5: Gluten 60

Quantité	Unité	Campagne				Source
		2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013	
Production brute au champ	1000T MB	15513.84	13975.28	15913.88	15393.50	Agreste
Quantité indigène utilisée en amidonnerie de maïs	1000T MB	1968.00	2185.26	2174.32	2252.00	Visionet
$\gamma_{industrie\ Gluten}$	MB/MB	0.127	0.156	0.137	0.146	Calcul
$\gamma_{extraction\ Gluten}$	MS/MB	0.040	0.040	0.040	0.040	Reseda ¹ et Céréopa ²
$\gamma_{disponibilité\ Gluten}$	MS/MS	1	1	1	1	Agreste, méthodologie des bilans Céréales
$\gamma_{MS, Gluten}$	MS/MB	0.0051	0.0063	0.0055	0.0059	Calcul
$\gamma_{MAT, Gluten}$	MAT/MB	0.00353	0.00436	0.00381	0.00408	Calcul

1 : proportion de Gluten60 obtenus à partir du maïs transformé (4.5%) ; 2 : Teneur en MS du Gluten60 (89.3%)

Complément 3.6: Tourteaux de soja

Variable	Unité	Campagne				Source
		2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013	
Production brute au champ	1000 T MB	109.84	136.68	122.52	103.94	Agreste, bilans d'approvisionnement « Graines et fruits oléagineux »
Quantité d'origine indigène transformée	1000 T MB	56.72	72.30	69.04	45.56	
Taux extraction	MB/MB	0.77	0.79	0.76	0.79	Agreste, bilans d'approvisionnement « Tourteaux »
Tourteaux produits à partir de graines d'origine indigène	1000 T MB	43.43	57.11	52.41	35.80	Calcul
Tourteaux d'origine indigène disponibles pour l'alimentation animale	1000 T MB	0.00	0.00	45.58	30.93	Agreste, bilans d'approvisionnement « Ressources Fourragères »
$\gamma_{industrie\ TTsoja}$	MB/MB	0.516	0.529	0.564	0.438	Calcul
$\gamma_{extraction\ TTsoja}$ ¹	MS/MB	0.672	0.694	0.666	0.690	
$\gamma_{disponibilité\ TTsoja}$	MS/MS	0.000	0.000	0.870	0.864	
$\gamma_{MS, TTsoja}$	MS/MB	0.000	0.000	0.327	0.261	
$\gamma_{MAT, TTsoja}$	MAT/MB	0.0000	0.0000	0.1685	0.1348	

1: calculé avec une teneur en MS de 87.8% (Céréopa)

Complément 3.7: Tourteaux de colza

Variable	Unité	Campagne				Source
		2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013	
Production brute au champ	1000 T MB	5588.53	4811.59	5369.01	5463.19	Agrete, bilans d'approvisionnement « Graines et fruits oléagineux »
Quantité d'origine indigène transformée	1000 T MB	3650.29	3479.22	3862.23	4286.64	
Taux extraction	MB/MB	0.54	0.55	0.54	0.55	Agrete, bilans d'approvisionnement « Tourteaux »
Tourteaux produits à partir de graines d'origine indigène	1000 T MB	1971.16	1919.10	2084.00	2373.58	Calcul
Tourteaux d'origine indigène disponibles pour l'alimentation animale	1000 T MB	1267.06	1336.92	1821.11	1900.50	Agrete, bilans d'approvisionnement « Ressources Fourragères »
$\gamma_{industrie TTcolza}$	MB/MB	0.653	0.723	0.719	0.785	Calcul
$\gamma_{extraction TTcolza}^1$	MS/MB	0.479	0.489	0.479	0.491	
$\gamma_{disponibilité TTcolza}$	MS/MS	0.643	0.697	0.874	0.801	
$\gamma_{MS, TTcolza}$	MS/MB	0.201	0.246	0.301	0.309	
$\gamma_{MAT, TTcolza}$	MAT/MB	0.0774	0.0949	0.1158	0.1188	

¹ : calculé avec une teneur en MS de 88.7% (Céréopa)

Complément 3.8: Tourteaux de tournesol

Variable	Unité	Campagne				Source
		2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013	
Production brute au champ	1000 T MB	1720.15	1638.91	1880.70	1572.95	Agrete, bilans d'approvisionnement « Graines et fruits oléagineux »
Quantité d'origine indigène transformée	1000 T MB	1197.07	1143.18	1241.63	935.74	
Taux extraction	MB/MB	0.50	0.58	0.53	0.53	Agrete, bilans d'approvisionnement « Tourteaux »
Tourteaux produits à partir de graines d'origine indigène	1000 T MB	596.59	663.18	661.55	500.29	Calcul
Tourteaux d'origine indigène disponibles pour l'alimentation animale	1000 T MB	462.82	524.45	486.45	371.34	Agrete, bilans d'approvisionnement « Ressources Fourragères »
$\gamma_{industrie TTournesol}$	MB/MB	0.696	0.698	0.660	0.595	Calcul
$\gamma_{extraction TTournesol}$	MS/MB	0.442	0.515	0.473	0.474	
$\gamma_{disponibilité TTournesol}$	MS/MS	0.776	0.791	0.735	0.742	
$\gamma_{MS, TTournesol}$	MS/MB	0.239	0.284	0.229	0.209	
$\gamma_{MAT, TTournesol}$	MAT/MB	0.0881	0.1047	0.0847	0.0773	

¹ : calculé avec une teneur en MS de 88.7% (Céréopa)

Complément 4. Correspondance des nomenclatures des rations pour les bovins, ovins et caprins

		Fourrages					Concentrés produits sur l'exploitation			Concentrés achetés					
		Herbe	Dont pâturée	Dont conservée	Mais ensilage	Autres fourrages	Total	Dont céréales	Dont protéagineux	Total	Dont céréales	Dont protéagineux	Dont tourteau de soja	Dont autres tourteaux	Dont divers aliments
<u>Bovins</u>		nomenclature identique													
<u>Ovins viande et lait</u>	Fourrages	Herbe Dont pâturée Dont conservée Mais ensilage Autres fourrages	nomenclature identique												
<u>Ovins viande</u>	Concentrés produits sur l'exploitation	Quantité globale ventilée dans les catégories utilisées pour les bovins						100%	0%						
	Concentrés achetés	identique								50%	0%	5%	24%	17%	
<u>Ovins lait</u>	Concentrés produits sur l'exploitation	identique						100%	0%						
	Concentrés achetés	identique								39%	0%	8%	21%	28%	
<u>Caprins</u>	Fourrages dont Fourrages achetés														
	Concentrés et déshydratés dont achetés	% d'herbe x (Fourrages + concentrés et déshydratés)						Concentrés et déshydratés - Concentrés et déshydratés achetés		39%	0%	8%	21%	28%	
	% de fourrages dans la ration														
	% d'herbe dans la ration														

Complément 5. Appariement des exploitations du réseau Idele avec les exploitations du Recensement agricole 2010

Classement des exploitations dans le recensement agricole 2010			Ration appliquée
Système d'élevage bovin (Institut de l'Elevage 2013)	Combinaison de production	Système fourrager	Ration appliquée pour tous les bovins de l'exploitation (Devun et al, 2012)
Lait spécialisé	Grandes cultures dominantes ou polyc.-élevage	herbe ou herbe 1.8	Polyculture - Elevage laitier de plaine herbager
Lait spécialisé	Grandes cultures dominantes ou polyc.-élevage	herbe-mais	Polyculture - Elevage laitier de plaine maïs - herbe
Lait spécialisé	Grandes cultures dominantes ou polyc.-élevage	maïs	Polyculture - Elevage laitier de plaine maïs dominant
Lait spécialisé	Herbivores dominants	herbe ou herbe 1.8	Elevage spécialisé lait de plaine herbager
Lait spécialisé	Herbivores dominants	herbe-mais	Elevage spécialisé lait de plaine maïs - herbe
Lait spécialisé	Herbivores dominants	maïs	Elevage spécialisé lait de plaine maïs dominant
Lait spécialisé	tous	herbe ou herbe 1.8	Elevage spécialisé lait de montagne maïs dominant
Lait spécialisé	tous	herbe-mais ou maïs	Elevage spécialisé lait de montagne herbager
Lait spécialisé	autres	autres	Ration moyenne systèmes bovins lait spécialisés
Mixte (lait&viande)	Granivores (mixtes ou dominants)		Elevage lait et ateliers granivores
Mixte (lait&viande)	Grandes cultures dominantes ou polyc.-élevage	herbe ou herbe 1.8	Polyculture - Elevage lait et viande de plaine à l'herbe
Mixte (lait&viande)	Grandes cultures dominantes ou polyc.-élevage	herbe-mais ou maïs	Polyculture - Elevage lait et viande de plaine maïs dominant
Mixte (lait&viande)	Herbivores dominants	herbe ou herbe 1.8	Elevage spécialisé lait et viande de plaine à l'herbe
Mixte (lait&viande)	Herbivores dominants	herbe-mais ou maïs	Elevage spécialisé lait et viande de plaine maïs dominant
Mixte (lait&viande)	tous	herbe ou herbe 1.8	Elevage spécialisé lait et viande de montagne à l'herbe
Mixte (lait&viande)	tous	herbe-mais ou maïs	Elevage spécialisé lait et viande de montagne maïs dominant
Mixte (lait&viande)	autres	autres	Autres catégories d'élevages laitiers
Système d'élevage bovin	Combinaison de production	Système d'élevage bovin détail	Ration appliquée pour tous les bovins de l'exploitation (Devun et al, 2012)
Engraisseur	tous	(jeunes bovins moins d'un an + classiques)>50% sorties boucherie	Engraisseurs de jeunes bovins
Allaitant	tous	Veaux sous la mère ou veaux d'Aveyron	Naisseurs-engraisseurs de veaux sous la mère et d'Aveyron
Allaitant	tous	Bœufs	Naisseurs-engraisseurs de bœufs spécialisés
tous systèmes avec Bovins	Granivores (mixtes ou dominants)	tous	Bovins avec ateliers de granivores
Allaitant	Herbivores dominants	Naisseurs broutards ou broutards repoussés ou jb maigres	Naisseurs spécialisés
Allaitant	Grandes cultures dominantes ou polyc.-élevage	Naisseurs broutards ou broutards repoussés ou jb maigres	Naisseurs avec cultures
Allaitant	Herbivores dominants	Naisseurs-engraisseurs jeunes bovins moins d'un an ou classiques	Naisseurs-engraisseurs de jeunes bovins spécialisés
Allaitant	Grandes cultures dominantes ou polyc.-élevage	Naisseurs-engraisseurs jeunes bovins moins d'un an ou classiques	Naisseurs-engraisseurs de jeunes bovins avec cultures
tous systèmes avec Bovins	autres	autres	Ration moyenne systèmes bovins viande
Toutes exploitations avec Ovins viande			Ration appliquée pour les ovins (Jousseins et al, 2014)
Toutes exploitations avec Ovins lait	Départements	Zone d'élevage (Institut de l'élevage 2013)	
	11 12 30 34 48 81	hors zones pastorales (Causses)	Zone fourragère et piémont Rayon de Roquefort
	11 12 30 34 48 81	zones pastorales (Causses)	Zone pastorale Rayon de Roquefort
	64	Piémonts	Zone fourragère Pyrénées Atlantiques
	64	Haute montagne	Zones Hautes Montagnes Pyrénées Atlantiques
	autres		autres
Toutes exploitations avec Caprins		Système fourrager	Ration appliquée pour les caprins (Bossis et al, 2015)
		pastoraux	pastoral
		pâturants	pâturage
		fourragers >2.5 UGB/ha	Autres foin
		fourragers <2.5 UGB/ha	Ensilage maïs
		fourragers <2.5 UGB/ha	Foin légumineuses
		autres	ration moyenne

Complément 6. Identification des groupes de PRA sur la base des indicateurs de production de biens animaux et de la capacité du territoire à satisfaire la consommation alimentaire des animaux présents

Analyse en composantes principales

L'objectif de l'analyse était de déterminer les profils de PRA en termes de niveaux de production et de capacité à satisfaire la demande alimentaire des animaux. Pour ce faire, une analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée sur les 6 variables suivantes : production de biens animaux issus des ruminants (PA_{tot_rum} en kg de protéines/ha SAU), production de biens animaux issus des monogastriques (PA_{tot_mono} en kg de protéines/ha SAU), capacité à satisfaire la demande alimentaire des animaux exprimé en MS issue des fourrages (α_{MS_for}), en MAT issues des fourrages (α_{MAT_for}), en MS issue des concentrés (α_{MS_cc}) et en MAT issues des concentrés (α_{MAT_cc}). Les concentrés comprennent à la fois les céréales et oléoprotéagineux utilisés en l'état, les tourteaux (soja, colza et tournesol) et les coproduit. Les variables de production sont exprimées par ha de SAU en raison de la forte variabilité de la superficie des PRA. Toutes les variables ont été centrées-réduites avant l'analyse. La variable α_p a été ajoutée comme variable supplémentaire : elle n'est pas prise en compte dans l'analyse mais est positionnée par rapport aux autres variables. L'ACP permet de synthétiser les informations issues des 6 variables analysées en déterminant des dimensions qui sont des combinaisons linéaires des variables analysées. Le tableau 7.1. présente les résultats de l'ACP. Les dimensions retenues, 1 et 2 ici, sont celles qui expliquent un pourcentage de variance supérieur à la moyenne (avec 6 variables, moyenne égale à 1/6 soit 0.166).

Tableau 7.1. Résultats de l'analyse en composantes principales des 6 variables caractérisant les profils de fourniture de biens animaux et de capacité à satisfaire la demande alimentaire des animaux des 571 PRA

Composante	Valeur propre	Pourcentage de variance expliquée	Pourcentage cumulé de variance expliquée
1	2.44	40.6	40.6
2	1.93	32.2	72.8
3	0.99	16.4	89.2
4	0.54	8.9	98.1
5	0.07	1.2	99.3
6	0.04	0.7	100

Le cercle des corrélations présenté sur la figure 7.1. permet de visualiser les variables qui composent les 2 premiers axes de l'ACP. Cette information est également présentée dans le tableau 3 qui présente les coordonnées des variables dans les 2 premières dimensions.

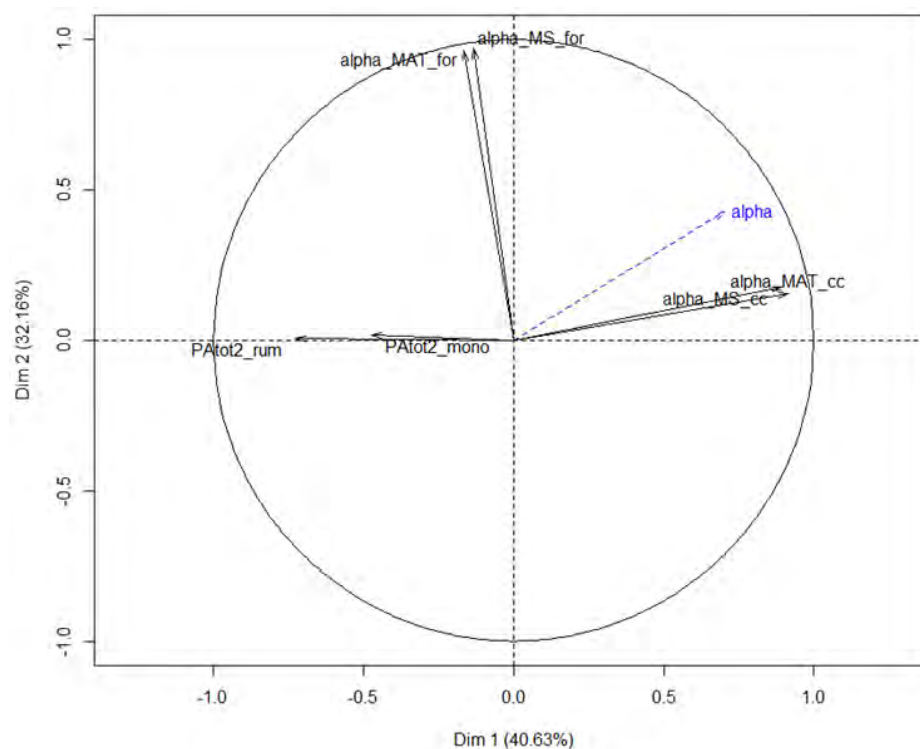


Figure 7.1. Cercle des corrélations pour les deux premières dimensions de l'analyse en composantes principales. La variable *alpha* (capacité globale du territoire à satisfaire la consommation d'aliments des animaux présents) a été ajoutée comme variable supplémentaire. *PA_{tot2_rum}* : production de biens animaux issus des ruminants en kg de protéines/ha ; *PA_{tot2_mono}* : production de biens animaux issus des monogastriques en kg de protéines/ha ; *alpha_MS_for* : capacité du territoire à satisfaire la consommation de MS issue des fourrages par les animaux présents ; *alpha_MAT_for* : capacité du territoire à satisfaire la consommation de MAT issues des fourrages par les animaux présents ; *alpha_MS_cc* : capacité du territoire à satisfaire la consommation de MS issue des aliments concentrés par les animaux présents ; *alpha_MAT_cc* : capacité du territoire à satisfaire la consommation de MAT issues des aliments concentrés par les animaux présents.

Tableau 7.2. Coordonnées des 6 variables analysées sur les deux premières dimensions de l'analyse en composantes principales

	Dimension 1	Dimension 2
α_p MS fourrages	-0.1654	0.9655
α_p MAT fourrages	-0.1322	0.9706
α_p MS concentrés	0.8948	0.1765
α_p MAT concentrés	0.9157	0.1553
PA _{tot} ruminants	-0.7265	0.0055
PA _{tot} monogastriques	-0.4755	0.0171

La dimension 1 est très fortement et positivement corrélée à la capacité de la PRA à satisfaire la demande alimentaire en concentrés, que ce soit pour la MS ou les MAT. La dimension 1 est également fortement et négativement corrélée à la production des ruminants et dans une moindre mesure à la production des monogastriques. La dimension 2 est très fortement et positivement corrélée à capacité de la PRA à satisfaire la demande alimentaire fourragère, que ce soit pour la MS ou les MAT. La dimension 1 reflète ainsi une opposition entre niveau de production animale et capacité à satisfaire la demande alimentaire en concentrés : une coordonnée élevée sur cet axe correspond à un fort niveau de capacité en concentrés associé à une production peu élevée. La dimension 2 reflète la capacité fourragère et elle est relativement indépendante de la dimension 1, bien qu'une coordonnée élevée sur cette dimension soit associée à une coordonnée légèrement négative sur la dimension 1, c'est-à-dire une production animale élevée et une moindre capacité en concentrés. La capacité globale est corrélée positivement aux capacités en concentrés et négativement à la production.

Identification des profils de production et de capacité à satisfaire la demande alimentaire des animaux

Les coordonnées des PRA sur les 5 premières dimensions de l'ACP ont ensuite été utilisées dans une procédure de classification ascendante hiérarchique (CAH). Cette analyse permet de constituer des groupes de PRA qui sont le plus homogène possible par rapport à leurs coordonnées sur les dimensions de l'ACP. La procédure fait apparaître une partition des données avec 4 groupes de PRA, représentés sur la figure 7.2. par rapport aux coordonnées des PRA sur les 2 premières dimensions de l'ACP.

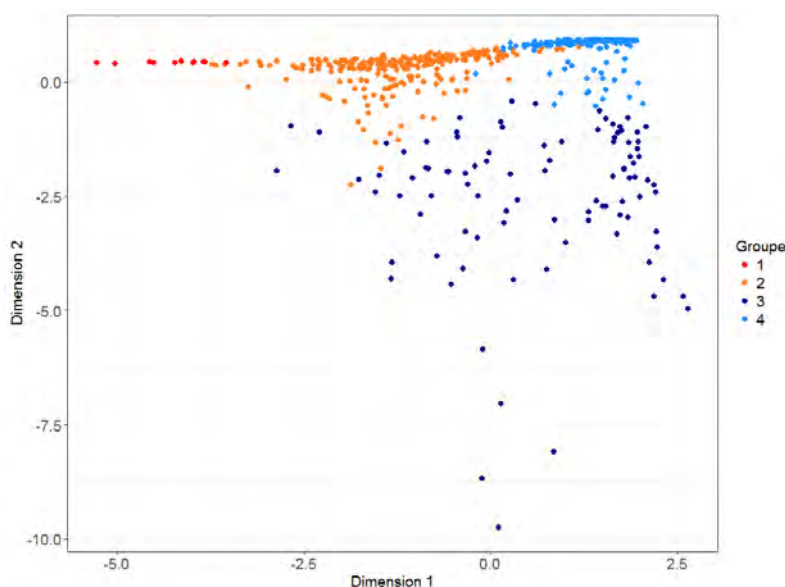


Figure 7.2. Position dans les deux premières dimensions de l'ACP des 4 groupes de PRA identifiés lors de la procédure de classification hiérarchique ascendante sur les coordonnées des PRA issues de l'analyse en composantes principales.

Références bibliographiques citées dans le chapitre 10

Références citées dans les section 10.1.1 et 10.1.2

- Alabouvette C, Olivain C, Steinberg C (2006) Biological Control of Plant Diseases: The European Situation. *Eur J Plant Pathol*, 114:329–341.
- Albert, C., Bonn, A., Burkhard, B., Daube, S., Dietrich, K., Engels, B., ... Wüstemann, H. (2015). Towards a national set of ecosystem service indicators: Insights from Germany. *Ecological Indicators*. doi:10.1016/j.ecolind.2015.08.050
- Ali MH, Talukder MSU (2008) Increasing water productivity in crop production-A synthesis. *Agr Water Manage*, 95:1201–1213. doi:10.1016/j.agwat.2008.06.008
- Ausseil A-GE, Dymond J, Kirschbaum MUF, et al. (2013) Assessment of multiple ecosystem services in New Zealand at the catchment scale. *Environ Model Softw* 43:37–48. doi: 10.1016/j.envsoft.2013.01.006
- Barzman M, Barberi P, Birch ANE, et al. (2015) Eight principles of integrated pest management. *Agron Sustain Dev* 35:1199–1215. doi: 10.1007/s13593-015-0327-9
- Bedoussac L, Journet EP, Hauggaard-Nielsen H, et al. (2015) Ecological principles underlying the increase of productivity achieved by cereal-grain legume intercrops in organic farming. A review. *Agron Sustain Dev* 35:911–935. doi: 10.1007/s13593-014-0277-7
- Bengtsson, J. (2015). Biological control as an ecosystem service: partitioning contributions of nature and human inputs to yield. *Ecological Entomology*, 40, 45–55. doi:10.1111/een.12247
- Bennett, E. M., & Garry, D. (2009). Review and understanding relationships among multiple ecosystem services, 1394–1404. doi:10.1111/j.1461-0248.2009.01387.x
- Bennett AJ, Bending GD, Chandler D, et al. (2012) Meeting the demand for crop production: The challenge of yield decline in crops grown in short rotations. *Biol Rev* 87:52–71. doi: 10.1111/j.1469-185X.2011.00184.x
- Bennett, E. M., Cramer, W., Begossi, A., Cundill, G., Díaz, S., Egoh, B. N., ... Woodward, G. (2015). Linking biodiversity, ecosystem services, and human well-being: three challenges for designing research for sustainability. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 14, 76–85. doi:10.1016/j.cosust.2015.03.007
- Birkhofer, K. Diehl, E. Andersson, J. Ekroos, J. ... Smith, H. G. (2015). Ecosystem services - current challenges and opportunities for ecological research. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2. doi:10.3389/fevo.2014.00087
- Bohan DA, Bonte D, Ma A, Macfadyen S, Martinet V, McInerney GJ, Montoya JM, Mulder C, Pascual U, et al (2016) Networking Our Way to Better Ecosystem Service Provision. *Trends Ecol Evol* 31:112–121. dx.doi.org/10.1016/j.tree.2015.12.003
- Bohan DA, Raybould A, Mulder C, et al. (2013) Ecological Networks in an Agricultural World. doi: 10.1016/B978-0-12-420002-9.00001-9
- Boiffin, J., Malezieux, E., Picard, D., 2001. *Cropping Systems for the Future*, Crop Science: Progress and Prospects, Nösberger, J., Geiger, H.H., Struik, P.C., Cab International.
- Bommarco R, Kleijn D, Potts SG (2013) Ecological intensification: harnessing ecosystem services for food security. *Trends Ecol Evol* 28:230-238. doi:10.1016/j.tree.2012.10.012
- Bonaudo T., Burlamaqui Bendahan A., Sabatier R., Ryschawy J., Bellon S., Leger F., Magda D., Tichit M. (2014) Agroecological principles for the redesign of integrated crop–livestock systems. *European Journal of Agronomy* 57, 43-51.
- Bouthier, A., Pelosi, C., Villenave, C., Peres, G., Hedde, M., Ranjard, L., Vian, J. F., Peigne, J., Cortet, J., Bispo, A., Piron, D. (2014). Impact du travail du sol sur son fonctionnement biologique. In: Jérôme Labreuche, François Laurent, Jean Roger-Estrade, Faut-il travailler le sol ?. *Acquis et innovations pour une agriculture durable . Savoir Faire (Quae)*. FRA : Quae. <http://prodinra.inra.fr/record/400563>
- Brisson N, Gate P, Gouache D, et al. (2010) Why are wheat yields stagnating in Europe? A comprehensive data analysis for France. *F Crop Res* 119:201–212. doi: 10.1016/j.fcr.2010.07.012
- Brunner SH, Huber R, Grêt-Regamey A (2016) A backcasting approach for matching regional ecosystem services supply and demand. *Environ Model Softw* 75:439–458. doi: 10.1016/j.envsoft.2015.10.018
- Bulgarelli D, Garrido-Oter R, Münch PC, et al. (2015) Structure and function of the bacterial root microbiota in wild and domesticated barley. *Cell Host Microbe* 17:392–403. doi: 10.1016/j.chom.2015.01.011
- Chaplin-Kramer R, Kremen C (2012) Pest control experiments show benefits of complexity at landscape and local scales. *Ecol Appl* 22:1936–1948. doi: 10.1890/11-1844.1
- Chabert, A, Sarthou J-P (2017) Practices of conservation agriculture prevail over cropping systems and landscape heterogeneity in understanding the ecosystem service of aphid biocontrol. *Agric Ecosyst Environ* 249:70–79. doi: 10.1016/j.agee.2017.08.005

- Concepción ED, Díaz M, Baquero RA (2008) Effects of landscape complexity on the ecological effectiveness of agri-environment schemes. *Landsc Ecol* 23:135–148. doi: 10.1007/s10980-007-9150-2
- Cordeau S, Triolet M, Wayman S, Steinberg C, Guillemin JP (2016) Bioherbicides: Dead in the water? A review of the existing products for integrated weed management. *Crop Prot* 87:44–49. doi:10.1016/j.cropro.2016.04.016
- Cordell D, Rosemarin A, Schröder JJ, Smit AL (2011) Towards global phosphorus security: A systems framework for phosphorus recovery and reuse options. *Chemosphere* 84:747–758. doi:10.1016/j.chemosphere.2011.02.032
- Crossman ND, Burkhard B, Nedkov S, et al. (2013) A blueprint for mapping and modelling ecosystem services. *Ecosyst Serv* 4:4–14. doi: 10.1016/j.ecoser.2013.02.001
- Cumming, G. S., Olsson, P., Chapin, F. S., & Holling, C. S., 2013. Resilience, experimentation, and scale mismatches in social-ecological landscapes. *Landscape Ecology*, 28(6), 1139–1150. doi:10.1007/s10980-012-9725-4
- Damour G, Dorel M, Quoc HT, et al. (2014) A trait-based characterization of cover plants to assess their potential to provide a set of ecological services in banana cropping systems. *Eur J Agron* 52:218–228. doi: 10.1016/j.eja.2013.09.004
- Dassou AG, Tixier P (2016) Response of pest control by generalist predators to local-scale plant diversity: A meta-analysis. *Ecol Evol* 6:1143–1153. doi: 10.1002/ece3.1917
- Dessaux Y, Grandclément C, Faure D (2016) Engineering the Rhizosphere. *Trends Plant Sci* 21:266–278. doi: 10.1016/j.tplants.2016.01.002
- Dimassi, Bruno Mary, Richard Wylleman, Jérôme Labreuche, Daniel Couture, François Piraux, Jean-Pierre Cohan. Long-term effect of contrasted tillage and crop management on soil carbon dynamics during 41 years. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 15 avril 2014.
- Dimassi, Jean-Pierre Cohan, Jerome Labreuche, Bruno Mary (2013). Changes in soil carbon and nitrogen following tillage conversion in a long-term experiment in Northern France. *Agriculture, Ecosystems and Environment*.
- Doré T, Makowski D, Malézieux E, et al. (2011) Facing up to the paradigm of ecological intensification in agronomy: Revisiting methods, concepts and knowledge. *Eur J Agron* 34:197–210. doi: 10.1016/j.eja.2011.02.006
- Drinkwater LE, Snapp SS (2007) Nutrients in agroecosystems: rethink the management paradigm. *Adv Agron* 92:163-186. doi: 10.1016/S0065-2113(04)92003-2
- Dumont B. (coord), Dupraz P. (coord.), Aubin J., Benoit M., Bouamra-Mechemache Z., Chatellier V., Delaby L., Delfosse C. Dourmad J.Y., Duru M., Frappier L., Friant-Perrot M., Gaigné C., Girard A., Guichet J.L., Havlik P., Hostiou N., Huguenin-Elie O., Klumpp K., Langlais A., Lemauviel-Lavenant S., Le Perchec S., Lepiller O., Méda B., Ryschawy J., Sabatier R., Veissier I., Verrier E., Vollet D., Savini I., Hercule J., Donnars C., 2016, Rôles, impacts et services issus des élevages en Europe. Synthèse de l'expertise scientifique collective, INRA (France), 133 pages.
- Duru M, Therond O, Martin G, Martin-Clouaire R, Magne M, Justes E, Journet EP, Aubertot JN, Savary S, Bergez JE, Sarthou JP (2015a). How to implement biodiversity-based agriculture to enhance ecosystem services : a review. *Agron Sustain Dev*. doi: 10.1007/s13593-015-0306-1.
- Duru M, Therond O, Fares M (2015b). Designing agroecological transitions; A review. *Agron Sustain Dev* 35:0. doi: 10.1007/s13593-015-0318-x.
- Duru, M., Therond, O., 2014. Livestock system sustainability and resilience in intensive production zones: which form of ecological modernization? *Regional Environmental Change*. DOI 10.1007/s10113-014-0722-9
- Emmerson M, Morales MB, Oñate JJ, et al. (2016) How Agricultural Intensification Affects Biodiversity and Ecosystem Services.
- Fagerholm N, Moreno G, Plieninger T, Torralba M (2016) Do European agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem services ? A meta- analysis Do European agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem. *"Agriculture, Ecosyst Environ* 230:150–161. doi: 10.1016/j.agee.2016.06.002
- Fahrig L, Baudry J, Brotons L, Burel FG, Crist TO, Fuller RJ, Sirami C, Siriwardena GM, Martin JL (2011) Functional landscape heterogeneity and animal biodiversity in agricultural landscapes. *Ecol Lett* 14:101–112.
- Faucon M-P, Houben D, Lambers H (2017) Plant Functional Traits: Soil and Ecosystem Services. *Trends Plant Sci* xx:1–10. doi: 10.1016/j.tplants.2017.01.005
- Felipe-lucia, M. R., Comín, F. A., & Bennett, E. M. (2014). Interactions Among Ecosystem Services Across Land Uses in a Floodplain Agroecosystem, 19(1).
- Gaba S, Gabriel E, Chadœuf J, Bonneu F, Bretagnolle V (2016) Herbicides do not ensure for higher wheat yield, but eliminate rare plant species. *Sci Rep* 6:30112. doi:10.1038/srep30112
- Gaba S, Lescourret F, Boudsocq S, Enjalbert J, Hinsinger P, Journet EP, Navas ML, Wery J, Louarn G, Malézieux E, Pelzer E, Prudent M, Ozier-Lafontaine H (2014a) Multiple cropping systems as drivers for providing multiple ecosystem services: from concepts to design. *Agron Sustain Dev* 35:607–623. doi:10.1007/s13593-014-0272-z
- Gaba, S., Fried, G., Kazakou, E., Chauvel, B., & Navas, M. L. (2014b). Agroecological weed control using a functional approach: A review of cropping systems diversity. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(1), 103–119. doi:10.1007/s13593-013-0166-5

- Gagic, V., Kleijn, D., Báldi, A., Boros, G., Jørgensen, H. B., Elek, Z., Garratt, M. P. D., de Groot, G. A., Hedlund, K., Kovács-Hostyánszki, A., Marini, L., Martin, E., Pevere, I., Potts, S. G., Redlich, S., Senapathi, D., Steffan-Dewenter, I., Świtek, S., Smith, H. G., Takács, V., Tryjanowski, P., van der Putten, W. H., van Gils, S. and Bommarco, R. (2017), Combined effects of agrochemicals and ecosystem services on crop yield across Europe. *Ecol Lett*, 20: 1427–1436. doi:10.1111/ele.12850
- Gan-Mor S, Matthews GA (2003) Recent developments in sprayers for application of biopesticides - An overview. *Biosyst Eng* 84:119–125. doi: 10.1016/S1537-5110(02)00277-5
- Garbach K, Milder JC, DeClerck FAJ, Montenegro de Wit M, Driscoll L, Gemmill-Herren B (2016) Examining multi-functionality for crop yield and ecosystem services in five systems of agroecological intensification. *Intern J Agr Sustain* 5903:1–22. doi.org/10.1080/14735903.2016.1174810
- Garbach K (2014) Biodiversity and Ecosystem Services in Agroecosystems. doi: 10.1016/B978-0-444-52512-3.00013-9
- Glare T, Caradus J, Gelernter W, Jackson T, Keyhani N, Köhl J, Marrone P, Morin L, Stewart A (2012) Have biopesticides come of age? *Trends Biotechnol* 30:250–258. doi:10.1016/j.tibtech.2012.01.003
- Gliessman SR (2007) *Agroecology: The ecology of sustainable food systems*. Lewis Publishers (CRC Press, Second edition), Boca Raton, FL.
- Goulding K, Jarvis S, Whitmore A (2008) Optimizing nutrient management for farm systems. *Philos T R Soc B* 363:667–680. doi:10.1098/rstb.2007.2177
- HAGEN M, W. DANIEL KISSLING, RASMUSSEN C, et al. (2012) Biodiversity, species interactions and ecological networks in a fragmented world.
- Heink, U., Hauck, J., Jax, K., & Sukopp, U. (2015). Requirements for the selection of ecosystem service indicators – The case of MAES indicators. *Ecological Indicators*. doi:10.1016/j.ecolind.2015.09.031
- Houot S., Pons M.N., Pradel M., Caillaud M.A., Savini I., Tibi A. (coord), 2014. Valorisation des matières fertilisantes d'origine résiduaire sur les sols à usage agricole ou forestier. Impacts agronomiques, environnementaux, socioéconomiques. Synthèse de l'Expertise scientifique collective, INRA-CNRS-Irstea (France). 100p.
- Hossard L, Archer DW, Bertrand M, et al. (2016) A meta-analysis of maize and wheat yields in low-input vs. conventional and organic systems. *Agron J* 108:1155–1167. doi: 10.2134/agronj2015.0512
- Hossard L, Philibert A, Bertrand M, et al. (2015) Effects of halving pesticide use on wheat production. *Sci Rep* 4:4405. doi: 10.1038/srep04405
- Hynes RK, Boyetchko SM (2006) Research initiatives in the art and science of biopesticide formulations. *Soil Biol Biochem* 38:845–849. doi:10.1016/j.soilbio.2005.07.003
- Ittersum MKVan, Rabbinge R (1997) Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. *Field Crop Res* 52:197–208.
- Iverson AL, Marín LE, Ennis KK, et al. (2014) Do polycultures promote win-wins or trade-offs in agricultural ecosystem services? A meta-analysis. *J Appl Ecol* n/a-n/a. doi: 10.1111/1365-2664.12334
- J.M. Meynard, T. Doré, P. Lucas, 2003. Agronomic approach: cropping systems and plant diseases. *C. R. Biol.*, 326 (2003), pp. 37–46
- Jackson, L. E., Pulleman, M. M., Brussaard, L., Bawa, K. S., Brown, G. G., Cardoso, I. M., ... Noordwijk, M. Van. (2012). Social-ecological and regional adaptation of agrobiodiversity management across a global set of research regions. doi:10.1016/j.gloenvcha.2012.05.002
- Jeuffroy M. H., Michel L., Guichard L., Makowski D., Mignolet C., 2012, Conséquences de l'évolution des systèmes de culture en France sur les rendements du blé et du colza, Colloque SFER-ABER « Le foncier dans tous ses états : productivité, marché et gestion », Lille, 25 mai 2012.
- Justes E., Beaudoin N., Bertuzzi P., Charles R., Constantin J., Dürr C., Hermon C., Joannon A., Le Bas C., Mary B., Mignolet C., Montfort F., Ruiz L., Sarthou J.P., Souchère V., Tournebize J., Savini I., Réchauchère O., 2012. Réduire les fuites de nitrate au moyen de cultures intermédiaires: conséquences sur les bilans d'eau et d'azote, autres services écosystémiques. Synthèse du rapport d'étude, INRA (France), 60 p.
- Kandziora M, Burkhard B, Müller F (2013a) Mapping provisioning ecosystem services at the local scale using data of varying spatial and temporal resolution. *Ecosystem Services* 4: 47–59.
- Kandziora, M., Burkhard, B., Müller, F., (2013b). Interactions of ecosystem properties, ecosystem integrity and ecosystem service indicators—A theoretical matrix exercise. *Ecological Indicators* 28, 54–78. doi:10.1016/j.ecolind.2012.09.006
- Kaye JP, Quemada M (2017) Using cover crops to mitigate and adapt to climate change. A review. *Agron Sustain Dev* 37:4. doi: 10.1007/s13593-016-0410-x
- Kremen C, Iles A, Bacon C (2012) Diversified Farming Systems: An Agroecological, Systems-based. *Ecol Soc* 17:44-63. doi.org/10.5751/ES-05103-170444
- Lamichhane JR, Aubertot JN, Begg G, Birch ANE, Boonekamp P, Dachbrodt-Saaydeh S, Hansen JG, Hovmoller MMS, Jensen JE, Jørgensen LN, Kiss J, Kudsk P, Moonen AC, Rasplus JY, Sattin M, Streito JC, Messéan A (2016) Networking of Integrated

- Pest Management: A powerful approach to address common challenges in agriculture. *Crop Prot* 89:139–151. doi.org/10.1016/j.cropro.2016.07.011
- Lechenet M, Dessaint F, Py G, et al. (2017) Reducing pesticide use while preserving crop productivity and profitability on arable farms. doi: 10.1038/nplants.2017.8
- Lemanceau P, Maron PA, Mazurier S, Mougel C, Pivato B, Plassart P, Ranjard L, Revellin C, Tardy V, Wipf D (2015) Understanding and managing soil biodiversity: a major challenge in agroecology. *Agron Sustain Dev* 35:1-67-81. doi:10.1007/s13593-014-0247-0
- Le Roux X., Barbault R., Baudry J., Burel F., Doussan I., Garnier E., Herzog F., Lavorel S., Lifran R., Roger-Estrade J., Sarthou J.P., Trommetter M. (dir), 2008, Agriculture et biodiversité. Valoriser les synergies, Expertise scientifique collective, rapport, Inra (France).
- Letourneau DK, Armbrrecht I, Rivera BS, et al. (2011) Does plant diversity benefit agroecosystems? A synthetic review. *Ecol Appl* 21:9–21. doi: 10.1890/09-2026.1
- Maes et al., 2014. Mapping and Assessment of Ecosystems and their Services. Indicators for ecosystem assessments under Action 5 of the EU Biodiversity Strategy to 2020. 2nd Report – Final, February 2014. Publications office of the European Union, Luxembourg. 81p.
- Maes, J., Paracchini, M.L., et Zulian, G. (2011). A European assessment of the provision of ecosystem services. JRC Scientific and Technical reports.
- Malézieux E (2011) Designing cropping systems from nature. *Agron Sustain Dev*. doi: 10.1007/s13593-011-0027-z
- Marshall EJP, Brown VK, Boatman ND, et al. (2003) The role of weeds in supporting biological diversity within crop fields: The role of weeds in supporting biological diversity within crop fields. - *Weed Research* 43 (1). *Weed Res* 44:77–89. doi: 10.1046/j.1365-3180.2003.00326.x
- Martin, G., Moraine, M., Ryschawy, J., Magne, M.A., Asai, M., Sarthou, J.P., Duru, M., Therond, O., 2016. Crop-livestock integration beyond the farm level: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 36:53. DOI 10.1007/s13593-016-0390-x
- Mastrangelo, M. E. & Weyland, F. (2014). Concepts and methods for landscape multifunctionality and a unifying framework based on ecosystem services, 345–358. doi:10.1007/s10980-013-9959-9
- Mendes R, Garbeva P, Raaijmakers JM (2013) The rhizosphere microbiome: Significance of plant beneficial, plant pathogenic, and human pathogenic microorganisms. *FEMS Microbiol Rev* 37:634–663. doi: 10.1111/1574-6976.12028
- Mitchell, M. Lockwood, M. Moore, S. A. & Clement, S. (2016). Building systems-based scenario narratives for novel biodiversity futures in an agricultural landscape. *Landscape and Urban Planning*, 145, 45–56. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.09.003
- Moonen A, Bàrberi, P (2008) Agriculture, Ecosystems and Environment Functional biodiversity : An agroecosystem approach. *Methodology* 127:7–21. doi: 10.1016/j.agee.2008.02.013
- Moore FC, Lobell DB (2014) Adaptation potential of European agriculture in response to climate change. *Nat Clim Chang* 4:610–614. doi: 10.1038/nclimate2228
- Moraine M, Duru M, Therond O (2016a) A social-ecological framework for analyzing and designing integrated crop–livestock systems from farm to territory levels. *Renew Agr Food Syst* 1–14. doi.org/10.1017/S1742170515000526
- Moraine M., Grimaldi J., Murgue C., Duru M., Therond O. (2016b). Co-design and assessment of cropping systems for developing crop-livestock integration at the territory level. *Agricultural Systems* 147, 87–97. DOI:10.1016/j.agry.2016.06.002
- Moraine, M., Melac, P., Ryschawy, J., Duru, M., Therond, O. (2017). Participatory design and integrated assessment of collective crop-livestock organic systems. *Ecological indicators*, 72, 340–351.
- Moraine, M., Duru, M., Nicholas, P., Leterme, P., Therond, O. (2014). Farming system design for innovative crop-livestock integration in Europe. *Animal*, DOI : 10.1017/S1751731114001189.
- Nelson A (2017) Crop pests: Crop-health survey aims to fill data gaps. *Nature* 541:464.
- Van Oudenhoven APE, Petz K, Alkemade R, et al. (2012) Framework for systematic indicator selection to assess effects of land management on ecosystem services. *Ecol Indic* 21:110–122. doi: 10.1016/j.ecolind.2012.01.012
- Ozier-Lafontaine H, Publicol M, Blazy JM, Melfort C (2011) SIMSERV: Expert system of assistance to the selection of plants of service for various agro-ecological and socio-economic contexts. Licence CeCILL <http://toolsforagroecology.antilles.inra.fr/simserv>
- Pan Y, Xu Z, Wu J (2013) Spatial differences of the supply of multiple ecosystem services and the environmental and land use factors affecting them. *Ecosyst Serv* 5:4–10. doi: 10.1016/j.ecoser.2013.06.002
- Perez-Jaramillo JE, Mendes R, Raaijmakers JM (2016) Impact of plant domestication on rhizosphere microbiome assembly and functions. *Plant Mol Biol* 90:635–644. doi: 10.1007/s11103-015-0337-7

- Petit S, Trichard A, Biju-Duval L, et al. (2017) Interactions between conservation agricultural practice and landscape composition promote weed seed predation by invertebrates. *Agric Ecosyst Environ* 240:45–53. doi: 10.1016/j.agee.2017.02.014
- Petit S, Munier-Jolain N, Bretagnolle V, et al. (2015) Ecological Intensification Through Pesticide Reduction: Weed Control, Weed Biodiversity and Sustainability in Arable Farming. *Environ Manage* 56:1078–1090. doi: 10.1007/s00267-015-0554-5
- Philippot L, Raaijmakers JM, Lemanceau P, van der Putten WH (2013) Going back to the roots: the microbial ecology of the rhizosphere. *Nat Rev Microbiol* 11:789–799.
- Pinochet X., Noël V., 2012, « Colza : les changements de pratique nuancent les progrès de la sélection », *Perspect. Agric.*, 393, pp. 34-35.
- Pittelkow CM, Liang X, Linquist BA, van Groenigen KJ, Lee J, Lundy ME, van Gestel N, Six J, Venterea RT, van Kessel C (2014) Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture. *Nature*. 517,
- Playan E, Mateos L (2006) Modernization and optimization of irrigation systems to increase water productivity. *Agric. Water Manage* 80:100–116.
- Ponisio LC, Ehrlich PR (2016) Diversification, yield and a new agricultural revolution: Problems and prospects. *Sustain* 8:1–15. doi: 10.3390/su8111118
- Pretty J (2008) Agricultural sustainability: concepts, principles and evidence. *Philos T R Soc B* 363:447–65. doi:10.1098/rstb.2007.2163
- Rapidel, B., Ripoche, A., Allinne, C., Metay, A., Deheuvels, O., Lamanda, N., ... Gary, C. (2015). Analysis of ecosystem services trade-offs to design agroecosystems with perennial crops. *Agronomy for Sustainable Development*. doi:10.1007/s13593-015-0317-y
- Ratnadass A, Fernandes P, Avelino J, Habib R (2011) Plant species diversity for sustainable management of crop pests and diseases in agroecosystems: a review. *Agron Sustain Dev*. doi: 10.1007/s13593-011-0022-4
- Reeve JR, Hoagland LA, Villalba JJ, Carr PM, Atucha A, Cambardella C, Davis DR, Delate K (2016) Organic Farming, Soil Health, and Food Quality: Considering Possible Links. *Adv Agron* 137:319–367. doi:10.1016/bs.agron.2015.12.003
- Remme RP, Schroter M, Hein L (2014) Developing spatial biophysical accounting for multiple ecosystem services. *Ecosyst Serv* 10:6–18. doi: 10.1016/j.ecoser.2014.07.006
- Rollin O, Benelli G, Benvenuti S, et al. (2016) Weed-insect pollinator networks as bio-indicators of ecological sustainability in agriculture. A review. *Agron Sustain Dev* 36:8. doi: 10.1007/s13593-015-0342-x
- Ryschawy J., Martin G., Moraine M., Duru M., Therond O. (2017). Designing crop–livestock integration at different levels: Toward new agroecological models? *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. DOI 10.1007/s10705-016-9815-9
- Sayer J, Sunderland T, Ghazoul J, Pfund JL, Sheil D, Meijaard E, Ventera M, Boedhihartono AK, Day M, Garcia C, van Oosten C, Buck LE (2013) Ten principles for a landscape approach to reconciling agriculture, conservation, and other competing land uses. *P Natl Acad Sci USA* 110:8349–8356. doi:10.1073/pnas.1210595110
- Schellhorn NA, Gagic V, Bommarco R (2015) Time will tell: Resource continuity bolsters ecosystem services. *Trends Ecol Evol* 30:524–530. doi: 10.1016/j.tree.2015.06.007
- Schippers, P. Heide, C. M. Van Der, Peter, H. Sterk, M. Vos, C. C. & Verboom, J. (2015). Landscape diversity enhances the resilience of populations, ecosystems and local economy in rural areas, 193–202. doi:10.1007/s10980-014-0136-6
- Siegwart M, Graillet B, Blachere Lopez C, Besse S, Bardin M, Nicot PC, Lopez-Ferber M (2015) Resistance to bio-insecticides or how to enhance their sustainability: a review. *Front Plant Sci* 6:1–19. doi:10.3389/fpls.2015.00381
- Spiertz H (2012) Avenues to meet food security. The role of agronomy on solving complexity in food production and resource use. *Eur J Agron* 43:1–8. doi.org/10.1016/j.eja.2012.04.004
- Storkey J, Westbury DB (2007) Managing arable weeds for biodiversity. *Pest Manag Sci* 63:517–523
- Tamburini G, De Simone S, Sigura M, et al. (2016) Conservation tillage mitigates the negative effect of landscape simplification on biological control. *J Appl Ecol* 53:233–241. doi: 10.1111/1365-2664.12544
- Therond, O., Duru, M., Roger-Estrade, J., Richard, Guy, 2017. Farming system diversity and knowledge gaps in agronomy: a review. *Agronomy for sustainable development*, forthcoming.
- Torralba, M., N. Fagerholm, P. J. Burgess, G. Moreno, and T. Plieninger. 2016. Do European agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem services? A meta-analysis. *Agriculture Ecosystems & Environment* 230:150-161.
- Tribouillois H., Cruz P., Cohan J-P., Justes E. (2015b). Modelling agroecosystem nitrogen functions provided by cover crop species in bispecific mixtures using functional traits and environmental factors. *Agriculture, Ecosystem and Environment*, 207, 218-228. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2015.04.016>

- Tribouillois, H., Fort, F., Cruz, P., Charles, R., Flores, O., Garnier, E., & Justes, E. (2015a). A functional characterisation of a wide range of cover crop species: growth and nitrogen acquisition rates, leaf traits and ecological strategies. *PLoS one*, 10(3), e0122156.
- Tscharntke T, Karp DS, Chaplin-kramer R, Batáry P, Declerck F, Gratton C, ... Zhang W (2016) When natural habitat fails to enhance biological pest control - Five hypotheses. *Biol. Conserv.* <http://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.10.001>
- Tscharntke T, Tylianakis JM, Rand TA, Didham RK, Fahrig L, Batary P, Bengtsson J, Clough Y, Crist TO, Dormann CF, Ewers RM, Fründ J, Holt RD, Holzschuh A, Klein AM, Kleijn D, Kremen C, Landis DA, Laurance W, Lindenmayer D, Scherber C, Sodhi N, Steffan-Dewenter I, Thies C, Van Der Putten WH, Westphal C (2012) Landscape moderation of biodiversity patterns and processes- eight hypotheses. *Biol. Rev.* doi: 10.1111/j.1469-185X.2011.00216.x
- Tzivilakis J, Warner DJ, Green A, Lewis KA, Angileri V (2016) An indicator framework to help maximise potential benefits for ecosystem services and biodiversity from ecological focus areas. *Ecol Indic* 69:859–872. doi:10.1016/j.ecolind.2016.04.045
- van Reeth, W., 2014. Ecosystem service indicators: are we measuring what we want to manage? In: Jacobs, S., Dendoncker, N., Keune, H. (Eds.), *Ecosystem Services: Global Issues. Local Practices*, San Diego, pp. 41–61.
- Wardle DA (2004) Ecological Linkages Between Aboveground and Belowground Biota. *Science* (80-) 304:1629–1633. doi: 10.1126/science.1094875
- Wood S a., Karp DS, DeClerck F, et al. (2015) Functional traits in agriculture: agrobiodiversity and ecosystem services. *Trends Ecol Evol* 1–9. doi: 10.1016/j.tree.2015.06.013
- Zuber SM, Villamil MB (2016) Meta-analysis approach to assess effect of tillage on microbial biomass and enzyme activities. *Soil Biol Biochem* 97:176–187. doi: 10.1016/j.soilbio.2016.03.011

Références citées dans les sections 10.2.1 et 10.2.2

- Baumont R, Dulphy JP, Sauvant D, Tran G, Meschy F, Aufrère J, Peyraud JL, Champciaux P. Les tables de la valeur des aliments. In : Alimentation des bovins, ovins et caprins. Besoins des animaux – Valeurs des aliments. Tables INRA 2010 (édition remaniée), J Agabriel (coord), p.185-279
- Bennett, A. B., & Isaacs, R. (2014). Landscape composition influences pollinators and pollination services in perennial biofuel plantings. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 193, 1–8. <http://doi.org/10.1016/j.agee.2014.04.016>
- Botreau, R., Farruggia, a, Martin, B., Pomiès, D., & Dumont, B. (2014). Towards an agroecological assessment of dairy systems: proposal for a set of criteria suited to mountain farming. *Animal : An International Journal of Animal Bioscience*, 1–12. <http://doi.org/10.1017/S1751731114000925>
- Carrère, P., Seytre, L., Piquet, M., Landriaux, J., Rivière, J., Chabalier, C., & Orth, D. (2012). Une typologie multifonctionnelle des prairies des systèmes laitiers AOP du Massif central combinant des approches agronomiques et écologiques. *Fourrages* 209, 9-22
- Chollet, S, SERGE RAMBAL, 1 ADELIN FAYOLLE, 1 DANIEL HUBERT, 2 DIDIER FOULQUIE´ , 3 AND ERIC GARNIER1, 4. (2014). Combined effects of climate , resource availability , and plant traits on biomass produced in a Mediterranean rangeland. *Ecology*, 95(3), 737–748.
- Crotty, F. V., Fychan, R., Scullion, J., Sanderson, R., & Marley, C. L. (2015). Assessing the impact of agricultural forage crops on soil biodiversity and abundance. *Soil Biology and Biochemistry*, 91, 119–126. <http://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.08.036>
- Cruz, P., Theau, J. P., Lecloux, E., Jouany, C., & Duru, M. (2010). Typologie fonctionnelle de graminées fourragères pérennes: une classification multitraits. *Fourrages*, 201, 11-17.
- Delaby, L., Pavie, J., McCarthy, B., Comeron, E. A., & Peyraud, J. L. (2016). Les légumineuses fourragères , indispensables à l'élevage de demain Résumé 1 . La place des légumineuses fourragères dans les systèmes fourragers : une histoire agronomique controversée. *Fourrages*, 5–16.
- Devun J., Legarto J., 2011, « Fourrages conservés et modes de récolte : la situation selon les systèmes d'élevage en France », *Fourrages*, 206, pp. 91-106.
- Díaz, S., & Cabido, M. (2001). Vive la différence : plant functional diversity matters to ecosystem processes. *Trends in Ecology & Evolution*, 16(11), 646–655.
- Durand, J.-L., Lorgeou, J., Picon-Cochard, C., & Volaire, F. (2013). Écophysiologie de la réponse et de l'adaptation des plantes fourragères et prairiales au changement climatique. *Fourrages*, 214, 111–118.
- Duru, M., Al Haj Khaled, R., Ducourtieux, C., Theau, J. P., Quadros, F. L. F., & Cruz, P. (2009). Do plant functional types based on leaf dry matter content allow characterizing native grass species and grasslands for herbage growth pattern? *Plant Ecology*, 201(2), 421–433. <http://doi.org/10.1007/s11258-008-9516-9>
- Duru M, Theau JP, Cruz P. 2012. Functional diversity of species-rich managed grasslands in response to fertility, defoliation

- and temperature. *Basic and Applied Ecology* 13: 20-31.
- Duru, M., Cruz, P., Jean Pierre Theau, & Theau, J. P. (2010a). A simplified method for characterising agronomic services provided by species-rich grasslands. *Crop and Pasture Science*, (61), 420–433.
- Duru M, Jouany C, Theau J, et al. (2013b) L'écologie fonctionnelle pour évaluer et prédire l'aptitude. *Fourrages* 213:21–34.
- Duru M, Jouany C, Theau JP, J. P., Granger, S., & Cruz, P. (2014) A plant-functional-type approach tailored for stakeholders involved in field studies to predict forage services and plant biodiversity provided by grasslands. *Grass and Forage Science* 70(1), 2-18. doi: 10.1111/gfs.12129
- Duru, M., Cruz, P., Jouany, C., Theau, J.P., 2010b. Herb'type© : un nouvel outil pour évaluer les services de production fournis par les prairies permanentes. *Productions Animales*. 23, 319-332
- Duru, M., Hazard, L., Jeangros, B., & Mosimann, E. (2001). Fonctionnement de la prairie pâturée: structure du couvert et biodiversité. *Fourrages*, 166, 165-188.
- Duru, M., Jouany, C., Le Roux, X., Navas, M. L., & Cruz, P. (2013a). From a conceptual framework to an operational approach for managing grassland functional diversity to obtain targeted ecosystem services: Case studies from French mountains. *Renewable Agriculture and Food Systems*, (C), 1–16. <http://doi.org/10.1017/S1742170513000306>
- Duru, M., Theau, J. P., & Martin, G. (2015). A methodological framework to facilitate analysis of ecosystem services provided by grassland-based livestock systems. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, (April 2015), 1–17.
- Elgersma, A., & Sjøgaard, K. (2016). Effects of species diversity on seasonal variation in herbage yield and nutritive value of seven binary grass-legume mixtures and pure grass under cutting. *European Journal of Agronomy*, 78, 73-83.
- Faïq, C., Fuzeau, V., Cahuzac, E., Allaire, G., Bortzmeyer, M., Therond, O. (2013). Les prairies permanentes : évolution des surfaces en France. Analyse à travers le Registre Parcellaire Graphique. Collection « Études et documents » du Service de l'Économie, de l'Évaluation et de l'Intégration du Développement Durable (SEEIDD) du Commissariat Général au Développement Durable (CGDD), MEDDE, 18 pp.
- Farruggia, A., Martin, B., Baumont, R., Prache, S., Doreau, M., Hoste, H., & Durand, D. (2008). Quels intérêts de la diversité floristique des prairies permanentes pour les ruminants et les produits animaux ? *Productions Animales*, 21(2), 181–200.
- Finn, J. A., Kirwan, L., Connolly, J., Sebasti??, M. T., Helgadottir, A., Baadshaug, O. H., ... L??scher, A. (2013). Ecosystem function enhanced by combining four functional types of plant species in intensively managed grassland mixtures: A 3-year continental-scale field experiment. *Journal of Applied Ecology*, 50(2), 365–375. <http://doi.org/10.1111/1365-2664.12041>
- Gonzalez-Dugo, V., Durand, J. L., & Gastal, F. (2010). Water deficit and nitrogen nutrition of crops. A review. *Agronomy for sustainable development*, 30(3), 529-544.
- Grigulis, K., Lavorel, S., Krainer, U., Legay, N., Baxendale, C., Dumont, M., ... Clément, J. C. (2013). Relative contributions of plant traits and soil microbial properties to mountain grassland ecosystem services. *Journal of Ecology*, 101(1), 47–57. <http://doi.org/10.1111/1365-2745.12014>
- Grime, J. P. (2006). Trait convergence and trait divergence in herbaceous plant communities: Mechanisms and consequences. *Journal of Vegetation Science*, 17(2), 255. [http://doi.org/10.1658/1100-9233\(2006\)17\[255:TCATDI\]2.0.CO;2](http://doi.org/10.1658/1100-9233(2006)17[255:TCATDI]2.0.CO;2)
- Guérin, G., Moulin, C., & Tchakerian, E. (2009). Les apports de l'approche des systèmes pastoraux à la réflexion sur la gestion des ressources des zones herbagères. *Fourrages*, 200, 489-498.
- Holland, J., Bianchi, F., Entling, M. H., Moonen, A.-C., Smith, B., & Jeanneret, P. (2016). Structure, function and management of semi-natural habitats for conservation biological control: A review of European studies. *Pest Management Science*, (April). <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Hopkins, A., WAINWRIGHT, J., Murray, P. J., Bowling, P. J., & WEBB, M. (1988). 1986 survey of upland grassland in England and Wales: changes in age structure and botanical composition since 1970–72 in relation to grassland management and physical features. *Grass and Forage Science*, 43(2), 185-198.
- Hooper, D. U., Chapin, F. S., Ewel, J. J., Hector, A., Inchausti, P., Lavorel, S., ... & Schmid, B. (2005). Effects of biodiversity on ecosystem functioning: a consensus of current knowledge. *Ecological monographs*, 75(1), 3-35.
- Hubert, B., Deverre, C., Meuret, M. (2014). The rangelands of Southern France : two centuries of radical change. In: Michel Meuret, Fred D. Provenza, dir., *The art and science of shepherding: tapping the wisdom of French herders* (p. 27-43). Austin, Texas (USA) : Acres USA.
- Huyghe, C. (2009). La multifonctionnalité des prairies en France II. Conciliation des fonctions de production et de préservation de l'environnement. *Cahiers Agricultures*, 18(1), 7-16.
- Huyghe, C. (2003). Les fourrages et la production de protéines. *Fourrages*, 174, 145-162.
- Huyghe C., Litrico I. & Surault F. 2012, Agronomic value and provisioning services of multi-species swards. *Grassland Science in Europe* 17, 35-46.

- Küchenmeister, F., Küchenmeister, K., Wrage, N., Kayser, M., & Isselstein, J. (2012). Yield and yield stability in mixtures of productive grassland species: Does species number or functional group composition matter?. *Grassland science*, 58(2), 94-100.
- Lavorel, S., & Garnier, E. (2002). Predicting changes in community composition and ecosystem functioning from plant traits: revisiting the Holy Grail. *Functional Ecology*, 16(5), 545–556. <http://doi.org/10.1046/j.1365-2435.2002.00664.x>
- Jouany C, Cruz P., Duru M., Stroia C., Theau J.P. et al 2009 Variabilité de la réponse aux stress hydrique et thermique d'une prairie naturelle, *Fourrages* n°197 85-88
- LIU Y., WU L., BADDELEY J.A., WATSON C. (2011) : Models of biological nitrogen fixation of legumes. A review. *Agronomy Sustainable Development*, 31(1), 155-172.
- Lobos Ortega, I., Alfaro, M., & Martinez-Lagos, J. (2016). Soil nitrogen contribution to grasslands and its implication for nitrogen use efficiency. *Journal of soil science and plant nutrition*, (AHEAD), 0-0.
- Loreau, M. & de Mazancourt, C. 2013, Biodiversity and ecosystem stability: A synthesis of underlying mechanisms. *Ecology Letters*, 16(SUPPL.1), 106–115
- Loreau, M., Sapjanskas, J., Isbell, F. & Hector, A. (2012). Niche and fitness differences relate the maintenance of diversity to ecosystem function: comment. *Ecology*, 93, 1482–1487
- Lüscher, A., Mueller-Harvey, I., Soussana, J. F., Rees, R. M., & Peyraud, J. L. (2014). Potential of legume-based grassland-livestock systems in Europe: a review. *Grass and Forage Science*, 69(2), 206–228. <http://doi.org/10.1111/gfs.12124>
- Melts, I., Heinsoo, K., & Ivask, M. (2014). Herbage production and chemical characteristics for bioenergy production by plant functional groups from semi-natural grasslands. *biomass and bioenergy*, 67, 160-166.
- Mérot, A., Bergez, J. E., Wallach, D., Duru, M., Charron, F., Capillon, A., ... & Mailhol, J. C. (2011). Gestion de l'eau en Crau: comment s'adapter aux tensions sur la ressource en eau à l'échelle des exploitations agricoles?. *Sciences Eaux et Territoires: la Revue du IRSTEA*, (Hors série n° 2), 8-p
- Meuret, M. and Provenza, F. (2015). How French shepherds create meal sequences to stimulate intake and optimise use of forage diversity on rangeland. *Animal Production Science*, 55, 309-318. DOI : 10.1071/AN14415
- Peyraud, J. L., & Delagarde, R. (2013). Managing variations in dairy cow nutrient supply under grazing. *Animal*, 7(s1), 57-67.
- Picon-Cochard C., Bloor J., Duru M., Zwicke M 2013 Impacts du changement climatique sur les prairies permanentes. *Témoignages d'adaptations aux évolutions climatiques (Fourrages)*
- Plantureux, S, Pottier, E., Carrère, P. (2012) La prairie permanente :nouveaux enjeux, nouvelles définitions ?*Fourrages*, 211, 181-193.
- Recous, S., Chabbi, A., & Chenu, C. (2015). Fertilité des sols et minéralisation de l'azote : sous l'influence des pratiques culturales, quels processus et interactions sont impliqués ? *Fourrages*, 223, 189–196.
- Ruget F, Novak S, Granger S (2006) Du modèle STICS au système ISOP pour estimer la production fourragère . *Adaptation à la prairie , application spatialisée. Fourrages*, 241–256.
- Ruget F., Bernard F., Durand J.L., Graux A.I., Lacroix B., Moreau J.C., Ripoche D 2013 Impacts des changements climatiques sur les productions de fourrages (prairies, luzerne, maïs) : variabilité selon les régions et les saisons (*Fourrages*)
- Sabatier, R., Doyen, L., & Tichit, M. (2014). Heterogeneity and the trade-off between ecological and productive functions of agro-landscapes: A model of cattle–bird interactions in a grassland agroecosystem. *Agricultural Systems*, 126, 38-49.
- Sanderson M a., Brink G, Stout R, Ruth L (2013) Grass–Legume Proportions in Forage Seed Mixtures and Effects on Herbage Yield and Weed Abundance. *Agronomy Journal* 105:1289. doi: 10.2134/agronj2013.0131
- Sautier M, Martin-Clouaire R, Faivre R, Duru M (2013) Assessing climatic exposure of grassland-based livestock systems with seasonal-scale indicators. *Climatic Change* 120(1-2): 341–355. doi: 10.1007/s10584-013-0808-2
- Thornley, J. H. M., & Cannell, M. G. R. (1997). Temperate grassland responses to climate change: an analysis using the Hurley pasture model. *Annals of Botany*, 80(2), 205-221.
- Scehovic, J., Jeangros, B., Troxler, J. Effets de la composition botanique des herbages pâturés sur quelques composants des fromages de type L'Étivaz ou Gruyère. *Revue suisse d'agriculture*. 30, (4), 1998, 167-171
- Somasiri, S. C., Kenyon, P. R., Kemp, P. D., Morel, P. C. H., & Morris, S. T. (2016). Mixtures of clovers with plantain and chicory improve lamb production compared to a ryegrass-white clover sward in the late spring and early summer period. *Grass and Forage Science*, 71(2), 270–280. <http://doi.org/10.1111/gfs.12173>
- Soussana J-F, Lemaire G (2014) Coupling carbon and nitrogen cycles for environmentally sustainable intensification of grasslands and crop-livestock systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. doi: 10.1016/j.agee.2013.10.012
- Sun, S. & Frelich, L.E. 2011, Flowering phenology and height growth pattern are associated with maximum plant height, relative growth rate and stem tissue mass density in herbaceous grassland species. *Journal of Ecology* 99: 991–1000

- Tichit, M., Magda, D., Durant, D., Lauvie, A., Lécivain, E., Martel, G., ... & TEILLARD, F. (2012). Systèmes d'élevage et biodiversité: des antagonismes aux synergies. Actes des 19e Journées des Rencontres Recherches Ruminants, 5-6 décembre 2012, Centre des Congrès de la Villette, Paris, France, 1-8.
- Unkovich, M. 2012, Nitrogen fixation in Australian dairy systems : review and prospect. *Crop and Pasture Science*, 63(9), 787–804.
- Volaire F., Barre P., Béguier V., Bourgoïn T., Durand J.L., Ghesquière M., Jaubertie J.P., Litrico I., Noël D. 2013 Quels idéotypes de plantes fourragères pour des prairies adaptées au changement climatique ? (Fourrages)
- Wilson, P.J., Thompson, K. & Hodgson, J.G. 1999, Specific leaf area and leaf dry matter content as alternative predictors of plant strategies. *New Phytologist* 143:155–162.

Références citées dans la section 10.3

- Abd El-Hack, ME; Alagawany, M; Farag, MR; Tiwari, R; Karthik, K; Dhama, K; Zorriehzahra, J; Adel, M (2016). Beneficial impacts of thymol essential oil on health and production of animals, fish and poultry: a review. *Journal Of Essential Oil Research*. 28:365-382.2:DOI:10.1080/10412905.2016.1153002
- Aberham A, Cicek SS, Schneider P and Stuppner H 2010. Analysis of sesquiterpene lactones, lignans, and flavonoids in wormwood (*Artemisia absinthium* L.) using high-performance liquid chromatography (HPLC)-mass spectrometry, reversed phase HPLC, and HPLC-solid phase extraction-nuclear magnetic resonance. *Journal of agricultural and food chemistry* 58, 10817-10823.
- Adenubi, OT; Fasina, FO; Mcgaw, LJ; Eloff, JN; Naidoo, V (2016). Plant extracts to control ticks of veterinary and medical importance: A review. *South African Journal of Botany*. 105:178-193.2:DOI:10.1016/j.sajb.2016.03.010
- Bennett, R. N. And Wallsgrave, R. M. (1994), Secondary metabolites in plant defence mechanisms. *New Phytologist*, 127: 617–633. doi:10.1111/j.1469-8137.1994.tb02968.x
- Bourgaud, F., Gravot, A., Milesi, S., Gontier, E., (2001) Production of plant secondary metabolites: a historical perspective, *Plant Science*, Volume 161, Issue 5, October 2001, Pages 839-851, ISSN 0168-9452, [http://dx.doi.org/10.1016/S0168-9452\(01\)00490-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0168-9452(01)00490-3).
- Chmolowska, D, Kozak, M, Laskowski, R, AF (2016) Soil physicochemical properties and floristic composition of two ecosystems differing in plant diversity: fallows and meadows. *Plant and soil*. 402(1-2): 317-329. DOI 10.1007/s11104-015-2788-7
- Cowan, Robyn S., Mark W. Chase, W. John Kress, and Vincent Savolainen (2006) "300,000 Species to Identify: Problems, Progress, and Prospects in DNA Barcoding of Land Plants." *Taxon* 55, no. 3 (August 2006): 611–16.
- de Vere, Natasha, Tim C. G. Rich, Sarah A. Trinder, and Charlotte Long. "DNA Barcoding for Plants." In *PLANT GENOTYPING: METHODS AND PROTOCOLS*, edited by Batley, J, 1245:101–18. *Methods in Molecular Biology*, 2015.
- Dajic-Stevanovic, Zora; Pljevljakusic, Dejan. Challenges and Decision Making in Cultivation of Medicinal and Aromatic Plants. In Mathe, A (2015) *Medicinal and aromatic plants of the world: scientific, production, commercial and utilization aspects*. 2352-6831. 978-94-017-9810-5; 978-94-017-9809-9. (1)145-164. WOS:000371736300009
- Dudonne S, Vitrac X, Coutiere P, Woillez M and Merillon JM 2009. Comparative Study of Antioxidant Properties and Total Phenolic Content of 30 Plant Extracts of Industrial Interest Using DPPH, ABTS, FRAP, SOD, and ORAC Assays. *Journal of agricultural and food chemistry* 57, 1768-1774.
- Emami, Saeed, and Sakineh Dadashpour (2015). "Current Developments of Coumarin-Based Anti-Cancer Agents in Medicinal Chemistry." *European Journal of Medicinal Chemistry* 102 (September 2015): 611–30. doi:10.1016/j.ejmech.2015.08.033.
- Farnsworth, N.R. and Soejarto, D.D., 1991. Global importance of medicinal plants. In: Akerele, O., Heywood, V. and Synge, H. eds. *The conservation of medicinal plants: proceedings of an International consultation 21-27 March 1988*, Chiang Mai, Thailand. Cambridge University Press, Cambridge, 25-51.
- Girard, M.; Dohme-Meier, F.; Silacci, P.; Kragten, S. A.; Kreuzer, M. & Bee, G. Forage legumes rich in condensed tannins may increase n-3 fatty acid levels and sensory quality of lamb meat *JOURNAL OF THE SCIENCE OF FOOD AND AGRICULTURE*, {2016}, {96}, {1923-1933}
- Hönigová, I., Vačkář, D., Lorencová, E., Melichar, J., Götzl, M., Sonderegger, G., Oušková, V., Hošek, M., Chobot, K. 2012 Survey on grassland ecosystem services. Report to the EEA – European Topic Centre on Biological Diversity. Prague: Nature Conservation Agency of the Czech Republic, 2012. pp 78.
- Hoste., H. et al. 2012. Direct and indirect effects of bioactive tannin-rich tropical and temperate legumes against nematode infections. *Veterinary Parasitology*, 186:18-27. DOI: 10.1016/j.vetpar.2011.11.042

- Janssens F., A. Peeters, J.R.B. Tallwin, J.P. Bakker, R.M. Bekker, F. Fillat, M.J.M. Oomes (1998). Relationship between soil chemical factors and grassland diversity. *Plant and Soil* 202: 69. doi:10.1023/A:1004389614865
- K.C. Fylaktakidou, D.J. Hadjipavlou-Litina, K.E. Litinas, D.N. Nicolaidis (2004) Natural and synthetic coumarin derivatives with anti-inflammatory/antioxidant activities. *Curr. Pharm. Des.*, 10 (2004), pp. 3813–3833
- Kraujalis P, Venskutonis PR, Kraujaliene V and Pukalskas A 2013. Antioxidant Properties and Preliminary Evaluation of Phytochemical Composition of Different Anatomical Parts of Amaranth. *Plant Foods for Human Nutrition* 68, 322-328.
- Launert E. 1981 *The Hamlyn guide to edible and medicinal plants of Britain and northern Europe*. London etc.: Hamlyn 288p. - col. illus.. En Icones. Geog=1 Floristics (EUROPE)
- Lange, D., 1998. *Europe's medicinal and aromatic plants: their use, trade and conservation*. TRAFFIC International, Cambridge.
- Larbat, R., Adamowicz, S., Robin, C., Han, P., Desneux, N., Le Bot, J. (2016). Interrelated responses of tomato plants and the leaf miner *Tuta absoluta* to nitrogen supply. *Plant Biology*, 18, 495-504. DOI: 10.1111/plb.12425
- X. Le Roux, R. Barbault, J. Baudry, F. Burel, I. Doussan, E. Garnier, F. Herzog, S. Lavorel, R. Lifran, J. Roger-Estrade, J.P. Sarthou, M. Trommetter (éditeurs), 2008. *Agriculture et biodiversité. Valoriser les synergies*. Expertise scientifique collective, rapport, INRA (France).
- Maron, J. L. and Jefferies, R. L. (2001), Restoring enriched grasslands: effects of mowing on species richness, productivity, and nitrogen retention. *Ecological Applications*, 11: 1088–1100. doi:10.1890/1051-0761(2001)011[1088:REGEOM]2.0.CO;2
- Maurice, T.; Colling, G.; Muller, S. & Matthies, D. Habitat characteristics, stage structure and reproduction of colline and montane populations of the threatened species *Arnica montana* *PLANT ECOLOGY*, {2012}, {213}, {831-842}
- Novobilsky, A., Mueller-Harvey, I. and Thamsborg, S.M., 2011. Condensed tannins act against cattle nematodes. *Veterinary parasitology*, 182(2-4): 213-20.
- Michaud A., Plantureux S., Amiaud B., Carrere P., Cruz P., Duru M., Dury B., Farrugia A., Fiorelli J-L., Kerneis E., Baumont R (2011). Identification of the environmental factors which drive the botanical and functional composition of permanent grasslands. *Journal of Agricultural Science*, 150 (2), 219-236. DOI:10.1017/S0021859611000530
- Miles, David (1978). *An introduction to Archaeology*. Great Britain: Ward Lock. p. 99. ISBN 0-7063-5725-6.
- Ognik, K; Cholewinska, E; Sembratowicz, I; Grela, E; Czech, A 2016. The potential of using plant antioxidants to stimulate antioxidant mechanisms in poultry. *Worlds Poultry Science Journal*. 72:291-298.2:DOI:10.1017/S0043933915002779
- Paz Arraiza Berm (2015). *Industrial Use of Aromatic and Medicinal Plants* (OCW Technical University of Madrid), <http://ocw.upm.es/ingenieria-agroforestal/industrial-utilization-of-medicinal-and-aromatic-plants/contenidos/temario/Unit-1/> - consultation juillet 2015
- Peeters A., Beaufoy G., Canals R.M., De Vlieghe A., Huyghe C., Isselstein J., Jones G., Kessler W., Kirilov A., Mosquera-Losada M.R., Nilsdotter-Linde N., Parente G., Peyraud J.-L., Pickert J., Plantureux S., Porqueddu C., Rataj D., Stypinski P., Tonn B., Van Den Pol – Van Dassel A., Vintu V., Wilkins R., 2014. Grassland term definitions and classifications adapted to the diversity of European grassland-based systems. 25th General Meeting of the European Grassland Federation. Aberystwyth, Wales, 8-11 septembre 2014
- Piluzza, G., Sulas, L. and Bullitta, S. (2014), Tannins in forage plants and their role in animal husbandry and environmental sustainability: a review. *Grass Forage Sci*, 69: 32–48. doi:10.1111/gfs.12053
- Plantureux S., Bonischot R., Guckert A. (1987) : Effet des techniques d'exploitation sur la végétation de prairies permanentes lorraines. *Acta oecologica. Oecol. Applic.*, 8(3):229-246.
- Plantureux, S., Bernués, A., Huguenin-Elie, O., Hovstad, K., Isselstein, J., McCracken, D., Théron, O., Vackar, D. (2016). Selecting ecosystem service indicators for grasslands in relation to ecoclimatic region and land-use system. *Proceedings of the 26th General Meeting of EGF, Trondheim, Norway*, 4-8 september 2016, 524-547
- Schreurs, N. M.; Lane, G. A.; Tavendale, M. H.; Barry, T. N. & McNabb, W. C. Pastoral flavour in meat products from ruminants fed fresh forages and its amelioration by forage condensed tannins *ANIMAL FEED SCIENCE AND TECHNOLOGY*, {2008}, {146}, {193-221}
- Silva BA, Ferreres F, Malva JO and Dias ACP 2005. Phytochemical and antioxidant characterization of *Hypericum perforatum* alcoholic extracts. *Food chemistry* 90, 157-167.
- Turner, N. J.; Luczaj, L. J.; Migliorini, P.; Pieroni, A.; Dreon, A. L.; Sacchetti, L. E. & Paoletti, M. G. (2011). Edible and Tended Wild Plants, Traditional Ecological Knowledge and Agroecology *Critical Reviews In Plant Sciences*, 30, 198-225
- Vijayan, K., and C. H. Tsou. "DNA Barcoding in Plants: Taxonomy in a New Perspective." *CURRENT SCIENCE* 99, no. 11 (December 10, 2010): 1530–41.

Références bibliographiques citées dans la section 10.4

- Adler, P.B., Raff, D.A., Lauenroth, W.K. (2001) The effect of grazing on the spatial heterogeneity of vegetation. *Oecologia* 128, 465-479.
- Agreste (2010) *Orientation économique des exploitations agricoles en 2000 et 2010*. [http://agreste.agriculture.gouv.fr/thematiques-872/structures-agricoles-880/exploitations-881/#Orientation_technico-économique_\(Otex\)](http://agreste.agriculture.gouv.fr/thematiques-872/structures-agricoles-880/exploitations-881/#Orientation_technico-économique_(Otex)).
- Agreste (2015) *Statistique Agricole Annuelle 2013 - 2014 provisoire* <http://agreste.agriculture.gouv.fr/enquetes/statistique-agricole-annuelle-saa/>
- Agreste 2013. Bilan d'approvisionnement fourrager – Méthode détaillé. Texte général et tableau final 2010. MAAPAR SCEES - 122p.
- Baumont R., Aufrère J., Meschy F. (2009) La valeur alimentaire des fourrages : rôle des pratiques de culture, de récolte et de conservation. *Fourrages* 198, 153-173.
- Baumont R., Prache S., Meuret M., Morand-Fehr P. (2000) How forage characteristics influence behaviour and intake in small ruminants: a review. *Livestock Production Science* 64, 15–28.
- Billen G., Lassaletta L., Garnier J. (2014). A biogeochemical view of the global agro-food system: Nitrogen flows associated with protein production, consumption and trade. *Global Food Security*, 3(3), 209-219.
- Blanc F., Bocquier F., Agabriel J., D'Hour P., Chillard Y. (2006) Adaptive abilities of the females and sustainability of ruminant livestock systems. A review. *Animal Research* 55, 489–510.
- Bonaudo T., Burlamaqui Bendahan A., Sabatier R., Ryschawy J., Bellon S., Leger F., Magda D., Tichit M. (2014) Agroecological principles for the redesign of integrated crop–livestock systems. *European Journal of Agronomy* 57, 43-51.
- Bonaudo T., Billen G., Garnier J., Barataud F., Bognon S., Marty P., Dupré D. (2015). Le système agro-alimentaire. Un découplage progressif de la production et de la consommation. In N. Buclet. *Essai d'écologie territoriale : l'exemple d'Aussois en Savoie*, CNRS Editions, pp.157-178, 2015, 978-2-271-08887-1. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01395074/>
- Bonnet, C (2013) *Analyse de la filière des "Agneaux de Roquefort" et de l'action collective "Agneau du Patrimoine Lacaune"*. Mémoire de fin d'études d'ingénieur de Montpellier SupAgro. 131 p
- Bossis N., Jost J., Guinamard C., de Boissieu C., Boutin M. 2015. Accompagner le développement de l'autonomie alimentaire en élevage caprin laitier. IDELE, collection résultats, 36p.
- Calvar C. (2015) *Quoi de neuf en élevage de porcs biologiques ? Le point sur la filière, la réglementation, la conduite d'élevage et les résultats de la recherche*. Chambres d'agriculture de Bretagne – pôle porc, 12p.
- Cavailhes J., Bonnemaire J., Raichon C. (1987). Caractéristiques régionales de l'élevage en France. 1. Méthodologie et résultats statistiques 1938-1980. INRA.
- Chemineau P., Malpau B., Brillard J-P., Fostier A. (2009) Saisonnalité de la reproduction et de la production chez les poissons, oiseaux et mammifères d'élevage. *Inra Productions Animales* 22 : 77-90.
- Crouzat E., Mouchet M., Turkelboom F., Byczek C., Meersmans J., Berger F., ... & Lavorel S. (2015). Assessing bundles of ecosystem services from regional to landscape scale: insights from the French Alps. *Journal of Applied Ecology* 52 : 1145-1155.
- Devun J., Brunshwig P., Guinot C. 2012. Alimentation des bovins : rations moyennes et niveaux d'autonomie alimentaire. IDELE, collection résultats, 44p.
- Dorin B., Paillard S., Treyer S. (2010). *Agrimonde: Scénarios et défis pour nourrir le monde en 2050*. Éditions Quae
- Dumont B., et al. (2016). *Quels sont les rôles, impacts et services environnementaux, économiques et sociaux issus des élevages européens et leurs produits ?* Expertise collective INRA, Paris.
- Ertl P., Zebeli Q., Zollitsch W., Knaus W. (2016). Feeding of wheat bran and sugar beet pulp as sole supplements in high-forage diets emphasizes the potential of dairy cattle for human food supply. *Journal of dairy science*, 99, 1228-1236.
- Féret S., Douguet J.M., (2001). Agriculture durable et agriculture raisonnée. Quels principes et quelles pratiques pour la soutenabilité du développement en agriculture ? *NSS* 9 : 58-64.
- FranceAgriMer (2011) *Le marché européen des bovins destinés à l'engraissement : un enjeu stratégique pour la filière bovine allaitante française*. Coll. Les synthèses de FranceAgriMer n°4. Janvier 2011, 12p.
- FranceAgriMer (2013). *Les filières de l'élevage français : chiffres clé*. Les cahiers de FranceAgriMer, 87p.
- FranceAgriMer (2015a). *Les produits carnés, avicoles et laitiers*, août 2015, 200p.
- FranceAgriMer (2015b). *Consommation des produits carnés en 2014*, août 2015, 150p.
- FranceAgriMer (2015c). *Œufs de consommation et ovoproduits*. Les fiches de FranceAgriMer Elevage, février 2015, 2p.

- Gliessman S.R. (2006). *Animals in agroecosystems*. In: *Agroecology: The Ecology of Sustainable Food systems*, second ed. CRC Press, Boca Raton, Florida, pp. 269–285.
- INAO (2014a). *Chiffres clé 2013 des produits sous signes de la qualité et de l'origine : produits laitiers*. <http://www.inao.gouv.fr/Publications/Donnees-et-cartes/Informations-economiques>
- INAO (2014b). *Chiffres clé 2013 des produits sous signes de la qualité et de l'origine : viandes et charcuteries*. <http://www.inao.gouv.fr/Publications/Donnees-et-cartes/Informations-economiques>
- INAO (2015). *Chiffres clé 2015 des produits sous signes de la qualité et de l'origine*. <http://www.inao.gouv.fr/Publications/Donnees-et-cartes/Informations-economiques>
- INRA (2015). *Filière volailles de chair*. 15p. <https://inra-dam-front-resources-cdn.brainsonic.com/ressources/afile/250910-42baa-resource-filiere-volailles-de-chair.html>
- Institut de l'Élevage (2013). *L'élevage d'herbivores au recensement agricole 2010. Exploitations, cheptels, productions*. Dossier Economie de l'Élevage, 2013, 440-441, 100 p.
- Itavi (2016). *Situation de la production et du marché des œufs et des ovoproduits. Bilan 2015*. Note de conjoncture poules pondeuses, Mars 2016, 13p.
- Jousseins C., Tchakerian E., deBoissieu C., Morin E., Turini T. 2014. Alimentation des ovins : rations moyennes et niveaux d'autonomie alimentaire. IDELE, collection résultats, 50p.
- Jouven M., Lapeyronie P., Moulin C-H., Bocquier F. (2010) Rangeland utilization in Mediterranean farming systems, *Animal* 4 : 1746-1757.
- Lubatti G., Bernaudeau A. (2015). *L'agriculture en 2014 en France et en Europe*. INSEE première N°1560. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/1287840>
- Maes J., Teller A., Erhard M., Liqueste C., Braat L., Berry P.M., Egoh B., Puydarrieux P., Fiorina C., Santos F., Paracchini M.L., Keune H., Wittmer H., Hauck J., Fiala I., Verburg P.H., Condé S., Schägner J.P., San Miguel J., Estreguil C., Ostermann O., Barredo J.I., Pereira H.M., Stott A., Laporte V., Meiner A., Olah B., Royo Gelabert E., Spyropoulou R., Petersen J.E., Maguire C., Zal N., Achilleos E., Rubina, Ledoux L., Brown C., Raes C., Jacobs S., Vandewalle M., Connor D., Bidoglio G. (2013). Mapping and Assessment of Ecosystems and their Services. An Analytical Framework for Ecosystem Assessments Under Action 5 of the EU Biodiversity Strategy to 2020. Publications office of the European Union, Luxembourg (2013)
- Maes J., Teller A., Erhard M., Murphy P., Paracchini M.L., Barredo J.I., Grizzetti B., Cardoso A., Somma F., Petersen J., Meiner A., Gelabert E.R., Zal N., Kristensen P., Bastrup-Birk A., Biala K., Romao C., Piroddi C., Fiorina C., Santos F., Naruševičius V., Verboven J., Pereira H.M., Bengtsson J., Gocheva K., Marta-Pedroso C., Snäll T., Estreguil C., San Miguel J., Braat L., Grêt-Regamey A., Perez-Soba M., Degeorges P., Beaufron G., Lillebø A., Malak D.A., Liqueste C., Condé S., Moen J., Östergård H., Czúcz B., Drakou E.G., Zulian G., Laval C. (2014). Mapping and Assessment of Ecosystems and their Services: Indicators for Ecosystem Assessments Under Action 5 of the EU Biodiversity Strategy to 2020. Publications Office of the European Union, Luxembourg (2014).
- Maes J., Liqueste C., Teller A., Erhard M., Paracchini M. L., Barredo, J. I., ... , Meiner, A. (2016). An indicator framework for assessing ecosystem services in support of the EU Biodiversity Strategy to 2020. *Ecosystem services*, 17, 14-23.
- Meyer C. (ed. sc., 2016) *Dictionnaire des Sciences Animales*. [On line]. Montpellier, France, Cirad. [26/11/2016]. <URL : <http://dico-sciences-animales.cirad.fr/> >
- Nardone A., Ronchi B., Lacetera N., Bernabucci U. (2006) Climatic effects on productive traits in livestock. *Veterinary Research Communications*, 30 : 75–81.
- Roguet C, Dufлот B, Delanoue E, Rieu M (2015). Evolution des modèles d'élevage de porcs en Europe, entre performance technico-économique et acceptabilité sociale. *SFER*, 12-13 février 2015, 18p
- Rodríguez-Ortega, T., Oteros-Rozas E., Ripoll-Bosch, R., Tichit, M., Martín-López, B., Bernués, A. (2014). Applying the ecosystem services framework to pasture-based livestock farming systems in Europe. *Animal* 8, 1361-1372.
- Rötter, R., Van de Geijn, S. (1999). Climate Change Effects on Plant Growth, Crop Yield and Livestock. *Climatic Change* 43: 651. doi:10.1023/A:1005541132734
- Röös, E., Patel, M., Spångberg, J., Carlsson, G., & Rydhmer, L. (2016). Limiting livestock production to pasture and by-products in a search for sustainable diets. *Food Policy*, 58, 1-13.
- Ryschawy J., Martin G., Moraine M., Duru M., Therond O. (2017). Designing crop–livestock integration at different levels: Toward new agroecological models? *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, DOI 10.1007/s10705-016-9815-9
- Ryschawy J., Disenhaus C., Bertrand S., Allaire G., Plantureux S., Perrot C., Guinot C., Josien E., Aznar O., Lasseur J., Aubert C., Tchakerian E., Tichit, M. (in press). Assessing multiple goods and services derived from livestock farming on a nation-wide gradient. *Animal*.
- Sabatier, R., Durant, D., Hazard, L., Lauvie, A., Lécivain, E., Magda, D., et Tichit, M. (2015). Towards biodiversity-based livestock systems: review of evidence and options for improvement. *CAB Reviews Perspectives in Agriculture Veterinary Science Nutrition and Natural Resources*, 10(020), 1-13.

- Sauveur B. (1996). Photopériodisme et reproduction des oiseaux domestiques femelles. *INRA Productions Animales* 9 : 25-34.
- Schiere, J.B., Ibrahim, M.N.M., van Keulen, H. (2002). The role of livestock for sustainability in mixed farming: criteria and scenario studies under varying resource allocation. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 90, 139–153.
- Soussana J.F., Lemaire G. (2014). Coupling carbon and nitrogen cycles for environmentally sustainable intensification of grasslands and crop-livestock systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 190: 9-17.
- Tichit, M., Puillet, L., Sabatier, R., Teillard, F. (2011). Multicriteria performance and sustainability in livestock farming systems: functional diversity matters. *Livestock Science* 139: 161–171.
- van Zanten H. H., Mollenhorst H., Klootwijk C. W., van Middelaar C. E., de Boer I. J. (2016). Global food supply: land use efficiency of livestock systems. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21, 747-758.

