



POUR UNE AGRICULTURE BAS CARBONE, RÉSILIENTE ET PROSPÈRE

**POUR UNE TRANSFORMATION
AMBITIEUSE DU SECTEUR**

RAPPORT FINAL - NOVEMBRE 2024

DANS LE CADRE DU
**PLAN DE TRANSFORMATION
DE L'ÉCONOMIE FRANÇAISE**



Avant-propos

L'association The Shift Project travaille depuis 14 ans à éclairer les chemins de la décarbonation de nombreux secteurs économiques : transports, bâtiment, industrie ou encore numérique. Cependant, nous avons – trop – longtemps négligé de nous intéresser à la question du vivant et de la biomasse.

Heureusement, **de nombreuses organisations, think tanks et organismes de recherche ont de longue date étudié ces sujets, proposant des analyses poussées et mobilisatrices** (INRAE, CIRED, IDDRI, Solagro, ADEME, pour ne citer qu'eux), et ainsi constitué un fondement solide pour alimenter le débat incontournable de la transition écologique de l'agriculture française.

Si l'impératif de la transformation du secteur agricole est de plus en plus documenté, la manière de réaliser cette transformation est loin de faire consensus, aussi bien concernant le point d'arrivée que les moyens à déployer. Ce rapport a vocation à imaginer la transformation du système agricole français en y intégrant les contraintes physiques auxquelles il fait face : contraintes énergétiques, climatiques, d'usage des sols, et également en termes de biodiversité et de ressources non-énergétiques. Il vise aussi à instruire les enjeux socio-économiques que ces problématiques soulèvent, et à proposer des réponses.

The Shift Project n'est pas le premier acteur à s'essayer à cet exercice difficile, mais nous souhaitons apporter notre voix et nos analyses à la discussion urgente qui doit être menée afin de préserver la capacité du système agricole à subvenir aux besoins de notre société dans la durée.

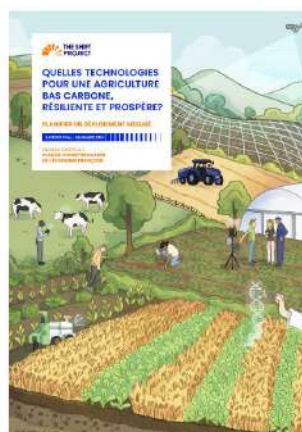
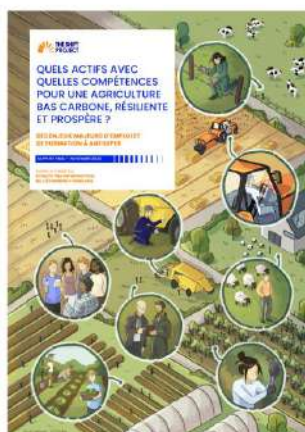
Ce projet s'inscrit dans la continuité de l'approche adoptée dans le cadre du Plan de transformation de l'économie française (PTEF), programme de travail qui a structuré une partie conséquente des travaux du Shift depuis 2020. Il a pour objectif de proposer des trajectoires pour rendre l'économie résiliente aux chocs et neutre en carbone à l'horizon 2050, et effectivement compatible avec la limite de + 2 °C à horizon 2100. Dans cette perspective, il place chaque secteur au sein d'une approche systémique avec un souci de mise en cohérence avec les transformations des autres secteurs économiques traités par ailleurs au sein du Shift Project (transports, industrie, numérique, santé, etc.). Les ressources rares, clés de ces transformations (énergie, matières, emplois, compétences, etc.), font l'objet d'un bouclage itératif. **Les résultats de ce rapport sur l'agriculture se substituent au chapitre agriculture et alimentation du livre « Crises, climat : le Plan de transformation de l'économie française »** (Odile Jacob, 2022), déjà vendu à plus de 110 000 exemplaires. Ils mettent aussi à jour les résultats de l'évaluation des emplois et compétences nécessaires aux transformations de l'agriculture et de l'alimentation (livre précédemment cité et rapport de 2021 dédié à l'emploi).

Ce projet s'est attaché à réaliser un travail de synthèse des travaux existants sur la transition de l'agriculture, ainsi qu'à écouter les points de vue de toutes les parties prenantes du secteur agricole, puisque **plus de 150 organisations ont participé à la concertation menée** (organisations professionnelles agricoles, instituts techniques, associations environnementales, etc.), sans compter les nombreux professionnels du secteur ayant contribué à titre personnel. **Ce travail est le fruit d'une réflexion collective ayant associé près de 300 personnes** de tout bord : groupes de travail, ateliers, échanges, relectures, etc.

Deux focus ont été réalisés dans le cadre de groupes de travail dédiés et ont donné lieu à des publications spécifiques, afin de traiter de manière plus approfondie des enjeux moins documentés qui nous semblent particulièrement importants :

- **Un rapport sur les enjeux d'emploi et de formation agricoles¹**, qui vise à mettre en évidence l'importance, dans le cadre de l'indispensable planification de la transformation du secteur agricole, de dessiner les trajectoires d'emploi et les enjeux de formation qui devront accompagner son évolution.
- **Un rapport sur la place de l'innovation technologique dans la transition écologique de l'agriculture²**, qui propose des éléments méthodologiques pour mettre en perspective les pistes d'innovation actuellement sur la table.

Une Grande Consultation des Agriculteurs (ci-après la « GCA ») a également été menée³, avec l'aide des Shifters, réseau des bénévoles du Shift. Elle a permis aux agriculteurs, premiers concernés par la transition de leur secteur, de partager leurs préoccupations et leurs attentes vis-à-vis de la transition agroécologique⁴, ainsi que la réalité concrète de leur quotidien professionnel, tant dans leur perception du risque climatique que dans l'évolution de leurs pratiques. Un premier volet qualitatif fondé sur des entretiens avec 70 agriculteurs et une enquête quantitative ayant concerné plus de 7 700 agriculteurs ont ainsi largement alimenté nos travaux et font également l'objet d'un rapport dédié. Cette consultation a également permis de faire remonter des considérations liées à l'emploi (aspirations des agriculteurs notamment) et aux compétences.



¹ The Shift Project, Rapport « Quels actifs avec quelles compétences pour une agriculture bas carbone, résiliente et prospère en 2050 ? », Novembre 2024

² The Shift Project, Rapport « Quelles technologies pour une agriculture bas carbone, résiliente et prospère »

³ <http://grandeconsultationagri.fr/>

⁴ Selon la définition de l'agroécologie précisée dans l'Article L1 II. du Code Rural :

« Ces systèmes [de production agroécologiques] privilégient l'autonomie des exploitations agricoles et l'amélioration de leur compétitivité, en maintenant ou en augmentant la rentabilité économique, en améliorant la valeur ajoutée des productions et en réduisant la consommation d'énergie, d'eau, d'engrais, de produits phytopharmaceutiques et de médicaments vétérinaires, en particulier les antibiotiques. Ils sont fondés sur les interactions biologiques et l'utilisation des services écosystémiques et des potentiels offerts par les ressources naturelles, en particulier les ressources en eau, la biodiversité, la photosynthèse, les sols et l'air, en maintenant leur capacité de renouvellement du point de vue qualitatif et quantitatif. Ils contribuent à l'atténuation et à l'adaptation aux effets du changement climatique. »

À propos du think tank The Shift Project

The Shift Project est un groupe de réflexion qui œuvre en faveur d'une économie libérée de la contrainte carbone. Association loi 1901 reconnue d'intérêt général et guidée par l'exigence de la rigueur scientifique, sa mission est d'éclairer et d'influencer le débat sur la transition énergétique et climatique en Europe.

The Shift Project constitue des groupes de travail autour des enjeux les plus décisifs de la transition, produit des analyses robustes et chiffrées sur ces enjeux et élabore des propositions rigoureuses et innovantes. Il mène des campagnes d'influence pour promouvoir les recommandations de ses groupes de travail auprès des décideurs politiques et économiques. Il organise également des événements qui favorisent les discussions entre parties prenantes et bâtit des partenariats avec des organisations professionnelles et académiques, en France et à l'étranger.

The Shift Project a été fondé en 2010 par plusieurs personnalités du monde de l'entreprise ayant une expérience de l'associatif et du public. Il est soutenu par plusieurs grandes entreprises françaises et européennes ainsi que par des organismes publics, des associations d'entreprises et, depuis 2020, par des PME et des particuliers.

Depuis sa création, The Shift Project a initié plus de 50 projets d'étude, participé à l'émergence de manifestations internationales et organisé plusieurs centaines de colloques, forums, ateliers et conférences. Il a pu influencer significativement plusieurs débats publics et décisions politiques importantes pour la transition énergétique, en France et au sein de l'Union européenne.

L'ambition du Shift Project est de mobiliser les entreprises, les pouvoirs publics et les corps intermédiaires sur les risques et opportunités de transformation découlant de la « double contrainte carbone » que constitue le changement climatique d'une part et les tensions sur l'approvisionnement en énergie d'autre part. Sa démarche est marquée par un prisme d'analyse particulier, fondé sur la conviction que l'énergie est un facteur de développement de premier ordre : dès lors, les risques induits par le changement climatique, intimement liés à l'usage de l'énergie, relèvent d'une complexité systémique et transdisciplinaire particulière. Les enjeux climat-énergie conditionnent l'avenir de l'humanité ; il est donc nécessaire d'intégrer cette dimension le plus rapidement possible à notre modèle de société.

Il est épaulé par un réseau de dizaines de milliers de bénévoles regroupés au sein d'une association loi 1901, The Shifters, créée en 2014 pour apporter un soutien bénévole au Shift Project. Initialement conçu comme une structure permettant d'accueillir toute personne souhaitant aider The Shift par un travail de recherche, de relais ou de soutien, The Shifters réalisent de plus en plus de travaux indépendants, mais toujours avec un objectif : contribuer efficacement à la sortie des énergies fossiles à l'échelle française et européenne.

Comité de rédaction



Céline Corpel, Cheffe de projet Agriculture pour The Shift Project, est ingénieure agronome et agricultrice (SCEA Ferme de Remicourt : grandes cultures et agroforesterie).



Corentin Biardeau-Noyers, Ingénieur projet Agriculture pour The Shift Project, est titulaire d'un BTS Agricole et ingénieur agronome, a été animateur pour une organisation professionnelle agricole nationale et a travaillé dans l'administration.



Laure Le Quéré, Ingénieure projet experte pour The Shift Project, est ingénieure agronome et a travaillé plusieurs années dans le conseil aux acteurs agricoles et pour un réseau d'agriculteurs.



Thomas Robert, Chargé de projet Agriculture pour The Shift Project, est titulaire d'un Master 2 en sciences agronomiques et a réalisé plusieurs expériences centrées sur les enjeux agricoles.



Clémence Vorreux, Coordinatrice Agriculture, The Shift Project

Ce projet a aussi reçu l'appui d'**Emma Stokking**, de **Corentin Grange**, de **Lila Wolgust** et de **Mona Poulain** pour la communication.

Remerciements

L'équipe Agriculture du Shift Project souhaite remercier les très nombreux contributeurs et contributrices ayant pris part au travail réalisé, pour la qualité de nos échanges, leur participation aux différents groupes de travail à l'œuvre, ou par leur relectures attentives :

Christophe Alliot (Le Basic), Florence Alin (Unigrains), Olivier Antoine (ORAE), Enzo Armaroli (FNH), équipe de l'Association Française d'Agronomie, Hélène Aussignac (Régions de France), Fabien Balaguer (Association Française d'Agroforesterie), Gilles Baraize (FNPF), Franck Barbier (Interchanvre), Pietro Barbieri (INRAE), Clotilde Bato (SOL), Maëline Baudet (Danone), Léo Benichou (GRDF), Marc Benoit (INRAE), Vincent Berger (HCEA), Nicolas Berthomé (AgroParisTech Alumni), Simon Bertin (Electricité d'Azur), Jean-Marc Blazy (INRAE), Sabine Bonnot (Planet-Score), Thomas Bonvillain (I4CE), Astrid Bouchedor (Terre de liens), Emmanuelle Bourgeat (Céréopa), Michel Boucly, Jean-Marc Bournigal (SEMAE), David Boutiller (Crédit Agricole), Charlie Brocard (IDDRI), François Brochard (Vensys), Jeanne Cadiou (IDDRI), Matthieu Calame, Eric Campos (Crédit Agricole), Emilie Cassou, Manon Castagné (Les Amis de la Terre), Aurélie Catallo (IDDRI), Dominique Chabanet (CGAAER), Cédric Cabrol, Fabien Champion (Confédération paysanne), Grégory Chayrigues, Dylan Chevalier (LDC), Alexandre Coccozza (Limagrain), Gildas Cotten (Unifa), Christophe Courousse (Terrena), Christian Couturier (Solagro), Quitterie Daire-Gonzalez (Syngenta), Marie-Cécile Damave (Agridées), Olivier Dager (FNSEA), Laurent Debuyer (AXEMA), Jean-François Delaitre (AAMF), Frédérique Delcroix (WWF France), Julia Delente (Danone), Jean-Marc Delsaut (éleveur), Joséphine Demay (INRAE), Mathieu Désolé (ITAVI), Sarah Deysine (Agrial), Sylvain Doublet (Solagro), Philippe Dubief (AGPB), Francky Duchâteau (AGPB), Christelle Duchêne (Interbev), Boris Dufлот (IDELE), Gabrielle Dufour (Agridées), Olivier Dupire (APCA), Jean-Yves Dupré, Anne-Laure Durand, Patrice Durand, Olivier Dusart (FGR), Sandrine Espagnol (IFIP), Elyne Etienne (FNH), Clément Faurax (FNSEA), Samuel Féret (I4CE), Amélie Fischer (Idele, GIS Avenir Elevage), Lucas Francou Damesin (Parlons Climat), Stéphane Galais (Confédération paysanne), Ulysse Gaudaré (INRAE), Guillaume Gauthier (Interbev), Faustine Gaymard (SGPE), Sophie Gendre (Arvalis), Tanguy Graffin (Greenlex), le Groupe de travail Agriculture-Alimentation du Lierre, Ronan Groussier (RAC), Thomas Guilbaud (SCE), Vincent Guillot (CGB), Nicolas Guilpart (AgroParisTech), Helen Ha (L214), Marie Hélène Jeuffroy (INRAE), Philippe Heusèle (Intercéréales), Vincent Jannot (Terre de liens), Timothé Jany (Céréopa), Vincent Jean-Baptiste (GRDF), Frederik Jobert (SGPE), Maureen Jorand (Collectif Nourrir), Romain Joya (Ceresco), Bernadette Julier (INRAE), Juliette Kacprzak (ECF), Gilles Keller (Coordination rurale), Marion Kentzel (Idele), Nathalie Kerhoas (Bleu Blanc Coeur), Alessandra Kirsch (Agriculture Stratégies), Rachel Kolbe Semhoun (InVivo), Alice L'Hostis (CTBM), Joël Lagneau (InterChanvre), Clément Lajoux, Félix Lallemand (Les Greniers d'Abondance), Julien Lamour (CRBE - CNRS), Edouard Lanckriet (Agrosolutions), Etienne Lapierre (Terrasolis), Martin Laurenceau (MASA), Anne Laurent (SGPE), Capucine Laurent (CEC), Françoise Lavarde (CGAAER), Patricia Le Cadre (Céréopa), Chantal Le Mouël (INRAE), Dominique Lefebvre (Crédit Agricole), Adrien Lefèvre (APLI/FaireFrance), Véronique Le Floc'h (Coordination Rurale), Guillaume Legonidec (FNEDT), Ludovic Le Jeune (GRDF), Alice Lemaire (Interbev), Darrell Leroux (FNSEA), Carole Leverrier (Terrasolis), Gaëtan Louarn (INRAE), Léa Lugassy (PADV), Sarah Lumbroso (AScA), Paul Luu (4pour1000), Laurence Marandola (Confédération paysanne), Alizée Marceau (ALTAA), Vincent Marchal (AXA Climate), Jean-Christophe Maréchal (BRGM), Sabine Martin (FNE), Timothé Masson (CGB), Diane Masure (agricultrice, APAD), Rodolphe Merand (Réseau Cristal), Thomas Merle, Mehdi Miftah (FNCUMA), Catherine Migault (FARM), Pierre Mischler (Idele), Olivier Mora (INRAE), Brian Mordasini (L214), Chloé Morel (Coordination Rurale), Omar Mouhdi (WWF France), Claudio Muskus (Fermes d'Avenir), Yann Nedelec (ANVOL), (Agri Sud-Ouest Innovation), Valérie Noël, Marc Oswald (Istom), Benjamin Perdreau (La Coopération Agricole), Laurence Picot (STEF), Isabelle Pion (INRAE), Emilie Pommier (Electricité d'Azur), Alexandre Poncet (Limagrain), Camille Poutrin, Xavier Poux (AScA), Florence Pradier (La Coopération Agricole), Jérémie Priarollo (Solagro), Pierre Prigent (WWF France), Nirina Ratsimba (INRAE), Clément Raulin (agriculteur), Matthieu Replinger (Interbev), Alice Richard (CNPO), Aurélie Ringard (Biolait), Mathilde Roby (Jeunes Agriculteurs), Lucile Rogissart (I4CE), Elsa Rouches (AAMF), Hilaire Roucou (FRSEA Hauts-de-France), Arnaud Rousseau (FNSEA), Benoit Rouyer (CNIEL), Olivia Ruch (AAMF), Mathieu Saujot (IDDRI), Jean-Marie Séronie (Académie d'Agriculture), Mathieu Simonnet (Terrasolis), Pierre Simonnet (Interbev Bretagne), Laurent Siozard, Guilhem Soutou (Fondation Carasso), Olivier Therond (INRAE), Frédéric Thomas, Maud Thomas (ANPN), Franck Tivierge (FGA CFDT),

Audrey Trévisiol (ADEME), Anne Trombini (PADV), Jean-Baptiste Turmel, Thomas Uthayakumar (FNH), Charles Vaury (Syngenta), Mathieu Velghe (IDELE), Denis Voisin (Greenlex), Lan Anh Vu Hong (Les Greniers d'Abondance), Pierre Weill (Bleu Blanc Coeur), Catherine Zadjian (vétérinaire).

The Shift Project s'est appuyé durant ce rapport sur un Conseil scientifique qui a été consulté sur chaque phase du projet, et qui a pu faire ses retours sur les différentes versions du rapport. Nous les remercions pour le temps qu'ils nous ont accordé et pour leur exigence :

Vazken Andreassian (INRAE), Pierre-Marie Aubert (IDDRI), René Baumont (INRAE), Eric Ceschia (INRAE), Petros Chatzimpiros (LIED), Sylvain Delzon (INRAE), Sophie Devienne (AgroParisTech, OFPM), Bertrand Hervieu (Académie d'agriculture), Sylvain Pellerin (INRAE), Jean-Louis Peyraud (INRAE), François Purseigle (INP-ENSAT), Serge Zaka (AgroClimat2050).

Un Collège d'agriculteurs a également apporté son soutien au projet, pris le temps de suivre ce travail pour apporter ses observations et questionnements du point de vue de professionnels de terrain. Merci également à eux pour leur implication :

Bernard Ader, Clément Alavoine, Frédéric André, Simon Belin, Nicolas Betbeder, Grégoire Bleu, Jean-Pierre Cavalerie, Christophe Diss, Emmanuel Duron, Philippe Collin, Marc Degossely, Thierry Evanno, Frédéric Frings, Rémy Frissant, Yves Gauthier, Jérôme Grivot, Jean Harent, Yanis Ihrir, Antoine Jourdain, Mathieu Labarthe, Mickael Lepage, Yvan Minor, Félix Noblia, Bertrand Pâtenotre, Jean-Luc Roux, Julien Saillet.

Merci aux shifters qui ont mené la Grande consultation des agriculteurs : Kate Blin, Claire Gouze, Alice Holvoet, Hélène Lepetit, Anne-Sophie Tricaud

Nous remercions également toutes les personnes (plus de 100 participants) ayant participé aux ateliers collaboratifs du 6 juin 2024 à l'occasion de la publication du rapport intermédiaire du projet.

Un grand merci aux nombreux autres Shifters ayant contribué au rapport : Aline Baguet, Nicolas Ceccaldi, Marie Cherasse, Bernard Commere, Sébastien Comyn, Nicolas Coudry Mesny, Bertrand Daveau, Anthony Fardet, Patrick Flouriot, Caroline Frery, Clément Garçon, Etienne Gatt, Anne Godart, Ambroise Idoine, Gwenaël Kergresse, Paul-Henri Lava, Anna Maitre, Patrick Mendes, Elisabeth Mouchot, Marine Nevannen, Grégoire Philipon, Philippe Pouchin, Arnaud Poupart-Lafarge, Louis Ravillon, Louise Ribéreau, Charles Saint-Marc, Paul Sanséau, Catherine Stein, Anne Stépanoff, Dominique Verneau, Jean-Yves Voisin.

Merci aux membres de l'équipe du Shift qui ont également participé : Matthieu Auzanneau, Jean-Elie Barjonet, Clément Caudron, Marlène De Bank, Laurent Delcayrou, Pauline Denis, Adrien Fauste-Gay, Rémi Grimaud, André-Jean Guérin, Raphaël Guignard, Zeynep Kahraman-Clause, Michel Lepetit, Vinciane Martin, Clara Mourgues, Mona Poulain, Nicolas Raillard, Corentin Riet, Jason Saniez, Emma Stokking, Jacques Treiner, Baptiste Verneuil.

Merci enfin aux graphistes de l'équipe de CPiG (<https://cpig.be/>).

Nos excuses pour tout oubli potentiel.

Nota bene : les interprétations, positions et recommandations figurant dans ce rapport ne peuvent être attribuées ni aux contributeurs, ni aux relecteurs, ni aux membres du Conseil scientifique et du Collège d'agriculteurs cités ci-dessus. Le contenu de ce rapport n'engage que The Shift Project.

L'équipe Agriculture du Shift Project remercie les partenaires du projet :



Table des matières

AVANT-PROPOS	1
À propos du think tank The Shift Project	3
Comité de rédaction	4
Remerciements	5
Table des matières	7
Table des figures	11
Table des tableaux	13
Liste des abréviations	14
INTRODUCTION	15
I. LA FRANCE AGRICOLE EN 2024	20
1. Les multiples facettes de l'agriculture hexagonale	20
A. De vastes surfaces agricoles, mais en diminution constante	20
B. Des exploitations agricoles toujours moins nombreuses et plus grandes, et un déficit de transmission	21
C. Les principales productions végétales : une céréalisation progressive des espaces cultivés	24
D. Les productions animales : des cheptels diversifiés aux trajectoires divergentes	31
E. Exportations et importations : la place de la France dans les échanges agricoles et alimentaires internationaux	39
2. Un contexte socio-économique déterminant	42
A. Le cadre structurant de la Politique Agricole Commune	42
B. Une rentabilité économique aléatoire et très hétérogène, malgré les soutiens publics	45
C. Une érosion des prix et de la valeur ajoutée dans le secteur agricole ayant conduit à la simplification des agroécosystèmes.....	48
D. Vers un cadre plus satisfaisant au regard des enjeux socio-économiques et environnementaux ?	50
3. Les usages de la biomasse agricole : connexions entre filières, débouchés croissants et arbitrages incontournables	53
A. Des flux de biomasse agricole massifs et complexes	53
B. Des débouchés énergétiques appelés à se développer : biocombustibles, biocarburants et biogaz.....	55
C. Des arbitrages sur les usages énergétiques à anticiper	58
4. L'importance d'une approche systémique des enjeux avec les autres secteurs économiques eux-mêmes en transition	61
II. UN SYSTEME AGRICOLE CONTRAINT PAR DES LIMITES ENERGETIQUES, CLIMATIQUES ET ECOSYSTEMIQUES	65
1. Des dépendances et des fragilités qui s'accroissent	65
A. Un système agricole devenu totalement dépendant des énergies fossiles	65
B. Une dépendance à d'autres ressources critiques non renouvelables : exemple du phosphore.....	70
C. Une dépendance aux importations de soja pour l'alimentation animale.....	72
D. Une diversité domestique à la base génétique restreinte	74
E. Une dépendance à l'usage de produits phytosanitaires.....	75
2. Changement climatique et nouveaux contextes pédoclimatiques : des besoins d'adaptation et de résilience	84

A.	Fragilisation biologique, physique et chimique des sols.....	84
B.	Augmentation des aléas climatiques et de leurs impacts sur les sols et les systèmes agricoles.....	85
C.	Une vulnérabilité des systèmes face aux variations de la disponibilité en eau et aux stress thermiques.....	86
D.	Des impacts du changement climatique contrastés selon les productions et les zones géographiques.....	89
3.	Les impacts et contributions climatiques de l'agriculture	97
A.	Les émissions directes de GES du secteur agricole français.....	97
B.	Fabrication des engrais, transports, importations : des émissions indirectes du secteur agricole hexagonal essentielles à prendre en compte.....	104
C.	Le stockage de carbone dans les sols, un puits vulnérable	106
D.	Contribution de l'agriculture à la décarbonation des autres secteurs	109
4.	Des impacts sur les différents compartiments des écosystèmes	112
A.	Impacts sur la biodiversité.....	113
B.	Impacts sur la qualité de l'eau : contamination des eaux souterraines et superficielles par des polluants d'origine agricole.....	115
C.	Impacts quantitatifs sur les « ressources » en eau.....	116
D.	Impacts sur la qualité de l'air : ammoniac et particules en suspension, résidus de phytosanitaires	117
E.	Impacts sur la santé des sols	118
III.	LEVIERS DE TRANSFORMATION DU SYSTEME AGRICOLE.....	122
1.	Fertilisation sobre et durable	124
A.	Optimisation de la fertilisation azotée.....	124
B.	Décarbonation de la fabrication des engrais azotés minéraux.....	127
C.	Optimisation de la fertilisation phosphatée	127
2.	Élevages durables : réduire les émissions de GES et accroître la résilience des systèmes	129
A.	Répartition des émissions de GES des systèmes d'élevages français : des priorités distinctes	129
B.	Une approche multicritères et de compromis	129
C.	Des leviers de transition avec des priorités spécifiques à chaque système d'élevage.....	135
D.	Stratégies de transition proposées par les acteurs des filières : des potentiels significatifs mais focalisés sur l'atténuation	141
E.	Synthèse des stratégies des acteurs de filières : aller plus loin pour atténuer les émissions et améliorer la résilience des élevages à horizon 2050	143
3.	Réduction de la demande énergétique et décarbonation de l'énergie utilisée	146
4.	Leviers en faveur d'une meilleure résilience des systèmes agricoles	153
A.	Adaptation des plantes cultivées et des techniques de culture.....	153
B.	Leviers favorables à la biodiversité.....	155
C.	Leviers d'adaptation par la gestion de l'eau : gérer l'eau dans les sols et les paysages, irrigation de résilience, cultures sobres.....	156
D.	Leviers de résilience socio-économique.....	158
5.	Pratiques stockantes : augmenter le stock agricole de carbone et favoriser la résilience des systèmes.....	162
A.	Des leviers pour préserver et augmenter les stocks de carbone dans les sols et la biomasse ligneuse.....	162
B.	Un potentiel de stockage de carbone significatif sous réserve de préserver les stocks existants et de développer massivement des pratiques stockantes additionnelles.....	164
C.	Un impact modéré du changement climatique sur le stockage de carbone au niveau global, mais des disparités régionales et un enjeu sur la ressource en eau	171
6.	Circularité des systèmes agricoles : assurer le rebouclage des cycles biogéochimiques.....	174

A.	Relocalisation de la production de l'alimentation animale et des flux de nutriments ..	174
B.	Reconnexion des productions végétales et animales : moindre spécialisation des régions agricoles et renouveau de la polyculture-élevage	174
C.	Rebouclage du cycle des minéraux et matières organiques par la gestion des excréta humains et des biodéchets urbains.....	175
7.	Adaptation des flux logistiques pour plus de résilience	176
IV.	TRANSFORMER LE SYSTEME AGRICOLE D'ICI 2050 : PLUSIEURS SCENARIOS POSSIBLES, CHOISIR ET PLANIFIER.....	179
1.	Tests de scénarios aux priorités contrastées et sous contrainte de réduction des émissions de GES.....	181
A.	Notre choix : un scénario par priorité.....	181
B.	Présentation des outils utilisés : de ClimAgri à MoSUT	181
C.	Description des hypothèses retenues pour les trois scénarios-tests.....	181
D.	Pour plus de réalisme et de résilience : un scénario de conciliation	185
2.	Pour chaque scénario, des hypothèses travaillées de façon itérative	186
3.	Synthèse des principaux résultats des différents scénarios	188
A.	Résultats en termes de potentiel nourricier	188
B.	Résultats sur les émissions de GES directes et indirectes	189
C.	Résultats sur la consommation et la production d'énergie du secteur agricole	191
4.	Résultats détaillés du scénario de conciliation par objectif	193
A.	Produire afin de répondre aux besoins alimentaires nationaux, en maximisant l'autonomie des filières agricoles françaises	193
B.	Atténuer les émissions de GES du secteur	195
C.	Assurer la résilience du secteur agricole	202
D.	Contribuer à la résilience globale de la société	205
5.	Synthèse du scénario de conciliation.....	208
A.	Contribution des différents leviers à l'objectif de décarbonation	208
B.	Vision dynamique de l'activation des leviers à horizon 2050	209
C.	Quel impact d'aléas aigus sur cette projection ?.....	209
D.	Points d'arbitrage et conditions de mise en oeuvre	210
6.	Limites méthodologiques	212
A.	Limites liées au périmètre du projet et de la prospective	212
B.	Limites sur les hypothèses et la modélisation.....	213
V.	RECOMMANDATIONS	216
1.	Recommandations à destination des pouvoirs publics	216
A.	Un besoin de clarification stratégique et politique.....	216
B.	Un besoin de sécurisation économique et de rentabilité.....	219
C.	Un besoin de compétences et de connaissances.....	223
2.	Recommandations à destination des acteurs territoriaux	225
A.	Planifier la transformation agricole à l'échelle du territoire	225
B.	Favoriser les systèmes agricoles résilients et la reconnexion des productions végétales et animales sur le territoire.....	226
C.	Organiser les arbitrages à mener sur les usages de la biomasse et des ressources en eau	226
D.	Accompagner les coopératives locales ou les agriculteurs dans la structuration de filières nouvelles ou l'adaptation de filières existantes	227
3.	Recommandations à destination des agriculteurs	228
A.	Participer à la diffusion des connaissances sur les enjeux écosystémiques, climatiques et énergétiques.....	228
B.	Engager sa ferme dans des pratiques agroécologiques	228

ANNEXES.....	229
Annexe 1 : Indicateurs de bilan français des principales filières agricoles et agroalimentaires en volumes.....	229
Annexe 2 : Comparaison du potentiel attaché aux cultures jugées résilientes (Sources : INRAE, Idele, Terres Inovia).....	230
Annexe 3 : Potentiel des principales légumineuses à graines	232
Annexe 4 : Jeux d’hypothèses pour des scénarios de réintroduction des légumineuses à horizon 2050	233
Annexe 5 : Potentiel des légumineuses fourragères.....	234
Annexe 6 : Deux indicateurs permettant d’apprécier le degré de résilience des systèmes irrigués (source Arvalis).....	235
Annexe 7 : Emissions de GES des systèmes d’élevage français	236
Annexe 8 : L’efficacité nette énergétique et protéique, une approche permettant de mesurer et nuancer la compétition entre alimentation animale et alimentation humaine	238
Annexe 9 : Objectifs de décarbonation du secteur de l’élevage dans la SNBC2 et bilan en 2024.....	240
Annexe 10 : Montants et profils d’émissions de GES pour les élevages de volailles (source ITAVI)	241
Annexe 11: Feuilles de route de décarbonation des filières bovins.....	243
Annexe 12 : Valeurs de référence pour le calcul du potentiel nourricier	244
Annexe 13 : Scénarios de répartition des systèmes d’élevage bovins dans la modélisation.....	245
Annexe 14 : Illustrations spécifiques au scénario de conciliation	246
REFERENCES.....	248

Table des figures

Figure 1 : Périmètre du projet : tous les enjeux agricoles ne sont pas traités avec le même degré de finesse et d'approfondissement.....	17
Figure 2 : Part de la surface agricole utilisée (SAU) dans la superficie totale de la France métropolitaine en 2020	21
Figure 3 : Nombre d'exploitations selon la dimension économique.....	22
Figure 4 : Spécialisation de la production agricole en 2020 (17 postes)	23
Figure 5 : Surfaces des productions végétales.....	25
Figure 6 : Cultures fourragères et part des prairies dans la SAU du département.....	26
Figure 7 : Surface de grandes cultures en France métropolitaine.....	27
Figure 8 : Surface des oléagineux et protéagineux	28
Figure 9 : Répartition des surfaces irriguées	31
Figure 10 : Élevages et effectifs bovins, et structure des élevages bovins	33
Figure 11 : Localisation des vaches.....	33
Figure 12 : Effectifs des ovins et répartition sur le territoire français	34
Figure 13 : Effectifs de porcins.....	36
Figure 14 : Effectif des poulets de chair et des poules pondeuses, localisation des poulets de chair et part des effectifs régionaux	37
Figure 15 : Part de la SAU bio (y compris en conversion).....	38
Figure 16 : Évolution de la répartition du budget européen de la PAC de 1985 à 2020. On y observe le passage de la politique de structuration du marché à l'export vers des paiements directs et des aides au développement rural.	43
Figure 17 : Résultat brut au total ou par actif non-salarié et EBE par UTANS en termes réels – base 100 1990	46
Figure 18 : Évolution de l'excédent brut d'exploitation (EBE) par ETP non salarié (UTANS), en millier d'euros – 1988-2020	46
Figure 19 : Solde disponible par exploitant en 2022 par OTEX.....	47
Figure 20 : Évolution des prix en monnaie constante en base 100 depuis 1970	48
Figure 21 : Évolution en monnaie constante de la valeur ajoutée et du revenu de la branche agricole.	49
Figure 22 : L'euro alimentaire en 2019 décomposé en valeurs ajoutées induites par branche de l'économie nationale, importations d'intrants, importations alimentaires et taxes	50
Figure 23 : Biomasse agricole : Cartographie des flux actuels de biomasse (en MtMS)	53
Figure 24 : a) Énergie investie par source et production nette (petajoules – PJ) et b) Retour énergétique sur énergie investie et autosuffisance énergétique.....	66
Figure 25 : Bilan régional du phosphore	71
Figure 26 : Évolution du NoDU agricole pour les substances actives Cancérigènes, Mutagènes et Reprotoxiques	76
Figure 27 : Évolution des quantités totales de substances actives vendues par type d'usages	77
Figure 28 : Aléa annuel d'érosion des sols	85
Figure 29 : Estimation des stocks de carbone organique de 0 à 30 cm de profondeur en France métropolitaine hors Corse.....	85
Figure 30 : Évolution du pourcentage de rendement potentiel (crop suitability index) du maïs non irrigué (RCP6.0, hors effet de l'augmentation de la teneur en CO ₂ dans l'atmosphère et hors conditions pédologiques et stress biotiques)	90
Figure 31 : Évolution du pourcentage de rendement potentiel (crop suitability index) du blé non irrigué (RCP6.0, avec effet de l'augmentation de la teneur en CO ₂ dans l'atmosphère et hors conditions pédologiques et stress biotiques).....	91
Figure 32 : Évolution du potentiel de croissance de la tomate irriguée (plein champ, hors serres) dans un scénario RCP8.5 en plein été (semaine 33) hors conditions pédologiques et stress biotiques	92
Figure 33 : Évolution du potentiel de croissance de la tomate irriguée (plein champ, hors serres) dans un scénario RCP8.5 en intersaison (semaine 24) hors conditions pédologiques et stress biotiques	92
Figure 34 : Évolution de l'indice de Winkler pour la vigne dans un scénario RCP8.5, hors conditions pédologiques et stress biotiques.....	93
Figure 35 : Évolution du pourcentage de rendement potentiel (crop suitability index) du citron (RCP6.0, avec effet de l'augmentation de la teneur en CO ₂ dans l'atmosphère et hors conditions pédologiques et stress biotiques).....	94
Figure 36 : Impact du changement climatique sur les performances du soja en Europe dans un futur proche (2020- 2050) (a) et dans un futur lointain (2050-2100) (b) par rapport au passé récent (1960-2010)	95

Figure 37 : Évolution du pourcentage de rendement potentiel (crop suitability index) du pois chiche (RCP6.0, avec effet de l'augmentation de la teneur en CO ₂ dans l'atmosphère et hors conditions pédologiques et stress biotiques)	96
Figure 38 : Répartition des émissions de GES du secteur agricole	97
Figure 39 : comparaison des courbes d'impact passée et projetées des émissions de méthane, en référence à la modélisation GSAT en mobilisant différentes métriques, dont le PRG*, le PRG100 et le PRG20. La courbe de référence est celle en traits pleins noirs. GWP correspond à PRG.	100
Figure 40 : Évolution des émissions de GES du secteur de l'agriculture en France entre 1990 et 2021	101
Figure 41 : Objectifs de réduction des émissions de la SNBC2 par secteur et facteur de réduction associé.	103
Figure 42 : Évolution historique des émissions de GES du secteur agricole en France (1852-2014)	103
Figure 43 : Limites planétaires (tirées des travaux du Stockholm Resilience Center)	113
Figure 44 : Réserves en eau utile de la France métropolitaine / La profondeur des sols en France métropolitaine	156
Figure 45 : Stockage additionnel de carbone associé à 9 pratiques stockantes	165
Figure 46 : Services écosystémiques de l'agroforesterie	167
Figure 47 : Comparaison des potentiels de stockage additionnel de carbone sous climat futur modifié et sous climat actuel	173
Figure 48 : Émissions directes (ktCO _{2e}) par rapport à la situation actuelle, dans les différents scénarios étudiés	190
Figure 49 : Émissions indirectes (ktCO _{2e}) par rapport à la situation actuelle, dans les différents scénarios étudiés	190
Figure 50 : Consommations d'énergie directe (ED) et indirecte (EI) (GWh) par rapport à la situation actuelle, dans les différents scénarios étudiés	191
Figure 51 : Production de bioénergies (GWh) par rapport à la situation actuelle, dans les différents scénarios étudiés (biomasse hors forêt = biomasse solide issue de l'agroforesterie et des résidus de culture à usage combustion).....	192
Figure 52 : Bilan des aliments concentrés (Mt MS) entre la situation initiale (2020) et le scénario de conciliation (2050) : les valeurs sous l'axe des abscisses correspondent aux ressources en concentrés, et les valeurs au-dessus à leurs emplois.....	194
Figure 53 : Bilan fourrager global (MtMS) entre la situation initiale (2020) et le scénario de conciliation (2050)	195
Figure 54 : Émissions directes, indirectes et potentiel de stockage ou déstockage (ktCO _{2e}) entre situation actuelle et scénario de conciliation	200
Figure 55 : Contribution des différents leviers de décarbonation dans le scénario conciliation à horizon 2050 (ktCO _{2e}).....	208
Figure 56 : Vision dynamique des leviers mobilisés dans le scénario de conciliation	209

Table des tableaux

Tableau 1 : Recensement agricole 2020, France métropolitaine	24
Tableau 2 : Principaux biocarburants consommés en France - Données 2023	56
Tableau 3 : Ordre de grandeur des émissions indirectes de l'agriculture française en 2021 (MtCO _{2e}).....	104
Tableau 4 : Liste des leviers de transformation du système agricole et échelle(s) de mise en œuvre	123
Tableau 5 : Ordre de grandeur des émissions des élevages français en 2020 (MtCO _{2e})	129
Tableau 6 : Estimation des potentiels d'atténuation des différentes filières d'élevage françaises à horizon 2030 en MtCO _{2e}	144
Tableau 7 : D'après échanges avec la FNCUMA : caractérisation des cas d'usages du machinisme dans le secteur agricole, en vue d'en estimer les changements de vecteurs énergétiques : faire la somme des scores dans chaque ligne I+D+P pour obtenir un score total	149
Tableau 8 : Bilan de GES de l'agroforesterie intra-parcellaire.....	168
Tableau 9 : Bilan de GES de l'implantation de haies (grandes cultures pures et rotations associant grandes cultures et prairies temporaires).....	169
Tableau 10 : Comparaison des valeurs de stockage additionnel de carbone de différents scénarios sous climat futur modifié et sous climat actuel - les lignes COMBI et LB_combi font apparaître respectivement le stockage additionnel lié à l'évolution des pratiques et le stockage lié aux pratiques actuelles	172
Tableau 11 : Tableau 10 : Hypothèses principales des différents scénarios étudiés	187
Tableau 12 : Potentiel nourricier dans les différents scénarios étudiés.....	188
Tableau 13 : Émissions directes et indirectes (ktCO _{2e}) par rapport à la situation actuelle, dans les différents scénarios étudiés	189
Tableau 14 : Demande énergétique et production de bioénergie (GWh) par rapport à la situation actuelle, dans les différents scénarios étudiés.....	191
Tableau 15 : Comparaison des hypothèses et résultats des différentes variantes étudiées pour l'élevage dans le scénario conciliation	197
Tableau 16 : Émissions directes et indirectes de GES du secteur agricole dans la situation actuelle et dans le scénario de conciliation.....	198
Tableau 17 : Contribution des différentes pratiques stockantes étudiées dans le scénario de conciliation au potentiel de stockage de carbone dans les sols et la biomasse (ordres de grandeur basés sur les pratiques stockantes, hors déstockage)	201
Tableau 18 : Émissions de GES liées à certaines catégories de produits agricoles importés	202
Tableau 19 : Décomposition du bilan azoté (situation actuelle et scénario de conciliation)	202
Tableau 20 : Consommations énergétiques du secteur agricole (situation actuelle et scénario de conciliation)	204
Tableau 21 : Production énergétique par le secteur agricole (situation actuelle et scénario de conciliation) .	204
Tableau 22 : Surfaces allouées à l'alimentation animale (kha) (situation actuelle et scénario de conciliation)	205
Tableau 23 : Usages non alimentaires de la biomasse (méthanisation et autres usages non alimentaires) (situation actuelle et scénario de conciliation)	206
Tableau 24 : Surfaces et volumes d'eau pour l'irrigation (situation actuelle et scénario de conciliation)	207
Tableau 25 : Simulation d'aléas climatiques sur le potentiel nourricier des productions végétales (situation actuelle et scénario de conciliation)	210

Liste des abréviations

AB	Agriculture biologique
AQR	Apports quotidiens réels
BMQ	Besoins moyens quotidiens
CGAAER	Conseil général de l'alimentation, de l'agriculture et des espaces ruraux
CIVE	Cultures intermédiaires à valorisation énergétique
CMR	Cancérigène, mutagène et reprotoxique
CUMA	Coopérative d'utilisation des matériels agricoles
EBE	Excédent brut d'exploitation
ETP	Équivalent temps plein
FAO	Food and agriculture organisation (organisation des Nations unies)
GES	Gaz à effet de serre
HRI	Harmonized risk indicator
IFT	Indice de fréquence des traitements
MAFOR	Matières fertilisantes d'origine résiduaire
Mha	Million d'hectares
MO	Matière organique
NIMA	Non issu du monde agricole
NoDU	Nombre de doses unités
NBT	New breeding techniques
NGT	New genomic techniques
NTG	Nouvelles technologies génomiques
OTEX	Orientation technico-économique de l'exploitation
PAC	Politique Agricole Commune
PBS	Production brute standard
PPAM	Plantes à parfum, aromatiques et médicinales
PTEF	Plan de transformation de l'économie française
QSA	Quantité de substance active
RA	Recensement agricole
RPD	Redevance pollution diffuse
SAU	Surface agricole utilisée
SGPE	Secrétariat général à la planification écologique
SNBC	Stratégie nationale bas carbone
STH	Surface toujours en herbe
TEP	Tonne équivalent pétrole
TFUE	Traité sur le Fonctionnement de l'Union européenne
TWh	Térawatt-heure
UAB	Utilisable en agriculture biologique
UTANS	Unité de travail annuel non salarié
UTCATF	Utilisation des terres, changement d'affectation des terres et de la forêt

Introduction

En quelques décennies, les énergies fossiles ont révolutionné les techniques agricoles et l'organisation du système productif agricole et alimentaire, le rendant progressivement, à l'instar des autres secteurs économiques, dépendant d'un approvisionnement sécurisé en pétrole et en gaz. En parallèle, le fonctionnement du secteur contribue significativement à l'effet de serre responsable d'un dérèglement climatique qui, en retour, affecte de plus en plus ses rendements. Ainsi, la perspective de la raréfaction des ressources fossiles et les conséquences directes des effets du dérèglement climatique sur les activités agricoles, par essence vulnérables, et le caractère essentiel du secteur pour répondre aux besoins de base des populations nécessitent de penser dès aujourd'hui une évolution profonde du secteur. Ce rapport vise à permettre d'apprécier les termes des alternatives possibles, au prisme des questions énergétiques, climatiques et écosystémiques.

Dans les zones tempérées, à la faveur de l'optimum climatique qui a suivi la dernière glaciation, le développement progressif de l'agriculture depuis le Néolithique a conduit les populations à aménager leurs écosystèmes au profit de la culture de plantes sélectionnées, en association avec l'élevage d'animaux domestiqués, dans l'objectif de produire les aliments et autres ressources utiles à leurs besoins. Imaginées selon les contextes pédoclimatiques⁵ locaux et patiemment perfectionnées, ces solutions techniques sont devenues la base de la sécurité alimentaire des populations, l'ayant emporté en matière de volumes de production sur les techniques de chasse et de cueillette préexistantes.

En termes énergétiques, ces systèmes agricoles et alimentaires ont longtemps fonctionné à l'énergie solaire, captée par les végétaux chlorophylliens via le processus biologique de la photosynthèse, et transmise par l'alimentation aux hommes et aux animaux dont la force de travail constituait la base de leur fonctionnement. La production de biomasse agricole était limitée, dans un contexte pédoclimatique donné, par les éléments fertilisants naturellement présents dans le milieu ou fixés par les plantes⁶, ou apportés via des ressources organiques telles que les déchets urbains et les fumiers, permettant dans le même temps un retour au sol maximisé de matière organique. Les systèmes de polyculture-élevage ont ainsi longtemps constitué la norme, assurant, via une organisation que l'on qualifierait aujourd'hui d'économie circulaire, un compromis entre production de biomasse, fourniture d'énergie mécanique par les animaux d'élevage et maintien de la fertilité des sols.

La deuxième moitié du XX^{ème} siècle, dans le contexte nouveau de l'abondance énergétique offerte par l'exploitation des énergies fossiles, a vu se transformer radicalement ces systèmes agraires français. L'arrivée des tracteurs à la suite du Plan Marshall et leur déploiement rapide dans les campagnes, la mécanisation des travaux et le recours de plus en plus important aux engrais azotés minéraux fabriqués à partir de gaz fossile, efficaces et simples d'utilisation, ont métamorphosé l'organisation agricole du territoire et progressivement rendu l'agriculture dépendante des ressources fossiles. L'usage d'engrais azoté minéral a notamment abouti à la dissociation possible des cultures et de l'élevage et à une forte spécialisation des territoires, le tout sous l'influence des politiques de modernisation agricole successives. Les moyens de transport accrus et les possibilités de réfrigérer les productions ont aussi facilité les flux de denrées agricoles, rallongeant peu à peu les filières et dessinant une nouvelle logistique alimentaire à l'échelle nationale, mais aussi internationale.

Cette nouvelle agriculture, tout en permettant la réduction de la pénibilité du travail dans le secteur, a fait exploser la productivité par unité de surface comme par travailleur, assurant la sécurité alimentaire nationale et un approvisionnement abondant et bon marché pour le consommateur, via des canaux de distribution eux-mêmes métamorphosés. D'autres corollaires positifs de cette « *périlleuse augmentation des rendements* »⁷ ont

⁵ « Contexte pédoclimatique » ou « pédoclimat » : ensemble des conditions de température et d'humidité régnant dans les horizons d'un sol, y compris les proportions d'oxygène et de CO₂ dans la phase gazeuse, <https://mots-agronomie.inra.fr/index.php/P%C3%A9doclimat>

⁶ Fixation symbiotique de l'azote atmosphérique, voir partie II.1.B, encadré Azote et Fertilisation des cultures

⁷ Griffon, Michel. « Vers une septième révolution agricole », *Revue Projet*, vol. 332, no. 1, 2013, pp. 11-19

été la possibilité de la poursuite de l'urbanisation, la hausse de l'espérance de vie et le transfert massif de main-d'œuvre vers d'autres secteurs économiques. Alors que plus de 5 millions de personnes, soit 30 % des actifs⁸, travaillent dans l'agriculture au début des années 1950, ils ne sont plus qu'environ 700 000 en 2020⁹, soit moins de 3 %. Dans le même temps, s'exerçant en milieux ouverts, renforcées par la sélection de variétés à haut rendement et le recours croissant à des traitements phytosanitaires, les activités agricoles sont devenues une source d'impacts environnementaux significatifs dans les différents compartiments des écosystèmes : eau, sol, air et biodiversité.

En matière climatique, le secteur contribue aujourd'hui à 18 %¹⁰ des émissions de gaz à effet de serre (GES) nationales, avec la spécificité que ces émissions sont très majoritairement d'origine non énergétique, car non issues directement de la consommation de carburants fossiles, mais contrôlées par des processus biologiques au caractère diffus et complexe. Mais il est dans le même temps l'un des rares secteurs économiques permettant un stockage additionnel de carbone, sous certaines conditions et avec les pratiques adéquates, dans les sols et les parcelles agricoles (biomasse ligneuse des arbres et arbustes). Il permet également la production d'une biomasse non alimentaire servant à la décarbonation d'autres secteurs économiques (biomatériaux, bioénergie, biochimie). Outre sa contribution à l'atténuation de l'impact climatique des activités humaines, le secteur agricole, par essence vulnérable aux conditions météorologiques et climatiques, est par ailleurs surtout contraint à une adaptation rapide de ses systèmes et modes de production, dans un contexte de ressources futures limitées, notamment en énergie et en eau.

Ces dépendances et ces vulnérabilités nécessitent de réfléchir à l'évolution du système, qui se jouera dans un cadre physique non négociable, celui des sols disponibles, de leur santé et donc de leur fertilité, du climat, des ressources énergétiques et non énergétiques disponibles, des ressources en eau, et de la biodiversité. C'est l'objet du présent travail : imaginer des projections possibles de transformation du système agricole hexagonal pour répondre aux contraintes physiques qui le conditionnent aujourd'hui et le conditionneront demain, sans omettre de considérer le déterminisme d'un cadre socio-économique toujours construit sur les bases d'une abondance énergétique et de ressources aujourd'hui remise en question.

Ainsi, ce rapport vise également à instruire les enjeux socio-économiques que ces problématiques soulèvent, en termes de sécurité et de souveraineté alimentaire, d'indépendance énergétique, de viabilité économique des fermes et d'attractivité des métiers agricoles. La transition écologique et climatique du secteur dépendra en effet d'options politiques et de priorités sociales qui doivent être débattues au niveau national et de l'écriture de missions claires assignées collectivement à l'agriculture française. La nécessité de trouver des solutions locales et adaptées aux spécificités pédoclimatiques et sociales des territoires dans un contexte de déterminants internationaux, tant en termes de politiques agricoles que de suivi des émissions de GES, confère à l'exercice une difficulté supplémentaire. Précisons que ce rapport n'aborde pas en détail, malgré son importance, le sujet de la santé humaine, source de préoccupation importante des agriculteurs, en particulier l'impact des phytosanitaires sur leur propre santé¹¹.

Périmètre du projet

Ce présent rapport « Pour une agriculture bas carbone, résiliente et prospère » du Shift Project, concentré sur l'amont du secteur, se poursuivra en 2025 par des travaux de recherche sur l'aval des filières, intégrant l'ensemble du système agroalimentaire et toutes les dimensions « de la fourche à la fourchette ». Une mise en cohérence globale de ces deux phases de projets successives est prévue à horizon 2026.

Notre analyse actuelle se concentre sur les activités de production agricole brute, incluant la prise en compte de la production des intrants (engrais, aliments pour animaux, machinisme, etc.), y compris importés, jusqu'à la

⁸ Devienne, Sophie. « Les mutations récentes du foncier et des agricultures en Europe », *Presses universitaires de Franche-Comté*, 2018, pp. 25-52

⁹ https://chambres-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/002_inst-site-chambres/actu/2022/Analyses-Perspectives_recensement-agricole_01072022.pdf

¹⁰ https://www.citepa.org/wp-content/uploads/publications/secten/2023/Citepa_Secten_ed2023_v1.pdf

¹¹ Source : Grande consultation des agriculteurs

sortie de ferme (collecte). Nous ne traitons pas ici les importations de produits à destination de la consommation humaine, qui seront traitées dans le projet dédié aux enjeux de l'agroalimentaire et de l'alimentation. S'agissant des productions, les activités de pêche et d'aquaculture, ainsi que celles rapportées à la sylviculture, ne sont pas considérées.

Le périmètre géographique retenu dans le cadre de ce rapport est le territoire hexagonal.

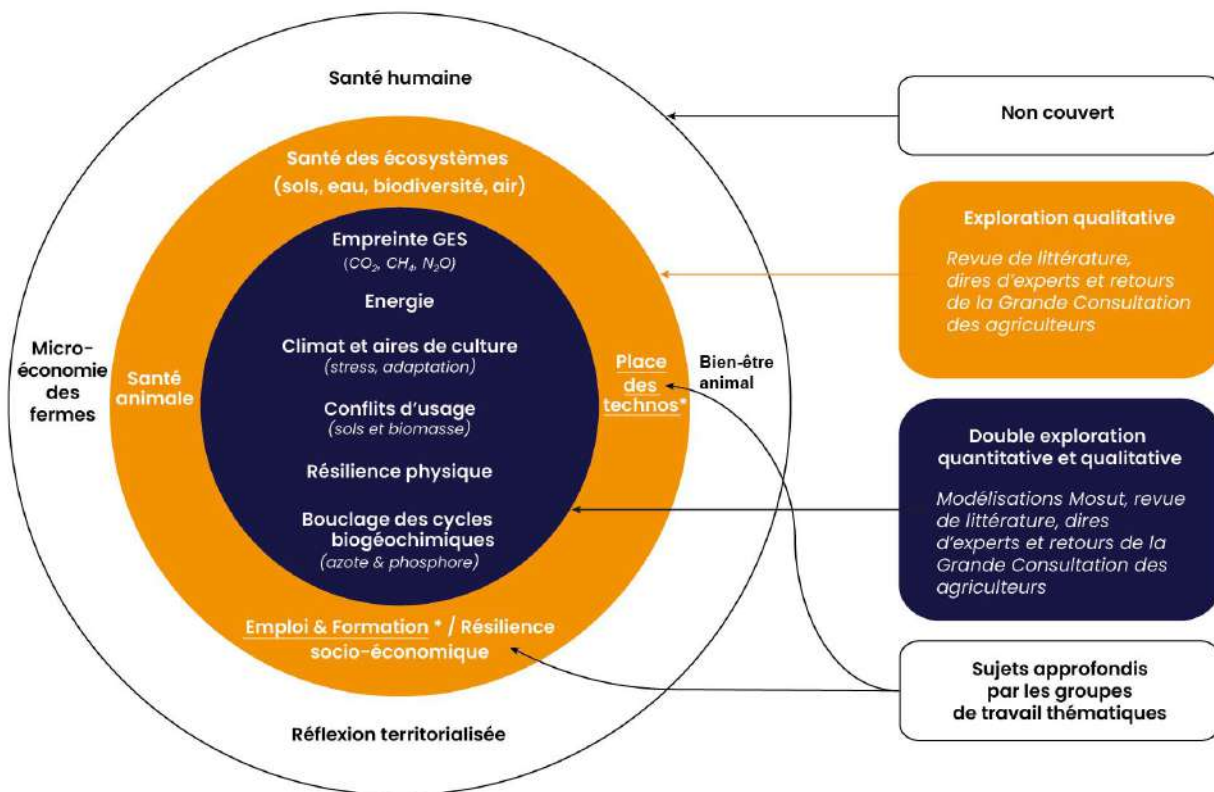


Figure 1 : Périmètre du projet : tous les enjeux agricoles ne sont pas traités avec le même degré de finesse et d'approfondissement

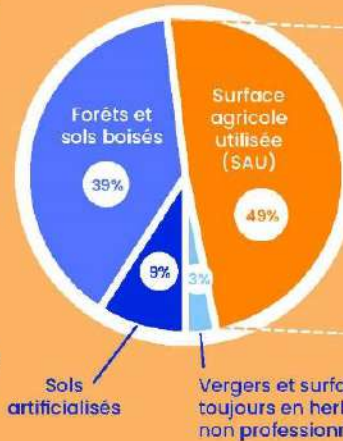


La France agricole en 2024

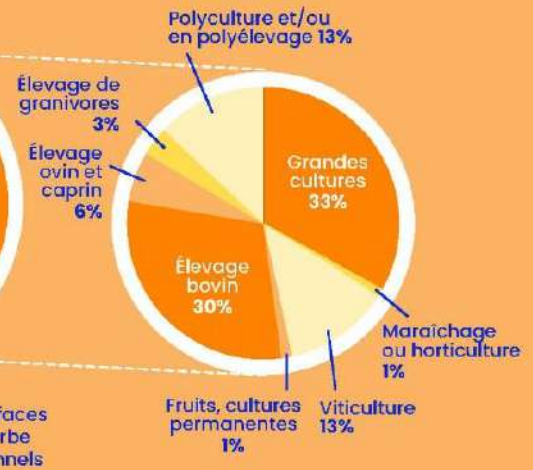
LA FERME FRANCE AUJOUR'HUI



ASSOLEMENT HEXAGONAL

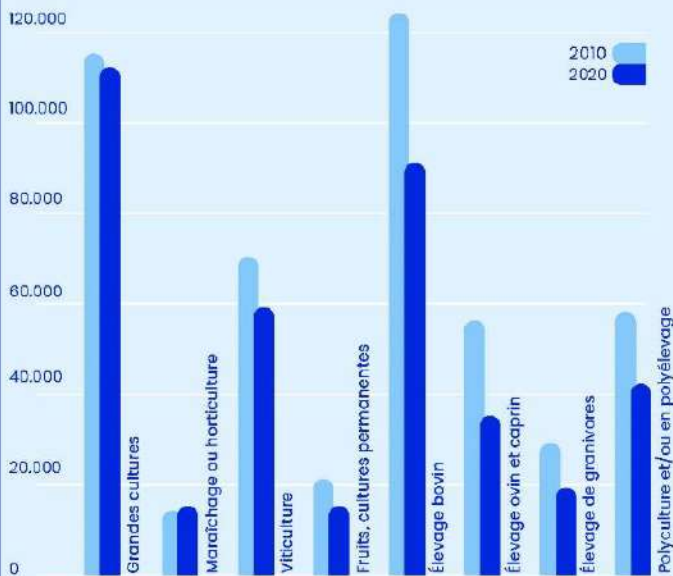


RÉPARTITION DES ACTIVITÉS EN POURCENTAGE DE LA SAU

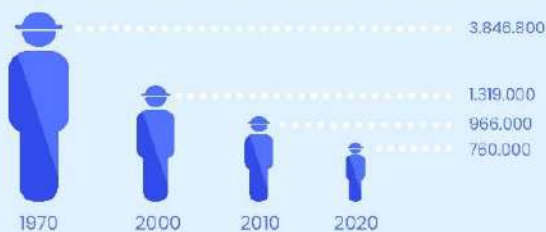


UNE IMPORTANTE BAISSSE DU NOMBRE D'EXPLOITATIONS ET D'ACTIFS

Évolution du nombre d'exploitations par activité



Évolution du nombre d'actifs agricoles



COMMERCE EXTÉRIEUR

Une forte capacité d'exportation



Une dépendance aux importations pour de nombreux produits



I. La France agricole en 2024

Cette partie s'adresse aux lecteurs ne connaissant pas ou mal le secteur agricole français. Elle présente les éléments de connaissances nécessaires pour avoir une vision complète du secteur et ainsi interpréter les éléments d'analyse qui suivent de manière éclairée. Si vous connaissez déjà bien le secteur, n'hésitez pas à passer directement à la Partie II.

Le système agricole hexagonal est complexe, très diversifié, inégalement réparti sur le territoire, combinant des filières animales et végétales et des modes de production en interdépendance, et inscrit dans des flux commerciaux internationaux. Il est à la base de la production d'une ressource convoitée, la biomasse¹² agricole, aux usages multiples, qu'ils soient d'ordre alimentaire, énergétique ou industriel. Mais si le contexte physique, en particulier pédologique, et climatique conditionne par essence les modalités de la production agricole, celle-ci est contrainte par des déterminants socio-économiques majeurs, notamment par la Politique Agricole Commune européenne, initiée dès les années 1960 pour organiser le secteur.

1. Les multiples facettes de l'agriculture hexagonale

A. De vastes surfaces agricoles, mais en diminution constante

En France métropolitaine, **la surface agricole utilisée (SAU) par les professionnels agricoles couvre 26,9 millions d'hectares (Mha)¹³, soit 49 % du territoire.** Cette surface se répartit entre :

- 64 % de terres arables, cultivées annuellement, sur 17 Mha, comprenant aussi les prairies temporaires et artificielles (luzerne par exemple), sur 2,4 Mha (environ 9 % de la SAU),
- 32 % de surfaces toujours en herbe (STH), les prairies permanentes, sur 8,7 Mha,
- 3,6 % de cultures permanentes telles que les vignes et vergers, sur 1 Mha.

Il faut noter qu'à ces surfaces mobilisées par l'agriculture s'ajoutent **1,7 Mha de jardins, vergers et STH non professionnels**. La SAU totale dans l'hexagone s'élève ainsi à 28,6 Mha.

La SAU est en contraction constante depuis près d'un siècle, les surfaces agricoles ayant régressé au profit essentiellement des surfaces boisées et des espaces naturels (landes, friches, etc.), mais aussi des zones urbanisées. La déprise agricole s'est accélérée avec la modernisation de l'agriculture et la concentration de la production sur les terres les plus facilement mécanisables ou les plus fertiles. **Depuis les années 1950, la surface agricole productive a décliné de 7 Mha¹⁴, soit une perte moyenne de l'ordre de 100 000 hectares par an.** Durant cette période, le ratio de surface agricole utilisée par habitant a été divisé par 2, passant d'environ 0,8 à 0,4 hectare par habitant. Les gains de productivité associés ont ainsi permis de nourrir, habiller et fournir en énergie (notamment) une population croissante.

¹² Ensemble des matières organiques végétales produites sur les sols agricoles via la photosynthèse, qui les élabore à partir de CO₂ et eau sous l'effet de l'énergie solaire.

¹³ https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/Chd2319/cd2023-19_SAA2022-D%C3%A9finitive.pdf

¹⁴ Desriers M., 2007, « L'agriculture française depuis cinquante ans : des petites exploitations familiales aux droits à paiement unique », INSEE Références. *L'agriculture française et l'Europe*, pp. 17-30

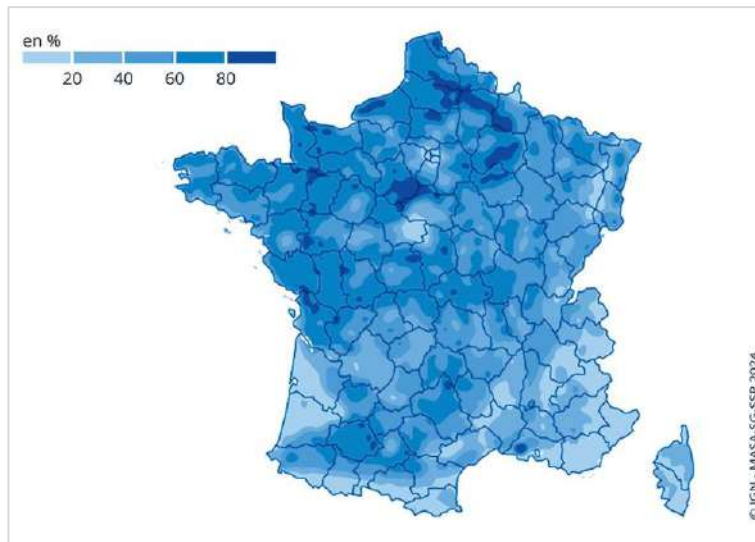


Figure 2 : Part de la surface agricole utilisée (SAU) dans la superficie totale de la France métropolitaine en 2020

Source : Insee / Recensement agricole 2020 (Agreste)

Si elle tend désormais à ralentir, l'artificialisation des sols liée à l'étalement urbain soustrait encore aux activités agricoles une part majoritaire des **20 000 à 30 000 hectares¹⁵ consommés annuellement aujourd'hui**. Source importante de libération du carbone stocké dans les sols, elle constitue par ailleurs la première cause d'érosion de la biodiversité. Cette artificialisation est encouragée par la faible rentabilité de l'activité agricole par rapport à d'autres activités économiques, par la faiblesse des retraites agricoles pouvant conduire les agriculteurs à vendre tout ou partie de leurs terres à la fin de leur carrière, et par la taxation particulièrement élevée en France du foncier agricole par rapport aux autres pays européens¹⁶. Avec la loi Climat et Résilience de 2021, la France s'est donné pour objectif d'atteindre « zéro artificialisation nette » des sols en 2050, visant en priorité à maîtriser l'étalement urbain et à le compenser, non sans susciter de vifs débats.

B. Des exploitations agricoles toujours moins nombreuses et plus grandes, et un déficit de transmission

En 2020, on dénombrait 390 000 exploitations agricoles¹⁷ en France hexagonale, soit près de 100 000 de moins qu'en 2010. Leur nombre a diminué en moyenne de 2,3 % par an depuis 2010, avec une baisse plus marquée (- 4 % par an) pour les micro-exploitations, générant une Production Brute Standard¹⁸ (PBS) de moins de 25 000 euros par an, mais en revanche une hausse (+ 0,3 % par an) pour les grandes exploitations, générant plus de 250 000 euros de PBS. Près de 80 % du potentiel de production agricole est assuré par l'ensemble des exploitations hors micro-exploitations.

¹⁵ <https://www.vie-publique.fr/eclairage/287326-zero-artificialisation-nette-zan-comment-protger-les-sols>

¹⁶ <https://www.fondationbiodiversite.fr/la-taxation-des-terres-agricoles-en-europe-approche-comparative/>

¹⁷ AGRESTE, 2024. Graph'Agri 2023

¹⁸ La Production Brute Standard est la production potentielle d'une exploitation exprimée en euros, calculée selon les prix et rendements d'une année donnée. Cet indicateur permet de classer les exploitations par dimension économique. Voir Graph'Agri 2023, Glossaire.

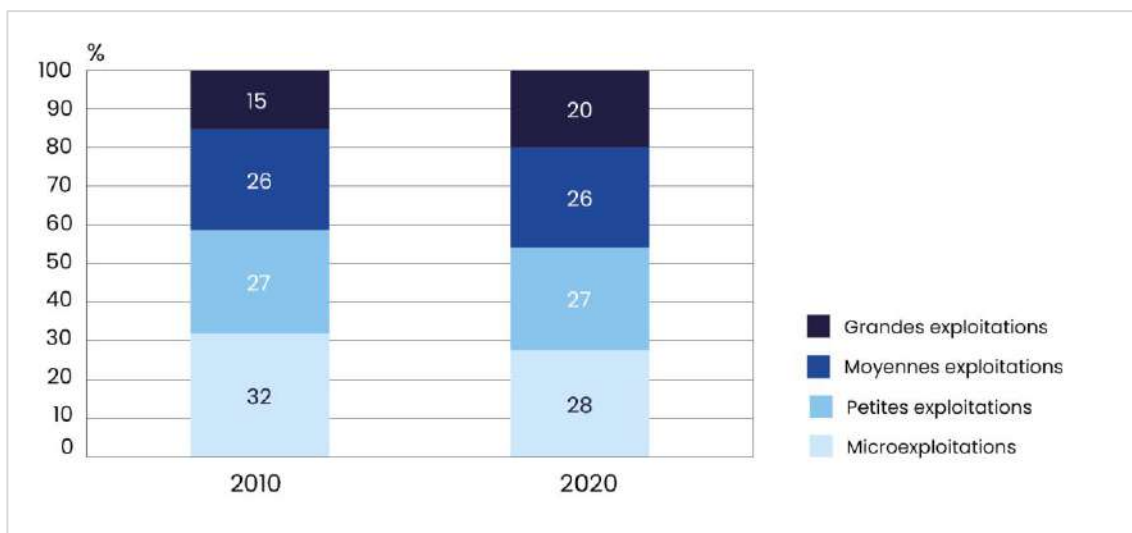


Figure 3 : Nombre d'exploitations selon la dimension économique

Source : Graph'Agri 2023

Si la plupart des exploitations disposent d'une SAU, 2 % d'entre elles n'en ont pas : cela concerne essentiellement des élevages de volailles, des élevages de porcs et des fermes apicoles. Celles disposant d'une SAU mettent en valeur en 2020 **en moyenne 69 hectares**, soit 13 hectares de plus qu'en 2010.

39 % de la SAU est cultivée par de grandes exploitations, au sens de la dimension économique, avec 139 hectares en moyenne. Les micro-exploitations valorisent 5 % de la SAU, avec 14 hectares en moyenne. La superficie moyenne varie beaucoup d'un département à l'autre, de 21 ha dans les Pyrénées-Orientales à 170 ha en Haute-Marne, la taille moyenne étant naturellement plus petite dans les régions viticoles, plus importante dans les régions d'élevage mettant en valeur de vastes prairies permanentes.

Une partie du phénomène de concentration des terres agricoles échappe cependant à la comptabilité nationale : structurées juridiquement en sociétés, plusieurs exploitations peuvent apparaître distinctes tout en étant contrôlées et gérées par une même personne physique. La surface moyenne des exploitations françaises est donc sous-estimée, le marché de cessions de fermes via des parts sociales échappant pour partie au contrôle et au suivi statistique de l'État.

La France métropolitaine se distingue par la grande diversité de ses productions agricoles, illustrée par l'analyse des territoires sous l'angle des OTEX (Orientation Technico-Économique des Exploitations), typologie introduite à l'occasion du recensement agricole de 1988. Dans le détail, est déterminé pour chaque commune le type de production agricole sur lequel repose au moins 2/3 de la production brute standard (PBS). Cette méthode permet d'éclairer la **dynamique de spécialisation à l'œuvre dans l'agriculture hexagonale**, qu'il s'agisse de l'abondance des cultures céréalières dans le Bassin parisien ou des activités d'élevage en terres bretonnes. En outre, cette spécialisation a abouti à la prépondérance des productions végétales, concernant près de 217 000 exploitations contre 150 000 exploitations tournées vers les productions animales en 2020. Cette photographie était totalement inversée il y a encore 20 ans.

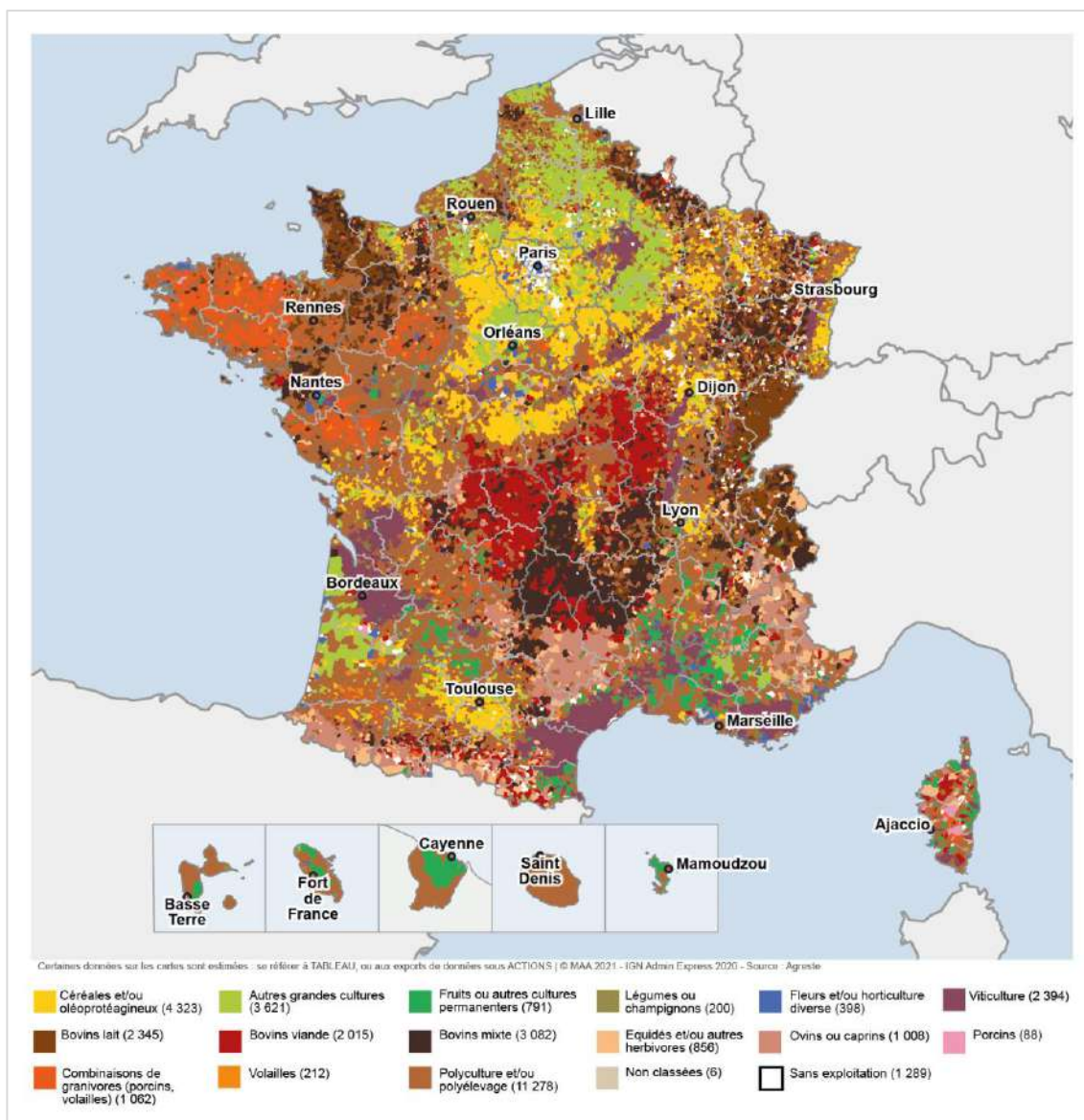


Figure 4 : Spécialisation de la production agricole en 2020 (17 postes)

Source : Agreste, recensement agricole 2020, Cartostat¹⁹

Le recensement agricole (RA) de 2020 renseigne plus précisément sur les dynamiques contrastées relatives aux différents systèmes de production agricole durant la décennie 2010. Trois secteurs sont parvenus à maintenir leur potentiel économique (évalué en termes de PBS), à savoir les grandes cultures, la viticulture et l'élevage de bovin-lait, tandis que d'autres secteurs accusent un net recul sur cette période, en production animale (élevage de granivores, élevage ovin et caprin, élevage bovin-viande), ainsi qu'en productions fruitières pour lesquelles la baisse s'exprime aussi bien en termes démographiques (baisse des effectifs d'exploitation) qu'économiques (PBS déclinante). Le secteur du maraîchage et de l'horticulture se distingue, étant le seul à être en phase de croissance (hausse du nombre d'exploitations, de la SAU valorisée, de l'emploi et de la PBS)²⁰.

¹⁹ https://stats.agriculture.gouv.fr/cartostat/#bbox=-14397.7051938,1511961.922316&c=indicateur&i=otex_2020_1.otefdd20&t=A02&view=map11

²⁰ Recensement Agricole 2020 - Chiffres clés - Chambres d'Agriculture - 2022

OTEX	Nombre d'exploitations	Evolution RA 2010 / 2020	Superficie agricole utilisée (SAU - hectares)	ETP (Équivalent Temps Plein)	Production brute standard (PBS - milliers d'euros)
Grandes cultures	112 000	- 3 %	9 730 000	119 000	12 100 000
Maraîchage ou horticulture	15 000	+ 7 %	180 000	66 000	4 400 000
Viticulture	59 000	- 16 %	1 100 000	124 000	12 400 000
Cultures fruitières ou autres cultures permanentes	15 000	- 29 %	350 000	38 000	2 900 000
Elevage bovin	91 000	- 27 %	8 770 000	152 000	14 200 000
Elevage ovin et/ou caprin	35 000	- 37 %	1 750 000	47 000	2 200 000
Élevage de granivores	19 000	- 34 %	1 020 000	40 000	8 800 000
Polyculture et/ou polyélevage	42 000	- 29 %	3 820 000	74 000	7 500 000

Tableau 1 : Recensement agricole 2020, France métropolitaine

Source : Agreste

La transmission des fermes devient un enjeu majeur pour le secteur. Avec le vieillissement de la population active agricole (en 2019, 55 % des agriculteurs avaient 50 ans ou plus, 13 % 60 ans ou plus²¹), on estime que la moitié des 390 000 fermes sera à reprendre durant la décennie à venir. Ainsi, **depuis 2015, environ 20 000 chefs d'exploitation cessent leur activité chaque année, pour 14 000 qui s'installent.** La poursuite plus ou moins prononcée de cette tendance au déficit de reprises, à l'agrandissement et à la spécialisation sera déterminante dans l'organisation du système agricole à échéance 2050.

Les difficultés de transmission des fermes, un frein à la transition (GCA)²²

Le contexte actuel peut faire hésiter certains agriculteurs à investir pour engager ou accélérer leur transition : « À quoi bon investir, si on n'est pas sûr de pouvoir transmettre sa ferme ? » ou encore, comme l'expliquait une agricultrice « J'ai même pas 40 ans, j'ai commencé tard, j'ai encore 25 ans à travailler... Comment je fais pour survivre dans les 25 prochaines années ? J'aurais tellement investi d'argent que j'aurai envie de transmettre à mon fils mais est-ce qu'il aura les conditions pour pouvoir continuer ? C'est un poids énorme à lui mettre sur les épaules... Doit-il être responsable de ça, un héritage qu'il n'aura pas choisi ? ».

C. Les principales productions végétales : une céréalisation progressive des espaces cultivés

Sauf exception mentionnée, les données présentées ci-dessous sont issues de Graph'Agri 2023.

La très grande variété des terroirs et des climats français permet la culture d'une grande diversité d'espèces, des grandes cultures céréalières ou industrielles aussi bien que des fruits et légumes variés, de la vigne, des espèces prairiales, etc. **En tendance générale, la modernisation et la spécialisation régionale des systèmes agricoles durant les dernières décennies ont conduit à diminuer la variabilité des espèces cultivées par région, en lien également avec l'industrialisation et la concentration des outils de**

²¹ https://www.insee.fr/fr/statistiques/4806717#figure3_radio2

²² Résultats de la Grande Consultation des Agriculteurs 2024, <https://theshiftproject.org/article/resultats-grande-consultation-des-agriculteurs/>

transformation des produits, et à augmenter la surface consacrée aux grandes cultures au détriment des cultures fourragères et des cultures permanentes de vignes et de vergers.

a. Répartition des principales productions végétales

Elles se répartissent entre :

- des **cultures fourragères**, sur 13,9 Mha, soit environ **50 % des surfaces**, dont 90 % de prairies permanentes (STH) ou non permanentes (prairies temporaires à base de graminées fourragères ou prairies de légumineuses telles que la luzerne ou le trèfle) et 10 % de cultures fourragères annuelles,
- des **grandes cultures**, sur 12,9 Mha, soit environ **45 % des surfaces**, dont près de 90 % en céréales, oléagineux et protéagineux, le reste en betteraves, pommes de terre, plantes à fibre et plantes aromatiques et médicinales,
- des **cultures permanentes (vignes et vergers)** sur 1 Mha, soit **3,5 % des surfaces**,
- d'autres surfaces cultivées (**légumes, fleurs, semences et plants**) sur 0,4 Mha, soit **1,5 % des surfaces**.

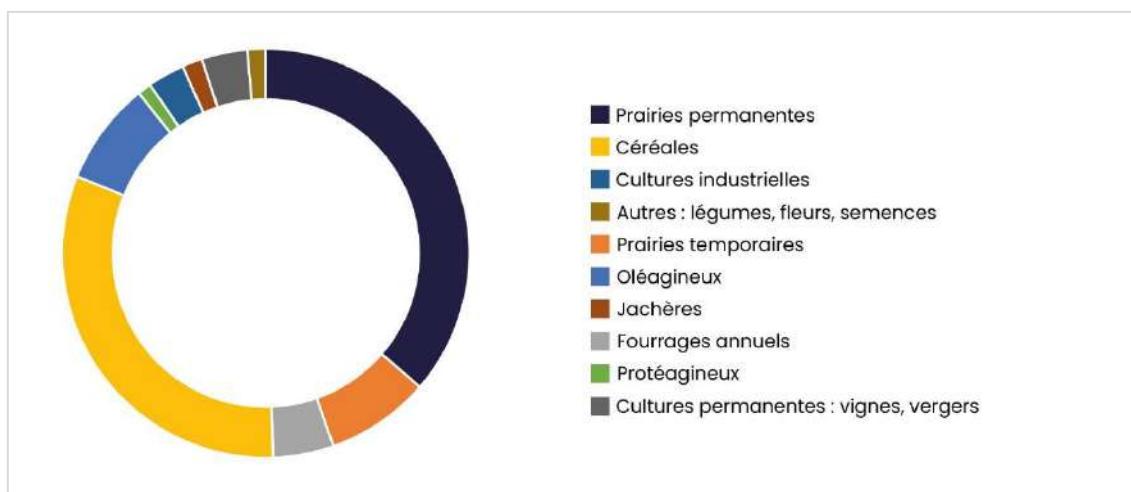


Figure 5 : Surfaces des productions végétales

Source : Graph'Agri 2023

b. Des cultures fourragères toujours en diminution

La surface totale des cultures fourragères, destinées à l'alimentation animale, a régressé de 5 Mha depuis les années 1950, dont environ 2 Mha de prairies permanentes, 2 Mha de prairies temporaires et 1 Mha de plantes sarclées fourragères (notamment betteraves fourragères), en lien avec la diminution des effectifs animaux, la déprise agricole et l'urbanisation. Elle continue de décroître (- 300 000 hectares entre 2020 et 2022).

Les surfaces de fourrages annuels avaient beaucoup progressé de 1950 à 1980 avec la révolution fourragère et le développement de la culture du maïs, mais sont depuis globalement stabilisées. Les légumineuses prairiales (luzerne, trèfle, sainfoin, etc.) ont vu leur surface divisée par 2 en 60 ans, avec deux séquences successives aux dynamiques opposées : d'abord un fort recul au cours de la décennie 1960, durant laquelle la priorité a été donnée aux prairies de graminées et à des combinaisons soja-maïs ensilé pour l'alimentation des cheptels, puis, à partir des années 1980, une progression notable des surfaces de luzerne et de trèfle, principalement sous la forme de cultures prairiales multi-spécifiques ou de prairies artificielles pures.

Les prairies représentent aujourd'hui la très grande majorité (90 %) des surfaces fourragères. L'essentiel des surfaces se trouvent en zone de montagne, les régions Auvergne Rhône-Alpes et Occitanie concentrant à elles deux un tiers des prairies. Celles-ci occupent plus de 90 % de la SAU dans certains départements comme la Corrèze et le Cantal, et jusqu'à 96 % en Corse.

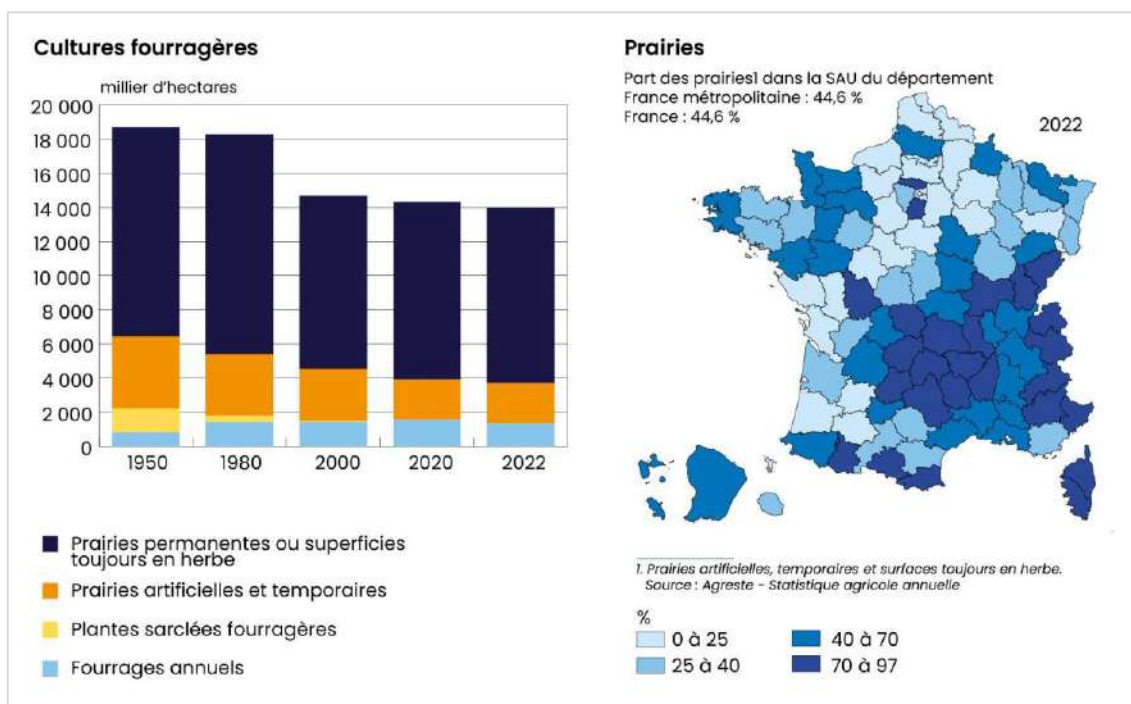


Figure 6 : Cultures fourragères et part des prairies dans la SAU du département
Source : Graph'Agri 2023 et Agreste – Statistique agricole annuelle

c. Des grandes cultures en progression

Parmi les grandes cultures, ce sont les céréales (blé, orge, maïs, etc.) qui occupent la plus grande surface avec environ un tiers de la SAU française, soit 8,9 Mha en 2022. Ensuite viennent les oléagineux (colza, tournesol, lin) sur 2,3 Mha, les cultures industrielles (betteraves sucrières, plantes à fibre, plantes aromatiques et médicinales) sur 617 000 ha, les jachères sur 452 000 ha, les protéagineux (pois, féverole, autres légumineuses à graines) sur 309 000 ha, et les pommes de terre sur 211 000 ha.

Depuis 1950, les surfaces en céréales sont globalement stables alors que les surfaces en oléagineux ont fortement augmenté. Les surfaces de pomme de terre ont été divisées par 4. Les cultures industrielles²³ ne représentent que 5 % de la SAU, mais sont aujourd'hui en forte hausse du fait de l'essor des plantes à fibre (chanvre et lin). Les légumineuses à graines ont vu leur surface divisée par 3 depuis 1980.

Les grandes cultures sont prépondérantes dans la moitié Nord de la France, en particulier dans les grands bassins céréaliers des régions Île-de-France, Hauts-de-France, Grand Est et Centre-Val de Loire.

²³ Cultures spécifiquement destinées à alimenter des industries de transformation (dont agroalimentaires) : pomme de terre, betterave industrielle, chanvre, lin, etc.

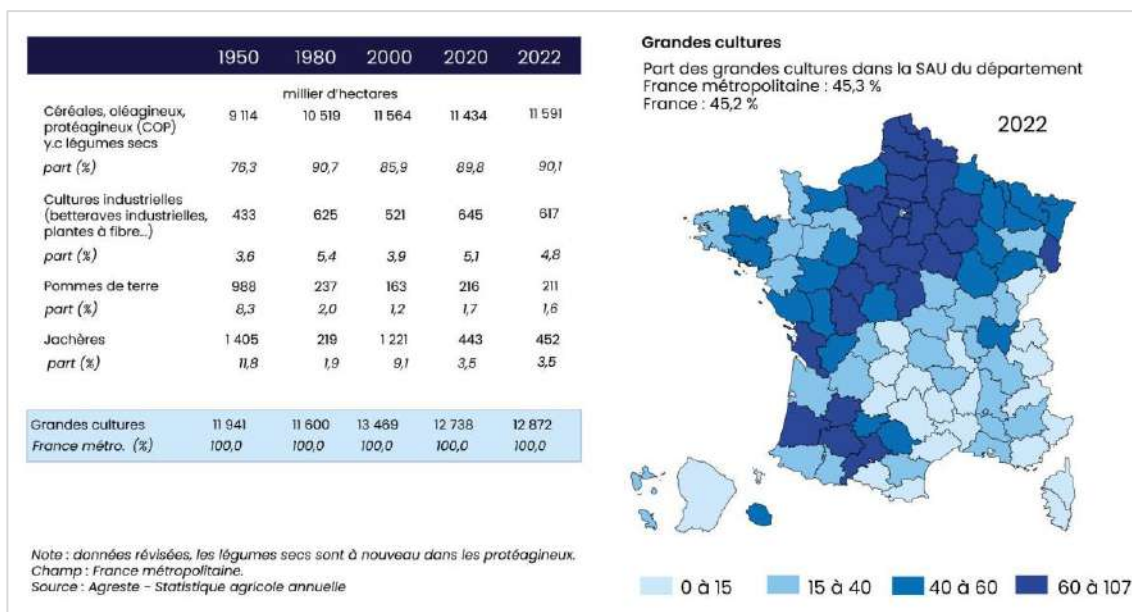


Figure 7 : Surface de grandes cultures en France métropolitaine

Source : Agreste - Statistique agricole annuelle

En céréales, **le blé tendre est la principale céréale cultivée en France** avec en 2022 52 % du total des surfaces céréalières, sur plus de 4,5 Mha, devant l'orge (21 %) et le maïs grain (16 %), et ses surfaces se maintiennent globalement. Les rendements des céréales ont fortement augmenté durant les années 1950-1990, en lien avec la progression conjointe de la génétique, de l'utilisation de fertilisants et de produits phytosanitaires, et du perfectionnement des techniques de moisson, mais ils ne progressent plus, affichant une forte variabilité annuelle corrélée aux effets du changement climatique (sécheresse, excès d'eau, stress thermiques, etc.)^{24,25}. Ainsi, **le rendement moyen du blé tendre a été en 2022 de 72 quintaux par hectare (contre 15 quintaux en 1950 et 50 quintaux en 1980)**, mais ceux des années 2016 (54 qx/ha, - 24 % par rapport à la moyenne quinquennale²⁶) et 2024 (64 qx/ha)²⁷ ont été particulièrement décevants.

À l'inverse, **les surfaces de maïs ont tendance à diminuer**, avec une forte volatilité des rendements selon les sécheresses estivales. Ainsi, après une récolte historiquement faible en 2022 (la plus faible depuis 1990 : rendement du maïs grain – hors semences – en baisse de 25 qx/ha par rapport à 2021 et de 15 qx/ha par rapport à la moyenne 2017-2021), la récolte 2023 affiche un rendement moyen de 97 qx/ha, en hausse de 25 % par rapport à 2022 et de 12 % par rapport à la moyenne 2018-2023²⁸.

En orge, les surfaces sont plutôt stables, voire en légère hausse, et peuvent bénéficier du report de semis de blé n'ayant pu être effectués en bonnes conditions à l'automne. En revanche, le rendement est là aussi très affecté par les sécheresses qui pénalisent particulièrement les orges-estives de printemps (à la différence des orges d'hiver).

La France est le principal producteur européen de céréales, concentrant en 2022 27 % de la production européenne de blé tendre et 22 % de celle d'orge, devant l'Allemagne (respectivement 16 % et 20 %). Le maïs français représente 21 % de la production européenne, suivi par la production polonaise.

²⁴ Evolution du rendement moyen annuel du blé France entière de 1815 à 2021 - Académie d'agriculture de France

²⁵ Progression comparée des rendements moyens français du blé tendre et du maïs grain (1960-2017) - Académie d'agriculture de France

²⁶ https://arvalis.fr/sites/default/files/imported_files/doss_presse_recolte_bles7728213614823161969.pdf

²⁷ <https://www.arvalis.fr/espace-presse/recolte-de-ble-tendre-2024-des-rendements-estimes-en-forte-baisse-apres-une-annee>

²⁸ https://www.franceagrimer.fr/fam/content/download/73109/document/Qualit@lim_Ma%C3%AFs_2023.pdf?version=2

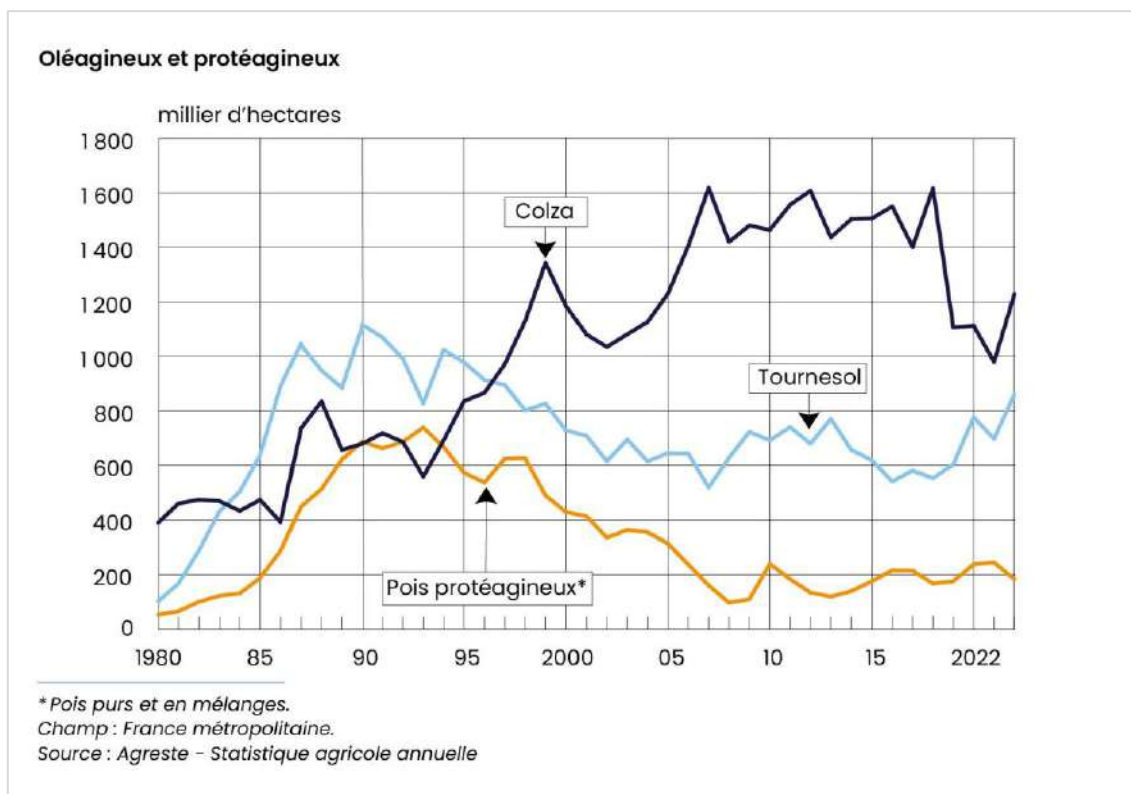


Figure 8 : Surface des oléagineux et protéagineux
 Source : Agreste – Statistique agricole annuelle

En oléagineux, le colza occupe, avec 1,2 Mha en 2022, la majorité des surfaces (53 %), suivi par le tournesol (37 %), le soja (8 %) et le lin oléagineux (1,5 %).

Les surfaces peuvent varier de façon significative d'une année à l'autre en fonction du prix des graines sur les marchés. La production française de graines oléagineuses atteint un tonnage total de 6,7 Mt en 2022, dont 4,5 Mt de colza et 1,8 Mt de tournesol. La moitié de la sole de colza est concentrée dans les régions Centre-Val de Loire, Grand Est et Hauts de France.

Les graines oléagineuses sont cultivées pour leur richesse en huile, les résidus de la trituration et les tourteaux étant valorisés en alimentation animale. La production française de tourteaux atteint depuis 2010 plus de 3 Mt par an, ce qui ne couvre que la moitié des besoins : en 2021-2022, 54 % des besoins ont été couverts par les importations, majoritairement de tourteaux de soja sud-américain.

Les surfaces en protéagineux (pois et féveroles essentiellement) restent très inférieures à leur niveau des années 1990, lorsque des politiques publiques spécifiques de soutien des prix y étaient dédiées. En 2022, moins de 260 000 hectares y ont été consacrés (132 000 ha pour le pois, 68 000 ha pour la féverole), malgré le fort intérêt agronomique de ces plantes légumineuses, ne nécessitant aucun apport d'engrais azoté. La faiblesse des rendements (jusqu'à un risque de rendement nul en année très humide comme 2024), l'absence de prix rémunérateurs, faute de filières attractives ou suffisamment structurées, ainsi que la difficulté à lutter contre certains insectes (bruches) ou contre les oiseaux au moment des semis, ou encore contre certains champignons du sol (exemple du pois protéagineux, très sensible au champignon *Aphanomyces euteiches*, contre lequel n'existe aucun moyen de lutte efficace²⁹) sont des facteurs de découragement pour les agriculteurs. En outre, le manque d'intérêt économique de ces filières freine la recherche de nouvelles variétés et l'amélioration génétique des espèces cultivées. Or, la relance de la culture des légumineuses est pourtant un levier majeur dans les stratégies d'atténuation du secteur (voir Partie III), tout particulièrement pour l'abaissement des émissions de protoxyde d'azote.

²⁹ Voisin et al., 2013, « Les légumineuses dans l'Europe du XXI^e siècle : Quelle place dans les systèmes agricoles et alimentaires actuels et futurs ? Quels nouveaux défis pour la recherche ? ». *Innovations Agronomiques*, 30, pp.283-312.

La France se place néanmoins au 2^{ème} rang de l'UE en 2022 en matière de production de légumineuses (0,9 Mt), avec de bonnes places sur les principales espèces (2^{ème} en soja, 3^{ème} en féverole, 4^{ème} lupin).

d. Vignes et vergers, des cultures permanentes en fort recul

Les surfaces de cultures permanentes ont été divisées par 2 depuis les années 1950, passant de 2 à 1 Mha au total. Ainsi les vignes occupaient encore 1,5 Mha en 1950, mais ne couvrent plus que 795 000 ha aujourd'hui. Les surfaces viticoles ont fortement baissé dans les années 1980, du fait des politiques d'encouragement à l'arrachage pour les vins de consommation courante.

De même, **les vergers ont perdu presque 60 % de leur surface depuis 1950**, passant de 453 000 hectares à 197 000 aujourd'hui. Cette surface est globalement stable depuis 2010, avec de grandes disparités entre espèces : les surfaces en noyers, noisetiers, châtaigniers, amandiers et pommiers à cidre ont nettement progressé, alors que celles en pruniers, cerisiers, abricotiers, pêchers et nectariniers ont diminué. Depuis 2021, les surfaces en noisetiers stagnent en raison d'impasses techniques de protection contre certains ravageurs. Le verger français est situé principalement dans le bassin Rhône-Méditerranée (40 %) et dans le Sud-Ouest (25 %), zones particulièrement vulnérables au changement climatique (voir partie II.2).

e. D'autres cultures, sur des surfaces moindres, mais stratégiques

Les cultures de légumes frais couvrent une surface d'environ 250 000 hectares, dominés par les petits pois (44 000 ha) et les haricots (39 000 ha), suivis des choux (23 000 ha), du maïs doux (21 000 ha), des oignons (17 000 ha), des carottes (14 000 ha) et des melons (12 000 ha). Au total, la production de légumes frais s'est élevée en 2022 à 4,9 millions de tonnes, pénalisée par la sécheresse du printemps et de l'été (- 7 % par rapport à 2021), en net recul par rapport à l'année 2000 où la production totale s'élevait à plus de 6 millions de tonnes. **Le maraîchage diversifié occupe plus de 56 000 hectares, tandis que les fleurs et plantes ornementales occupent 4 700 hectares en 2022.**

f. Semences et plants : un secteur stratégique pour la résilience agricole nationale

La France est un des leaders mondiaux du secteur des semences : 1^{er} producteur européen, 1^{er} exportateur mondial en semences de grandes cultures, 2^{ème} pour les semences d'espèces potagères. Plus de la moitié de la production nationale de semences est destinée à l'export, dont les trois quarts à l'intérieur de l'Union européenne.

Le secteur comprend plus de 70 entreprises de création et de maintenance variétale, en majorité des PME et TPE, plus de 250 entreprises de production de semences ainsi que 66 entreprises spécialisées de triage à façon, réparties sur l'ensemble du territoire. Environ **17 000 agriculteurs multiplicateurs** spécialisés et détenteurs d'un savoir-faire reconnu dans le monde entier assurent le travail de multiplication des semences **sur une surface de l'ordre de 380 000 ha en France**. L'activité se concentre pour l'essentiel dans cinq régions françaises (Centre-Val de Loire, Bassin parisien, Sud-Ouest, pourtour méditerranéen, couloir rhodanien), mais on compte des agriculteurs-multiplicateurs dans l'ensemble des départements.

La production de semences biologiques implique plus particulièrement 140 entreprises et 1 400 agriculteurs multiplicateurs, qui assurent la production de près de 600 variétés de 114 espèces différentes sur 23 000 ha, soit une augmentation des surfaces de 30 % depuis 2018 et un doublement du nombre de variétés bio produites en cinq ans³⁰.

³⁰ Source : SEMAE

Ce secteur contribue à garantir un bon degré de diversité variétale spécifique comme de disponibilité des semences sur le territoire. Il s'agit d'une activité stratégique pour la résilience et le potentiel d'adaptation des productions végétales, et celle-ci pourrait, en ce sens, constituer un usage prioritaire de l'irrigation et des intrants en période de stress climatique ou de faible disponibilité énergétique.

Remarque : les agriculteurs sont autorisés à ressemer une partie de leur propre récolte (même issue de semences certifiées) pour 21 espèces³¹. Les semences fermières concernent ainsi environ la moitié des surfaces de blé en France.

D'autres schémas de sélection se sont structurés également autour du réseau des Semences Paysannes, sous des formes participatives et très adaptées aux contextes locaux, accompagnées par le monde de la recherche (INRAE)³².

g. Irrigation et drainage des terres agricoles : des surfaces limitées, mais en hausse

En 2020, 6,8 % des surfaces agricoles ont été irriguées, soit 1,8 Mha³³, en hausse de 15 % par rapport à 2010, soit 64 % de la surface irrigable (surface équipée d'un système d'irrigation) qui couvre 2,8 Mha. La part de surface irrigable a augmenté dans toutes les OTEX depuis 2010, et atteint désormais la moitié des surfaces des exploitations spécialisées en maraîchage et horticulture, ainsi qu'en cultures fruitières et autres cultures permanentes. En viticulture, 10 % des surfaces sont aujourd'hui irrigables.

Les prélèvements d'eau sont variables selon les années et les territoires. Ils sont plus élevés dans la moitié sud du pays et dans une moindre mesure dans le Centre-Ouest. En moyenne 1 900 m³ d'eau³⁴ sont prélevés par hectare irrigué, en très légère baisse depuis 2010. Cette quantité moyenne d'eau prélevée varie considérablement selon les départements, de 40 m³/ha irrigué en Meurthe-et-Moselle à 9 700 dans les Pyrénées-Orientales.

En 2020, le maïs représente environ un tiers des surfaces irriguées, les fruits et légumes 15 %. Les légumes, les fruits, le soja, le maïs et les pommes de terre sont les cultures dont les surfaces sont proportionnellement les plus irriguées. **En 2020, plus de 60 % des surfaces de légumes, 50 % des surfaces de vergers, 40 % des surfaces de pommes de terre et soja et 34 % des surfaces de maïs ont été irriguées³⁵.**

³¹ <https://www.semae.fr/protéger-creation-varietes-vegetales-et-semences-de-ferme/>

³² <https://moulon.inrae.fr/equipes/deap/>

³³ <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/media/7165/download?inline>

³⁴ Ibid.

³⁵ AGRESTE, 2024. Graph'Agri 2023

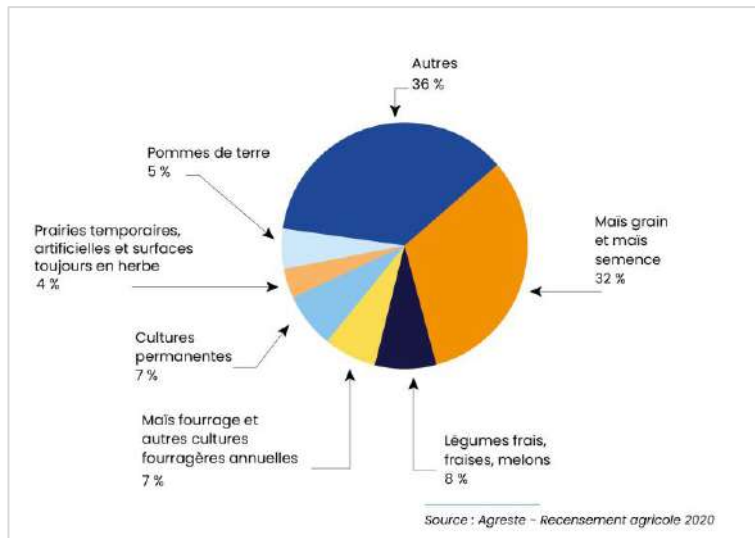


Figure 9 : Répartition des surfaces irriguées

Source : Agreste, Recensement Agricole 2020

Il existe une grande variété de dispositifs d'irrigation installés en France, les choix étant dictés à la fois par la nature de cultures et le coût d'amortissement des équipements retenus. La sole irriguée est ainsi équipée³⁶ :

- à environ 50 % d'enrouleurs, systèmes mobiles et ajustables à une variété de cultures, présents à hauteur de 80-90 % dans le Nord de la France ;
- à 20 % de pivots (et/ou rampes d'irrigation), non déplaçables, implantés dans des zones irriguées chaque année (Ouest et une partie de l'Alsace) ;
- à 15 % de dispositifs de couverture intégrale, mobiles, facilement réparables, mais toutefois vieillissants et réclament beaucoup de main d'œuvre ;
- à 15 % de dispositifs de micro-irrigation, utilisés principalement en vigne et en maraîchage, sous deux formes : dispositifs enterrés non mobiles ou dispositifs de surface (soit réutilisables, soit jetables, avec un enjeu de pollution plastique pour ce matériel lors de son exploitation).

Inversement, une partie de la SAU a été aménagée par des techniques de drainage pour gérer l'eau en excès dans des sols hydromorphes. D'après les données disponibles, la superficie des terres drainées en France s'établirait (en 2015) à un peu plus de 3 Mha, soit 10 % de la SAU³⁷.

D. Les productions animales : des cheptels diversifiés aux trajectoires divergentes

Sauf exception mentionnée, les données présentées sont issues de Graph'Agri 2023.

Près de 145 000 exploitations sont consacrées à l'élevage, soit 37 % de l'ensemble des exploitations françaises. Les dernières statistiques confirment une dynamique de long terme, à savoir la décapitalisation des filières d'élevage bovin, ovin et porcin, à la fois en termes démographiques, économiques et de surfaces mobilisées. Les effectifs bovins ont baissé de plus de 10 % depuis 10 ans, le nombre de fermes détenant des bovins de plus de 25 %. Les dynamiques des dernières décennies ont cependant été différentes entre les élevages bovins laitiers et allaitants. En élevage ovin, les effectifs ont baissé de 11 % depuis 2012, le nombre de fermes ovines de 36 %. L'effectif des élevages porcins a quant à lui diminué de 60 % entre 2010 et 2020.

³⁶ Dires d'expert d'Arvalis

³⁷ Vincent, B. (2020). Principes techniques et chiffres du drainage agricole – De la tuyautique à l'hydro-diplomatie. Sciences Eaux & Territoires, (32), 8–15

a. Les élevages bovins laitiers, entre contraction des effectifs et agrandissement des fermes

Restant une composante majeure de l'élevage hexagonal avec près de 68 000 exploitations recensées en 2022, l'élevage bovin laitier voit ses effectifs se contracter, avec environ 3,2 millions de vaches laitières (- 2,7 % en un an), contre plus de 7 millions au début des années 1980. Malgré cette baisse, la collecte de lait de vache, après avoir fortement décru à la suite de l'instauration des quotas laitiers de 1984, avait retrouvé en 2015 son niveau de 1980 du fait de l'augmentation de la production de lait par vache. Néanmoins, cette collecte diminue depuis deux ans en raison notamment de l'arrêt de nombreux producteurs ou de la conversion vers la production de céréales, et de difficultés liées à la production de fourrages (sécheresses). Elle représente 23 milliards de litres de lait environ, de l'ordre de 7 000 litres de lait par vache et par an.

Géographiquement, le cheptel bovin laitier est présent principalement dans l'arc laitier des Pays de la Loire, de la Bretagne et de la Normandie, abritant 52 % des effectifs de vaches laitières en 2022. À ces pôles du Grand Ouest s'ajoutent, avec une moindre densité d'élevage, les plaines de l'Est et les zones d'élevage des massifs montagneux (Franche-Comté, Alpes du Nord, Massif central). Il subsiste ainsi une relative diversité de contextes paysagers dans lesquels s'épanouit l'élevage bovin laitier. En outre, les exploitations laitières reposent pour 23 % d'entre elles sur l'association de plusieurs formes d'élevage bovin (« bovin mixte »), modèles essentiellement représentés dans le Massif Central et le Grand Est, ou encore s'exercent dans des schémas de polyculture-élevage³⁸.

En dépit de la dynamique de décapitalisation affectant le secteur, **la France demeure le 2^{ème} producteur laitier en Europe**, derrière l'Allemagne. La taille moyenne des troupeaux reste toutefois bien inférieure à celle des pays nordiques européens, de l'Allemagne ou du Royaume-Uni, où les fermes de plus de 1 000 vaches sont courantes. **La ferme laitière moyenne française élève 47 vaches. 57 % des fermes possèdent moins de 70 vaches laitières, 4 % seulement plus de 150.** La tendance est à l'agrandissement des troupeaux : en 2020, 19 % des élevages laitiers ont plus de 100 vaches, contre 11 % en 2010³⁹.

En valeur, les produits laitiers représentent 12 % de la production agricole nationale. **Avec une cinquantaine d'AOC, une dizaine d'IGP, des groupes de transformation dans le top 15 mondial, la filière laitière française occupe une place visible sur la scène internationale.** En Europe, l'Allemagne et la France se détachent nettement devant la Pologne, suivie par les Pays-Bas et l'Italie. Sur le plan mondial toutefois, ces deux pays figurent loin derrière l'Inde ou les États-Unis d'Amérique.

³⁸ Agreste, « Les exploitations bovines laitières en France métropolitaine en 2020 », Novembre 2023.

³⁹ https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/Dos2304/Dossiers2023-4_BovinsLait.pdf

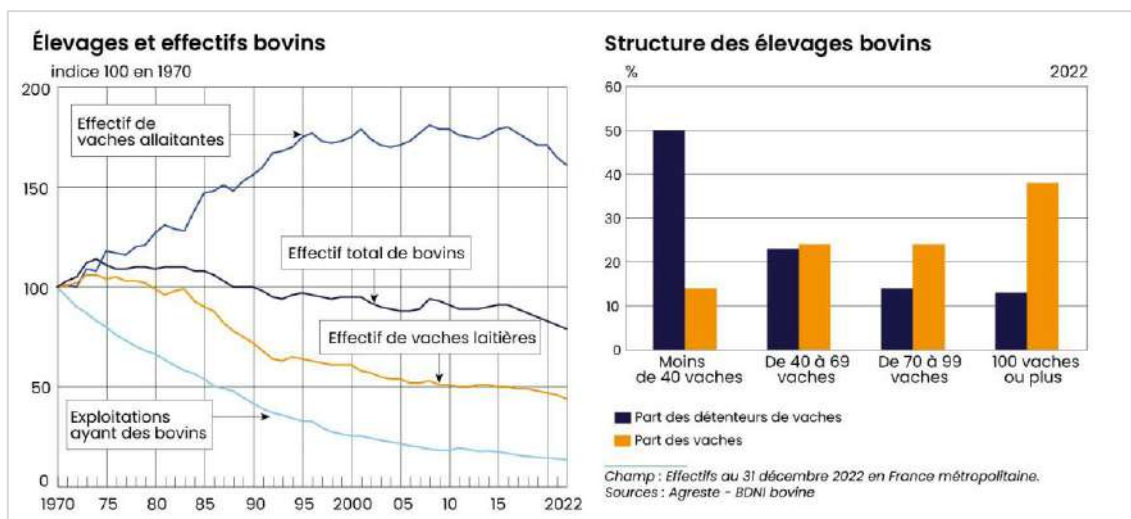


Figure 10 : Élevages et effectifs bovins, et structure des élevages bovins

Source : Graph'Agri 2023

b. Les élevages bovins viande, des effectifs en déclin et des tailles d'élevages limitées

116 000 exploitations élèvent des vaches allaitantes en 2022, avec un cheptel total de 3,8 millions de têtes (contre 2,9 en 1983), effectif en déclin depuis 2015.

En tendance, après avoir augmenté régulièrement, la production de viande bovine décroît depuis 30 ans et retrouve aujourd'hui son niveau de 1970, avec 1 600 milliers de tonne-équivalent-carcasse (tec)⁴⁰ en 2022.

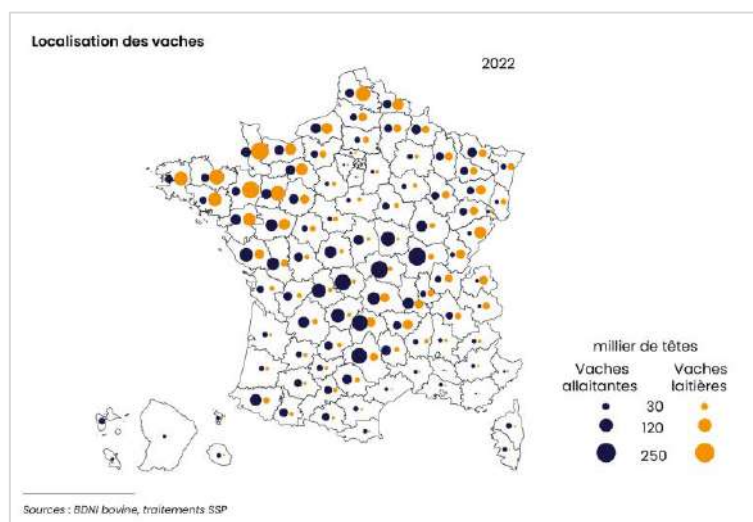


Figure 11 : Localisation des vaches

Source : Graph'Agri 2023

L'élevage bovin allaitant s'étend essentiellement dans les régions herbagères du centre de la France, à savoir le Massif Central, la Bourgogne, le Poitou-Charentes ou le Limousin. Cinq départements (Saône-et-Loire, Allier, Creuse, Cantal et Aveyron) comptant chacun près de 150 000 têtes de vaches allaitantes, abritent 23 % du cheptel bovin allaitant de la France métropolitaine.

⁴⁰ Unité permettant de comparer les produits transformés entre eux après application d'un coefficient de conversion les exprimant selon le poids de carcasse originel.

La taille des élevages de vaches allaitantes reste limitée : 64 % ont entre 5 et 50 animaux⁴¹. Seuls 10 % des élevages détiennent plus de 100 vaches allaitantes.

Avec ses vastes surfaces de prairies permanentes, la France constitue pourtant de loin le premier cheptel bovin européen, devant l'Allemagne, l'Irlande et l'Espagne. La production de brouards (bovins maigres de plus de 160 kg élevés en pâture, hors veaux), est en effet une spécialisation notable de la filière française. Cette production est largement dépendante de l'export (1,1 million de brouards sur 1,5 million de bovins exportés), à 80 % vers l'Italie (dans une moindre mesure vers l'Espagne et l'Algérie). Dans des zones géographiques distinctes, la filière bovine française produit également des bovins engraisés (gros bovins finis) dont les vaches représentent environ 50 %.

La filière viande bovine possède des liens étroits avec la filière laitière puisque cette dernière lui fournit des veaux et des vaches laitières de réforme. La majeure partie des veaux mâles laitiers (61 % en 2016) est ainsi destinée à la filière des « veaux de boucherie ». Hormis 1 % des veaux laitiers mâles qui sont destinés à la reproduction, le restant est également destiné à la filière viande au sens large (jeune bovin, export maigre ou bœuf). Les veaux femelles issues du cheptel laitier sont quant à elles à 69 % destinées à la reproduction.

c. Les élevages ovins, des dynamiques contrastées entre production de viande et de lait

L'élevage ovin est également en recul. **Avec près de 6,6 millions de têtes en 2022, le cheptel ovin français est en baisse de 5,7 % par rapport à 2021 et de 11,5 % par rapport à 2012.** Le nombre d'exploitations ovines continue de chuter, passant de 50 300 à 32 300 unités entre 2012 et 2022 (- 36 %), alors qu'elles étaient encore 95 000 en 2000. Malgré cette décapitalisation, la France possède le 4^{ème} troupeau ovin à l'échelle européenne, derrière l'Espagne, la Roumanie et la Grèce. La production française de viande ovine est de l'ordre de 80 milliers de tonnes-équivalent-carcasse (tec).

Les effectifs de brebis allaitantes se sont érodés de manière plus significative que ceux de brebis laitières sur la décennie écoulée (- 19,8 %, contre 4,8 %). Géographiquement, le cheptel laitier se concentre dans trois bassins (Roquefort, Ossau-Iraty, Broccio), tandis que le cheptel allaitant se situe essentiellement dans le sud de la France.



Figure 12 : Effectifs des ovins et répartition sur le territoire français
Source : Graph'Agri 2023

⁴¹ https://idele.fr/?eID=cmis_download&old=workspace%3A%2F%2FSpacesStore%2F5173106d-ab95-464e-8ce4-073ec3c92720&cHash=35c67b92156dc7c82a91d5b5d235276a

La production de lait de brebis avoisine les 300 millions de litres de lait par an, en légère baisse en 2022 après une dynamique de hausse régulière depuis plusieurs décennies. La collecte de lait de brebis était trois fois inférieure en 1980.

d. Les élevages caprins, une dynamique d'essor

Le cheptel caprin comprend un effectif moindre avec 1,3 million de têtes réparties entre 11 200 exploitations en 2022. Ce type d'élevage s'inscrit dans une trajectoire plus favorable que les productions animales évoquées précédemment. L'effectif total de caprins est stable depuis 2012, mais le nombre d'exploitations tend à s'éroder. La production de viande caprine correspond à environ 6,3 milliers de tec en 2022. **Les entreprises laitières françaises ont collecté 527 millions de litres de lait de chèvre en 2022** (+ 1,7 % en un an), **confirmant le dynamisme de la filière.** La Nouvelle-Aquitaine conserve en 2022 son statut de 1^{ère} région caprine, avec plus du tiers du cheptel et de la production totale. Les établissements de la région fabriquent les trois quarts des fromages industriels de chèvre.

La production française de lait de chèvre représente un poids significatif à l'échelle européenne, comptant pour un peu moins d'un tiers de la collecte, désormais dépassée par celle des Pays-Bas.

e. Les élevages porcins face à une réduction et à une concentration des effectifs

En 2022, le cheptel porcine français comprend 12,1 millions de têtes, en réduction de presque 6 % sur un an, prolongeant une décrue moyenne annuelle de 1,3 % sur les dix années précédentes. On ne dénombre en 2020 qu'un peu plus de 13 000 élevages porcins, contre 22 000 en 2010 et presque 60 000 en 2000. **Cette baisse s'est accompagnée d'une forte concentration, 66 % des élevages possédant désormais plus de 2 000 animaux.**

Les trois quarts des effectifs porcins se trouvent dans les régions de la façade atlantique, en Bretagne (55,8 % des porcins français), Pays de la Loire (11,1 %) et Nouvelle-Aquitaine (6,8 %). Cette spécialisation de la Bretagne en élevage porcine et avicole (voir ci-dessous), sous des formats hors sol, est récente. Initiée à partir des années 1950, elle s'explique autant par des facteurs socio-économiques (prédominance des petites exploitations et difficulté à acquérir des terres supplémentaires, agriculteurs en recherche de conversion après les crises locales du lin, de la pomme de terre et de l'élevage de chevaux) que par l'émergence d'innovations techniques et organisationnelles, tout en ayant été fortement encouragée par les pouvoirs publics⁴². Elle a par la suite été grandement favorisée par la proximité des ports pour les importations de soja et de maïs (et pour les exportations de volailles).

La production de viande porcine représente 2 180 milliers de tec, couvrant à peu près la consommation nationale. Avec 9 % du cheptel européen, la France occupe la troisième place, nettement derrière l'Espagne (25 % du cheptel européen) et l'Allemagne (16 %).

⁴² <https://ritme.hypotheses.org/7735>

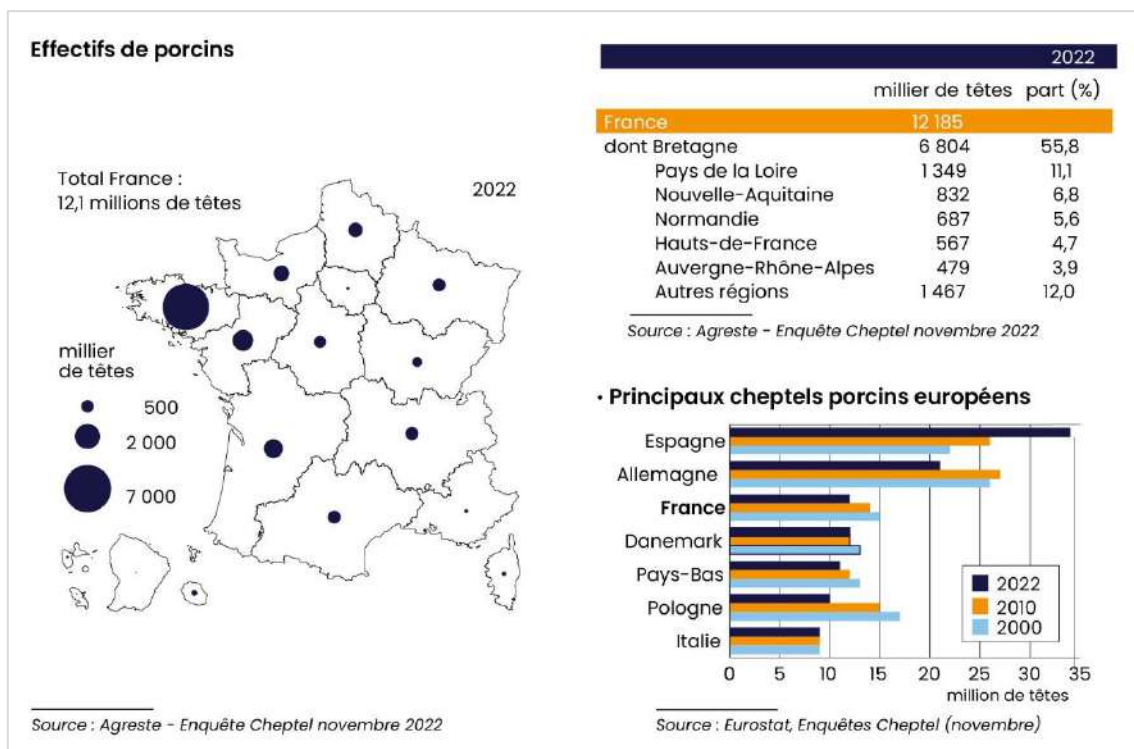


Figure 13 : Effectifs de porcins

Source : Graph'Agri 2023

f. Les élevages avicoles, entre concentration et évolution des pratiques

Si la filière française de volailles de chair regroupe différentes espèces (poulets, dindes, canards et oies, pintades, cailles), ce sont les élevages de poulets qui dominent largement : ils ont fourni, en 2022, 1,16 million de tec, soit les trois quarts de la production totale (1,55 million de tec). Cette proportion s'est accentuée ces dernières années en lien avec la décline de la production de canards particulièrement affectée par l'épizootie d'influenza aviaire (- 30 % depuis 2021, - 50 % depuis 2010) et la baisse de la production de dindes (respectivement - 17 % et - 37 %). La production totale de volaille de chair a reculé de 7,8 % entre 2021 et 2022.

Le cheptel de poulets de chair s'est légèrement contracté en 2022, reculant à 143 millions d'animaux (- 5,2 % sur un an), mais reste supérieur de 10 % aux effectifs de 2000 (130 millions). Il se répartit dans 8 500 exploitations. Une grande partie des élevages (44 %) possèdent de 2 000 à 10 000 poulets, cependant les deux tiers des poulets appartiennent à des exploitations de plus de 20 000 animaux. La filière est très concentrée géographiquement, la Bretagne et les Pays de la Loire abritant 53 % des effectifs. La France est le 3^{ème} producteur de poulets et le 1^{er} producteur de dindes en Europe, la filière étant marquée par un fort déficit du commerce extérieur (voir partie E ci-après).

En élevage de poules pondeuses, le cheptel est stable ces deux dernières années, mais comprend presque 20 % de poules de plus qu'en 2000 : il s'élève à environ 47 millions de têtes à un instant donné, pour des capacités de production de 57 millions (vides sanitaires compris). La moitié des **2 250 élevages** comprend de 2 000 à 10 000 poules, cependant 55 % des poules sont élevées dans des élevages de plus de 50 000 têtes, 20 % dans des élevages de 20 000 à 50 000 têtes. Ces dernières sont principalement situées en Bretagne où sont élevés 35 % des effectifs de poules pondeuses.

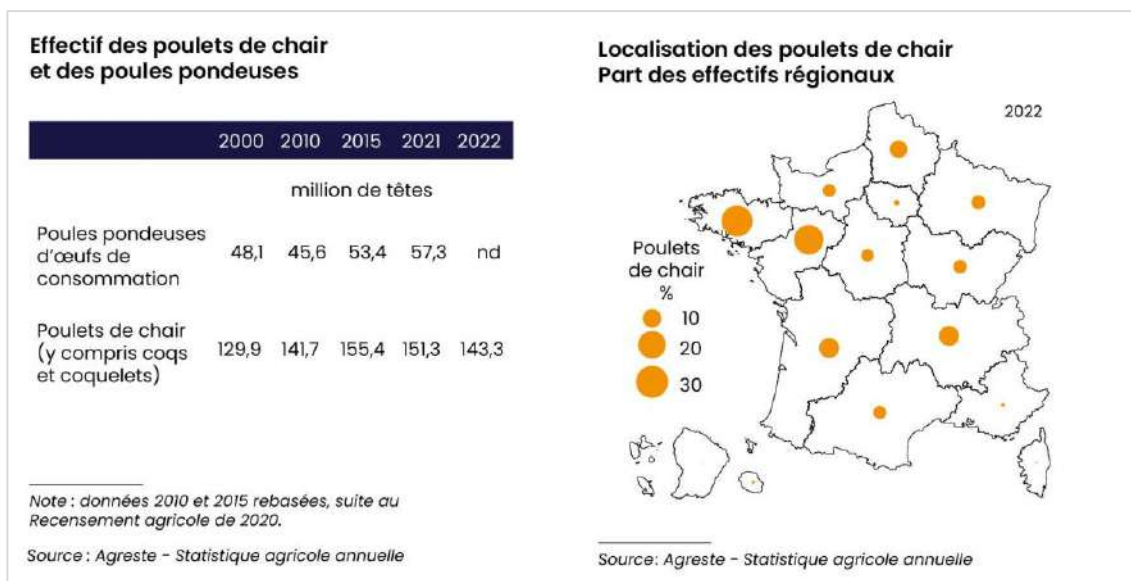


Figure 14 : Effectif des poulets de chair et des poules pondeuses, localisation des poulets de chair et part des effectifs régionaux

Source : Agreste – Statistique agricole annuelle

Les systèmes d'élevage avicole se sont beaucoup adaptés ces dernières années, progressant nettement en matière de bien-être animal. **Deux tiers des poules pondeuses sont aujourd'hui issues d'élevages dits alternatifs dont 16 % en agriculture biologique, 28 % en plein air et 26 % au sol, proportion ayant doublé depuis 2016 et signant l'abandon progressif des systèmes d'élevage en cage.**

Les élevages français ont produit en 2022 15,4 milliards d'œufs, en léger repli de 1,6 % sur un an, mais en hausse de presque 25 % depuis 2005, pour un tonnage de 943 milliers de tonnes-équivalent-œuf-coquille (teoc). La part d'œufs issus de modalités d'élevages alternatives atteint 62 % en 2022 (55 % en 2021).

La France est le 1^{er} producteur d'œufs européen (14 % de la production) devant l'Allemagne (14 %), l'Espagne (12 %), l'Italie (12 %), et les Pays-Bas (10 %). La consommation des Français atteint 14,5 kg équivalent-œuf-coquille par personne en 2022, contre 14 en 2021 et 12,5 kg en 2010.

Productions végétales et animales en agriculture biologique

En 2022, plus de 60 000 exploitations étaient engagées en agriculture biologique (AB), en conversion ou certifiées, représentant 10,7 % de la SAU totale (2,9 millions d'hectares). La progression des surfaces AB continue, mais ralentit dans le contexte de baisse du marché. Ce sont les PPAM (plantes à parfum, aromatiques et médicinales), les vignes et les fruits qui sont les productions végétales les plus couramment cultivées selon le mode biologique. Les grandes cultures en agriculture biologique sont en hausse de 4 % (10 % en 2021), mais cela ne représente que 7 % de leurs surfaces. Les régions Provence-Alpes-Côte d'Azur, Corse et Occitanie ont ainsi les parts de SAU en AB les plus importantes (respectivement 36 %, 22 % et 19 % des surfaces). En productions animales, ce sont les poules pondeuses, suivies des brebis laitières et des chèvres qui sont les plus couramment élevées selon le mode AB.

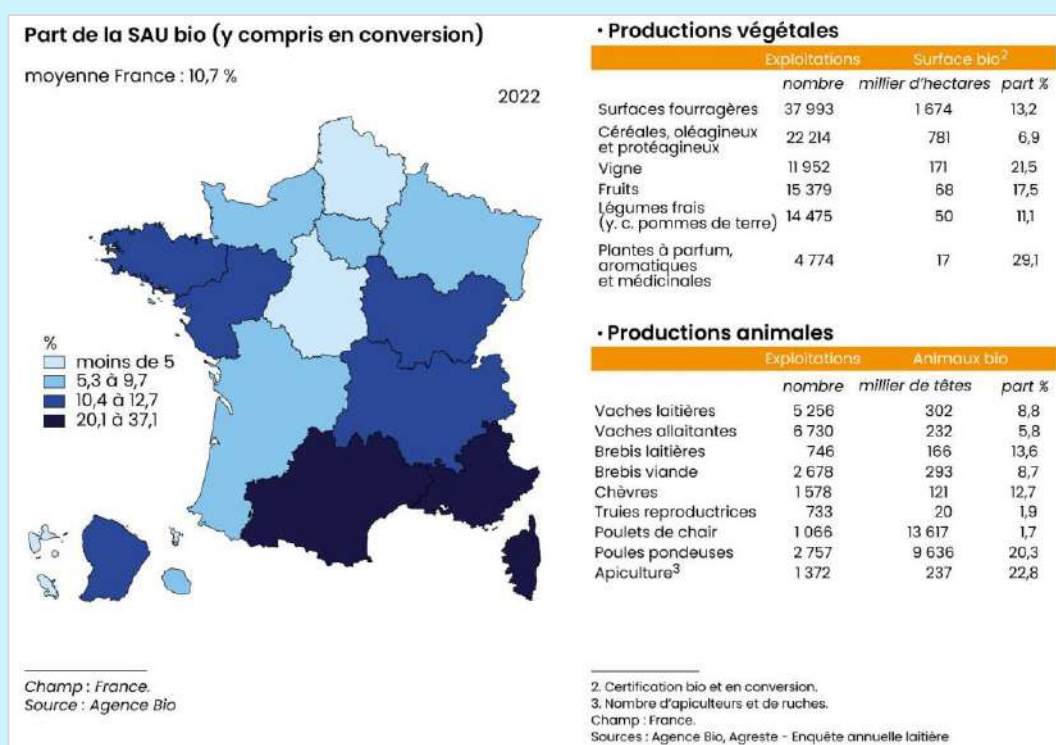


Figure 15 : Part de la SAU bio (y compris en conversion)

Source : Agence Bio

En grandes cultures, les rendements en AB sont inférieurs à ceux de l'agriculture conventionnelle, avec des écarts très variables selon les espèces et les régions⁴³. En 2022, l'écart est le plus important pour le blé tendre (- 57 %), suivi des orges (- 46 %) et du maïs non irrigué (- 35 %). Il n'est que de 28 % en tournesol et 26 % en soja (en moyenne sur les cinq dernières années).

Les systèmes AB se distinguent par une présence plus marquée des cultures de légumineuses, nécessaires pour apporter l'azote nécessaire aux autres cultures en l'absence d'utilisation d'engrais minéraux : les légumineuses sont incluses dans les rotations pour 30 à 55 % des cultures pratiquées en grandes cultures en AB, avec un maximum atteint pour les systèmes de polyculture-élevage. La légumineuse la plus cultivée en AB est le soja (4,9 % de la SAU bio), suivi par la féverole (3,5 %) et les légumes secs (2,6 %).

⁴³ https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/Pri2308/Primeur2023-8_RendementsGdesCultures.pdf

E. Exportations et importations : la place de la France dans les échanges agricoles et alimentaires internationaux

Les crises sanitaires et géopolitiques récentes ont mis en évidence les vulnérabilités du système agricole et alimentaire national, illustrées désormais dans le débat public par la notion de souveraineté alimentaire. Ce concept, initialement porté au niveau international par le mouvement altermondialiste lors du Sommet mondial de l'alimentation à Rome en 1996, a ainsi vu sa définition évoluer, se rapprochant désormais plutôt de questions de stratégie et de sécurisation de l'alimentation. Nous présentons ici un bref éclairage sur les grandes lignes de la place de l'agriculture nationale dans les échanges internationaux.

La France a été en 2022 le 6^{ème} exportateur mondial en valeur de produits agricoles et alimentaires, avec une part de marché de 4,5 %. Elle était le 2^{ème} il y a 20 ans. Parmi les exportations françaises, le secteur agricole et agroalimentaire occupe la 3^{ème} place après le secteur aéronautique et spatial et le secteur de la chimie, des parfums et cosmétiques⁴⁴. Ce sont surtout les exportations de vins et spiritueux qui pèsent dans les comptes, et le bilan global cache de grandes disparités entre filières : malgré ses vastes surfaces agricoles et les volumes produits, la France n'est pas autonome pour son alimentation. Selon les productions, il peut s'agir d'un déficit d'offre lié à un manque de compétitivité (cas des fruits et légumes), mais aussi d'un décalage entre les caractéristiques et qualité des productions françaises et la demande des consommateurs (cas du secteur bovin), ou encore d'une transformation agroalimentaire délocalisée avant réimportation (cas du blé dur).

Certains secteurs montrent ainsi une forte dépendance aux importations, logiquement pour les fruits tropicaux, le riz et l'huile de palme, beaucoup moins pour la viande ovine et le poulet, le blé dur, le soja, certains fruits et légumes tempérés. À l'inverse, certaines filières structurellement excédentaires sont largement exportatrices et peuvent assurer l'autosuffisance alimentaire⁴⁵ nationale (céréales, sucre) ou pourraient l'assurer si les caractéristiques de la production française correspondaient aux attentes des consommateurs (importation de vins de moyenne gamme). Elles peuvent contribuer à la sécurité alimentaire d'autres pays (cas des céréales exportées vers les pays du bassin méditerranéen ou d'Afrique, au risque parfois de perturber certaines filières locales) et/ou jouer un rôle géostratégique via le maintien de certaines relations commerciales.

FranceAgriMer a rassemblé un ensemble d'indicateurs de souveraineté alimentaire⁴⁶ pour les principales productions agricoles et agroalimentaires sur les trois dernières années. Cette étude illustre bien les distinctions à opérer entre filières, selon le taux potentiel d'auto-provisionnement, le taux de couverture de la consommation par la production nationale, la capacité d'exportation et la dépendance aux importations. Il rappelle aussi la complexité du sujet : 13 produits sur les 30 suivis ont à la fois un fort taux de dépendance aux importations et une capacité d'exportation supérieure à 20 % (pomme de terre, vin, sucre, viande porcine, ovoproduits, crème, fromage, poudre de lait écrémée, poudre de lactosérum, colza, tournesol, féveroles, blé dur). Un tableau présenté en Annexe 1 résume la situation pour les principales filières agricoles françaises.

a. Un grand pays exportateur de céréales

En blé tendre, maïs et orge, la France dispose d'un très bon taux de couverture de la consommation par la production nationale et d'une forte capacité d'exportation. En moyenne, sur les cinq dernières campagnes (2018/19 à 2022/23)⁴⁷, la France a exporté la moitié de sa production, soit plus de 31 Mt de céréales sur 64 Mt produites. Ces exportations sont composées de 54 % de blé tendre, 21 % d'orge et 14 % de maïs. **C'est l'Union européenne qui constitue le premier marché des ventes françaises de céréales** (53 % de l'export total), en particulier la Belgique, les Pays-Bas et l'Espagne. Les exportations vers les pays tiers concernent essentiellement l'Algérie, le Maroc et la Tunisie pour le blé, la Chine pour l'orge, et le Royaume-Uni et la Suisse pour le maïs.

⁴⁴ <https://infographies.agriculture.gouv.fr/post/732617117218832384>

⁴⁵ Capacité à subvenir aux besoins nationaux

⁴⁶ https://www.franceagrimer.fr/content/download/70677/document/ETU-2023-SOUVERAINETE_ALIMENTAIRE.pdf

⁴⁷ Fiche filière - Céréales - FranceAgriMer - 2024

En blé dur, le taux d'auto-provisionnement est largement excédentaire, ce qui n'empêche pas la forte dépendance aux importations en pâtes sèches et semoule, les grains étant exportés pour transformation.

b. Mais une dépendance aux importations croissante pour son alimentation

La situation est contrastée pour les oléagineux et protéagineux. Malgré un bon taux d'auto-provisionnement, la France s'affiche de plus en plus dépendante des importations de colza dont la demande est portée par les usages en biocarburants et pour les tourteaux en remplacement de soja importé. En soja, cette dépendance aux importations reste forte (67 %) malgré une nette amélioration de la production nationale de graines (voir II.1.C). Ce dernier élément est à nuancer selon les graines et les tourteaux : la France a un meilleur taux d'auto-provisionnement en graines (48 %) du fait d'une faible demande intérieure par manque d'usines de trituration sur le territoire, mais elle ne produit que 13 % du tourteau de soja qu'elle consomme.

En fruits et légumes tempérés, du fait de la forte baisse de la production depuis 20 ans, la dépendance aux importations s'accroît : le taux de couverture de la consommation par la production nationale n'est que de 63 % en fruits, 67 % en légumes frais, 74 % en pomme de terre.

En légumes secs (lentilles, fèves, haricots secs, etc.), la France reste très nettement déficitaire avec un taux d'auto-provisionnement estimé à 27 % sur la période 2001-2008, en dépit d'une faible consommation. Cette situation s'explique par la place marginale réservée à ces cultures depuis les années 1960 en l'absence de soutien économique⁴⁸. Cette dépendance aux importations de légumes secs, sources de protéines végétales diversifiées, constitue un défi d'autonomie alimentaire dans le contexte d'évolution des régimes alimentaires vers plus de protéines végétales.

La perte de souveraineté alimentaire s'accentue aussi en viande ovine et, à un rythme beaucoup plus rapide, en poulets. Les importations de viande ovine, globalement en recul depuis 15 ans, accompagnent la baisse de la consommation, mais ont cependant bondi en 2022 (+ 13,6 %). La production française ne couvre que 50 % de la consommation nationale.

En volailles de chair, les élevages français peinent à répondre à la demande nationale, l'augmentation de la production ne suffisant pas à répondre à la hausse très dynamique⁴⁹ de la consommation des viandes blanches (taux de croissance annuel moyen de 4 % entre 2012 et 2022 contre une baisse de 0,5 % en moyenne par an de viande bovine sur la même période) du fait du décalage entre la demande (de la restauration hors domicile en particulier, de volailles standard) et l'offre française ayant monté en gamme. Le déficit du commerce extérieur de viandes de volailles a ainsi dépassé le milliard d'euros en 2022, du fait de l'explosion des importations (+ 10,5 % en un an, + 80 % depuis 2010), majoritairement en provenance de Pologne et de Belgique et, désormais, d'Ukraine, tandis que les exportations régressent. La moitié de la viande de volaille de chair consommée en France est importée, alors que la consommation ne cesse d'augmenter (en moyenne 27,9 kg équivalent-carcasse en 2022 contre 23,7 en 2010).

Dans le contexte de pénurie d'œufs liée à la grippe aviaire, les importations françaises d'œufs ont aussi sensiblement augmenté en 2022 (+ 31 %), en provenance notamment des Pays-Bas, tandis que les exportations ont régressé (- 12 %). La balance extérieure française se creuse avec un déficit estimé à 64 200 teoc en 2022.

En viande bovine, malgré un taux d'auto-provisionnement restant supérieur à 90 %, la demande entraîne des importations représentant en moyenne 21 % de la consommation sur les trois dernières années, toujours selon les données FranceAgriMer. Ce taux pourrait encore augmenter si une baisse de consommation n'accompagne pas la décapitalisation du cheptel évoquée plus haut. Le flux traditionnel d'exportations de brouillards vers l'Italie, désormais bien structuré, s'explique en partie par les différences de préférences de consommation entre France et Italie, ainsi que par des orientations historiques de la PAC qui

⁴⁸ https://solagro.org/medias/publications/f12_diagnosticlegumineusesalim.pdf

⁴⁹ <https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/SynCsm23412/consyn412202307-ConsoViande.pdf>

ne rémunérerait pas les broutards. De la même façon, malgré l'autosuffisance du secteur, les importations couvrent 26 % de la consommation de viande porcine : les consommateurs français préfèrent certaines pièces comme les jambons qui doivent être en partie importés, contrairement à des morceaux comme les oreilles ou les pieds qui sont plutôt exportés.

2. Un contexte socio-économique déterminant

Si les productions agricoles se basent sur les contraintes physiques et naturelles du milieu, elles sont également conditionnées par des paramètres socio-économiques qui se jouent à des échelles territoriales, nationales et internationales comme au niveau des fermes elles-mêmes.

A. Le cadre structurant de la Politique Agricole Commune

a. D'une logique de soutien de la production au soutien du revenu agricole

Après la Seconde Guerre mondiale, l'Europe cherche à se reconstruire et à accroître sa capacité nourricière. La Politique Agricole Commune (PAC) est mise en œuvre en 1962, avec une logique de création d'un marché commun agricole à l'échelle de l'UE, déconnecté du marché mondial grâce à des taxes aux frontières visant à favoriser la production agricole européenne : c'est la préférence communautaire. En passant par un budget commun au sein de l'UE, la solidarité financière assure une redistribution au sein des États membres.

Ces logiques visaient à accroître la productivité de l'agriculture et à assurer la rémunération des agriculteurs, en s'adossant à des mécanismes de stabilisation des marchés, contribuant ainsi à garantir la sécurité des approvisionnements, tout en assurant des prix raisonnables aux consommateurs. Des négociations internationales, notamment avec les États-Unis, ont « autorisé » cette structuration des marchés malgré les règles commerciales internationales, moyennant une absence de taxes douanières sur les protéagineux, créant de fait une dépendance encore en cours aujourd'hui sur ces protéines végétales, importées depuis le continent américain⁵⁰.

Le succès de cette première logique de la PAC a conduit à une forte croissance de la production agricole européenne, au point de générer dès la fin des années 1970 des excédents en céréales, beurre, poudre de lait et viande, dont la gestion des stocks croissants devenait extrêmement coûteuse. Des mécanismes de maîtrise de la production sont alors mis en place (quotas laitiers en 1984), avant une première grande réforme en 1992 qui fait basculer les soutiens publics au secteur d'une logique de paiement à la tonne de produit au paiement à l'hectare de surface agricole, obligeant dans le même temps les agriculteurs à mettre en jachère une partie de leurs terres arables.

Au fil des réformes successives, **cette politique agricole commune est ainsi passée d'une politique de maîtrise des prix et de soutien à la production à une politique de soutien des revenus**, marquée notamment par l'introduction d'aides découplées des productions, et, avec ses dernières réformes, à une orientation progressive vers une approche prenant en compte les enjeux environnementaux.

Avec la dernière réforme de la PAC de 2023 a été de plus décidée une plus grande subsidiarité des États, en charge d'élaborer eux-mêmes leur Plan Stratégique National ou PSN⁵¹ selon les priorités nationales, mais engageant toujours chaque État dans sa contribution aux objectifs européens communs. Ce programme s'applique *a priori* jusqu'en 2027.

⁵⁰ Sophie Thoyer, « La régulation du commerce international et la PAC » (cours) <https://capeye.fr/wp-content/uploads/Cours/Cours-commerce-OMC-PAC.pdf>

⁵¹ <https://agriculture.gouv.fr/la-nouvelle-pac-2023-2027>
<https://agriculture.gouv.fr/pac-2023-2027-le-plan-strategique-national>

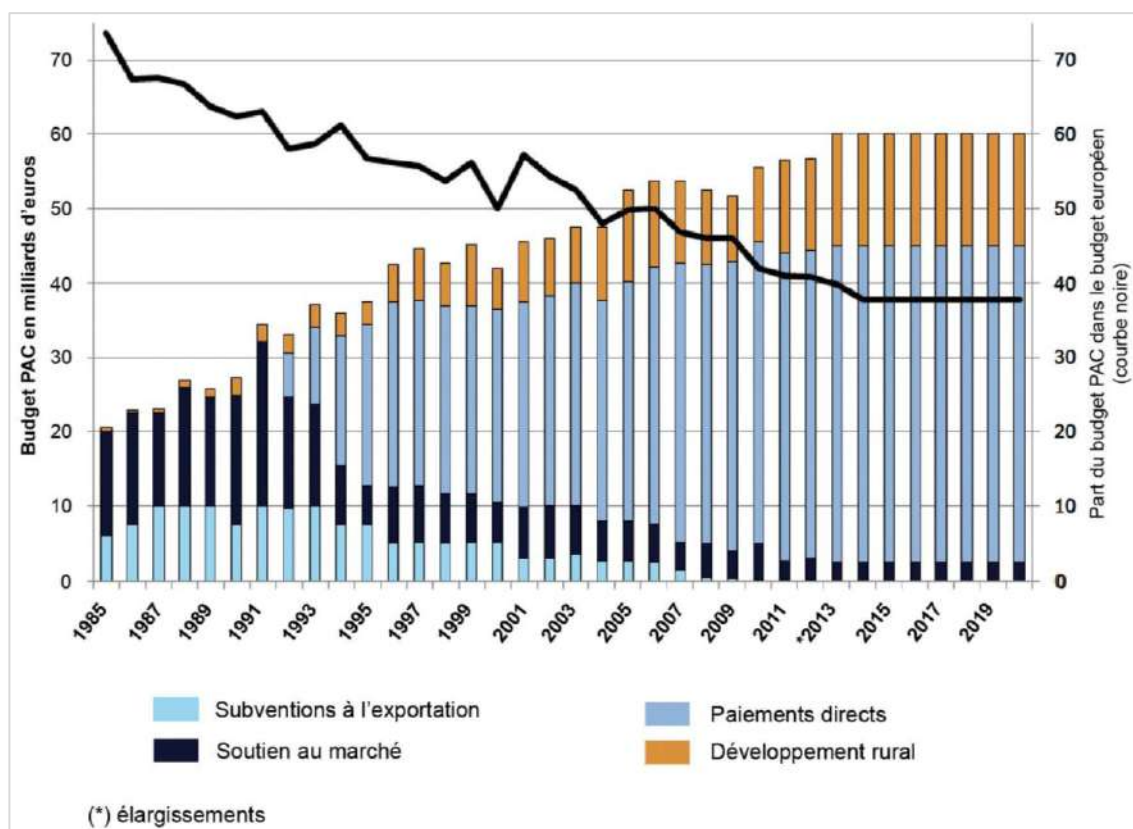


Figure 16 : Évolution de la répartition du budget européen de la PAC de 1985 à 2020. On y observe le passage de la politique de structuration du marché à l'export vers des paiements directs et des aides au développement rural.

Source : <https://capeye.fr/histoire-de-la-pac/>

b. Des instruments de soutien économique et d'action environnementale

La PAC actuelle s'appuie sur un mécanisme de soutien économique des agriculteurs via les paiements directs : ces derniers, proportionnels aux surfaces (droits à paiement de base, DPB) ou aux productions (aides couplées pour certaines productions spécifiques) doivent **permettre aux agriculteurs de s'aligner sur les prix des marchés mondiaux, en compensant des coûts de production supérieurs au reste du monde** (ex : droit du travail, coût de la main d'œuvre, niveau de vie, exigences en matière environnementale et de bien-être animal, etc.). Ce soutien est également associé à un Fonds pour le développement rural, qui bénéficie également aux agriculteurs via des aides directes (indemnité compensatoire de handicap naturel - ICHN) et indirectes (aides à l'investissement, à l'animation du territoire, etc.).

La PAC prévoit également des mesures de régulation des marchés en cas de crise. En période de déséquilibres graves sur les marchés, ou de crises diverses, le règlement prévoit ainsi la capacité d'intervenir pour éviter une baisse soudaine des prix ou en atténuer les conséquences.

La capacité d'action environnementale de la PAC repose sur trois volets :

- **La conditionnalité des aides** s'appuie sur la mise en œuvre des directives européennes pour proposer un socle commun environnemental minimum à tous les agriculteurs. Si ces obligations minimales ne sont pas respectées, les agriculteurs sont susceptibles de se voir supprimer une partie de leurs aides PAC.
- **Le verdissement des pratiques agricoles, ou éco-régime**, est présenté comme un paiement supplémentaire, auquel tous les agriculteurs qui répondent à des exigences supérieures, sur la base de plusieurs critères substituables les uns aux autres, dont les orientations des exploitations (prairies permanentes pour les éleveurs, diversité des assolements en grandes cultures, etc.), ou encore des certifications (AB, HVE, etc.).

- Enfin, des mesures contractuelles répondant à des contextes et à des enjeux spécifiques peuvent être mises en œuvre : **les Mesures Agroenvironnementales et Climatiques (MAEC)**. Ces dernières permettent de cibler des enjeux ou des pratiques particulières (protection ou reconquête d'habitats ou d'espèces, protection de l'eau, transition à l'échelle de l'exploitation, etc.).

c. Un défi à affronter : assurer la prospérité des agriculteurs dans un contexte de marchés mondialisés

Malgré le caractère essentiel de la production agricole et alimentaire, et malgré les soutiens compensatoires des paiements européens, les revenus de la plupart des agriculteurs sont aujourd'hui très irréguliers, souvent insuffisants, limitant les capacités de transformation et la prise de décision dans les choix stratégiques à opérer. La poursuite simultanée de plusieurs objectifs contradictoires via les politiques publiques agricoles conduit en effet à mettre les agriculteurs au cœur d'injonctions paradoxales.

- D'un côté, **la logique de libre circulation** des biens et des marchandises, au sein de l'Union européenne et avec les pays tiers dans le cadre de traités de libre-échange, pousse les agriculteurs dans un mécanisme de compétitivité : ils doivent pouvoir aligner leurs coûts de production sur ceux des autres pays, dans un marché de commodités.
- De l'autre côté, **les exigences sociales, fiscales et environnementales** nationales font peser des contraintes sur les moyens de production, qui ne s'imposent pas aux autres pays avec lesquels ils sont mis en concurrence, y compris au sein de l'Union européenne. Ainsi, outre un cadre social et normatif général (salaire minimum, droit du travail, cotisations sociales, taxes sur le foncier⁵², etc.) variable d'un État à l'autre, le droit environnemental (autorisation de substances phytosanitaires, taux de surfaces d'intérêt écologique, etc.) est également dépendant des mises en œuvre réglementaires nationales.
- **L'absence d'obligation d'indication de la provenance pour certains produits**, ou le non-respect de cette obligation, ne permettent pas aux consommateurs d'être suffisamment informés.

Des attentes fortes de la part des agriculteurs sur des freins principalement économiques⁵³

Lorsqu'on les interroge sur les principaux freins qui les empêchent d'adopter de nouvelles pratiques agricoles durables, 81 % des agriculteurs évoquent un frein financier, comme certains le déplorent : « *Étouffé par les dettes, je travaille pour rembourser, et donc difficile d'être innovant et de prendre des risques* ».

Cette situation économique est très mal vécue par les agriculteurs : 88 % réclament d'être protégés contre les effets de la concurrence internationale, 48 % attribuant une note de pertinence à cette mesure de 10/10 ; c'est la mesure de politique publique la plus attendue parmi celles qui sont proposées. Et au-delà des impacts économiques, cette situation fait naître un profond sentiment d'injustice, « *de concurrence déloyale* » et d'incompréhension : « *on marche sur la tête* », « *Qu'on arrête d'importer des produits qu'on n'a pas le droit de produire chez nous* ».

Les politiques nationales pour l'agriculture sont également très contraintes sous l'angle économique, notamment par la notion d'aide d'État. Le Traité sur le Fonctionnement de l'Union européenne (TFUE) dispose en effet que « sont incompatibles avec le marché intérieur, dans la mesure où elles affectent les échanges entre États membres, les aides accordées par les États ou au moyen de ressources d'État sous quelque forme que ce soit qui faussent ou menacent de fausser la concurrence en favorisant certaines entreprises ou certaines productions. »⁵⁴.

L'importance des soutiens publics au secteur agricole n'est par ailleurs plus toujours comprise ni acceptée par le reste de la société qui, en s'éloignant géographiquement et professionnellement du monde

⁵² <https://www.fondationbiodiversite.fr/la-taxation-des-terres-agricoles-en-europe-approche-comparative/>

⁵³ Résultats de la Grande Consultation des Agriculteurs 2024, <https://theshiftproject.org/article/resultats-grande-consultation-des-agriculteurs/>

⁵⁴ https://www.economie.gouv.fr/files/files/directions_services/daj/publications/Vade-mecum-aides-Etat-2020/Fiche-1.pdf

agricole, en a oublié l'histoire technique, sociale et économique et n'en comprend plus les exigences comme les difficultés. Cette méconnaissance couplée aux attentes contradictoires des consommateurs exacerbe les tensions entre agriculteurs et société. Outre ces questions d'image et de manque de reconnaissance, les acteurs agricoles déplorent la lourdeur excessive et les freins liés aux contraintes administratives (46 % des agriculteurs citent les lourdeurs administratives comme frein à l'adoption de nouvelles pratiques agricoles durables dans la GCA) et à des réglementations qui ne tiennent pas toujours compte des spécificités et aléas du métier (exemple des dates d'autorisation/interdiction fixes ne tenant pas compte du climat de l'année). Le 3STR, Système de Suivi des Surfaces en Temps Réel, introduit par l'Europe pour la PAC 2023-2027 et surveillant l'évolution des parcelles par satellite, renforce encore le sentiment de contrôle.

B. Une rentabilité économique aléatoire et très hétérogène, malgré les soutiens publics

C'est l'un des objectifs explicites de la PAC : « assurer un niveau de vie équitable à la population agricole, notamment par le relèvement du revenu individuel de ceux qui travaillent dans l'agriculture » (article 39 du TFUE). Or **il existe une très forte hétérogénéité des revenus agricoles** selon les orientations technico-économiques des exploitations, leur taille et les circuits de commercialisation utilisés, cette variabilité s'observant également entre fermes d'une même catégorie et selon les marchés dont la volatilité complexifie la commercialisation des productions.

Il est d'ailleurs devenu plus difficile de définir les contours du revenu agricole : la forme traditionnelle de l'exploitation familiale où travaillent les deux conjoints est de plus en plus remplacée par des formes sociétaires, les activités agricoles se diversifient vers de nouvelles sources de revenus (production d'énergie renouvelable, transformation, etc.), la double activité se maintient, la multiplicité des statuts possibles interrogeant la notion même d'agriculteur actif.

En croisant différents indicateurs et sources statistiques, le CGAAER⁵⁵ donne une lecture du revenu agricole moyen à partir du ratio Excédent Brut d'Exploitation par Unité de Travail Annuel, pour les non-salariés agricoles (exploitants et coexploitants) : « *En 2020, en moyenne, l'EBE/UTANS s'est élevé à 52 120 euros. Il a permis de rembourser des emprunts à hauteur de 20 480 euros, de payer 8 160 euros de cotisations sociales des actifs non-salariés, 2 130 euros de charges financières et de dégager un revenu disponible de 21 350 euros* ». À noter que ce revenu disponible n'est pas équivalent à un revenu, étant régulièrement utilisé pour l'auto-financement.

L'augmentation moyenne de ce revenu par actif non salarié masque une volatilité croissante depuis 2005 et la baisse de plus de 20 % du résultat brut de la branche agricole en euros constants, malgré la hausse des volumes produits.

⁵⁵ <https://agriculture.gouv.fr/evolution-du-revenu-agricole-en-france-depuis-30-ans-facteurs-devolution-dici-2030-et-lecons-en>

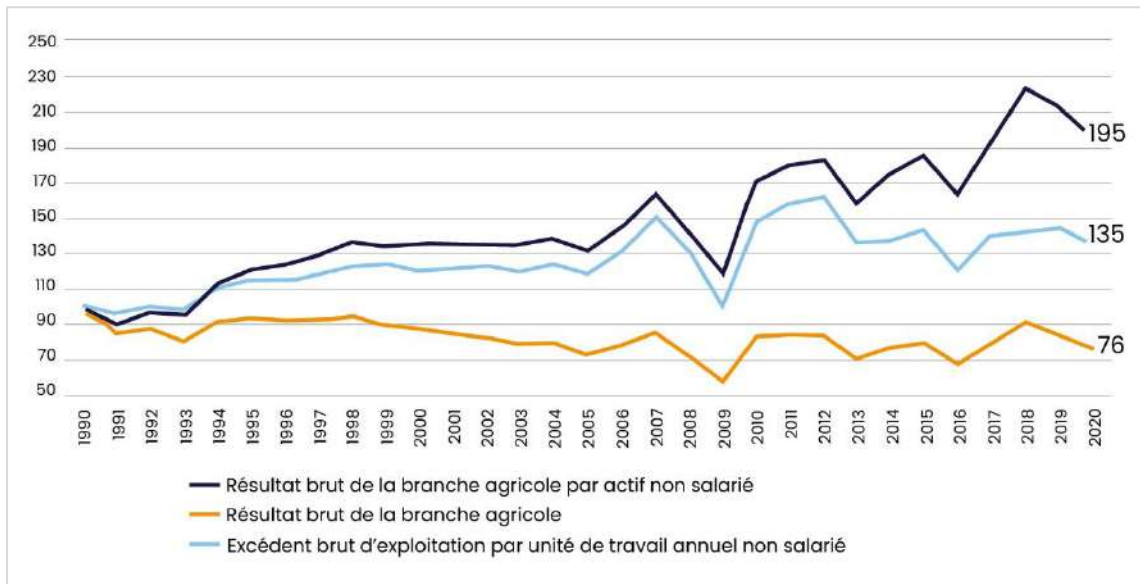


Figure 17 : Résultat brut au total ou par actif non-salarié et EBE par UTANS en termes réels – base 100 1990

Source : CGAER

Ces chiffres moyens cachent de grandes disparités entre les orientations des exploitations, en termes de revenu comme en intensité capitaliste, de plus en plus élevée. Les élevages porcins sont particulièrement affectés par la volatilité des cours, mais les revenus y sont sur le long terme au-dessus de la moyenne, comme ceux des cultures industrielles et de la viticulture, en moyenne. Les élevages de volailles, les systèmes mixtes culture-élevage, les céréales et le secteur maraîchage - horticulture voient leurs résultats osciller autour de la moyenne générale. Les élevages d'herbivores et le secteur de l'arboriculture se situent presque toujours, ou toujours, en-dessous de la moyenne des revenus.

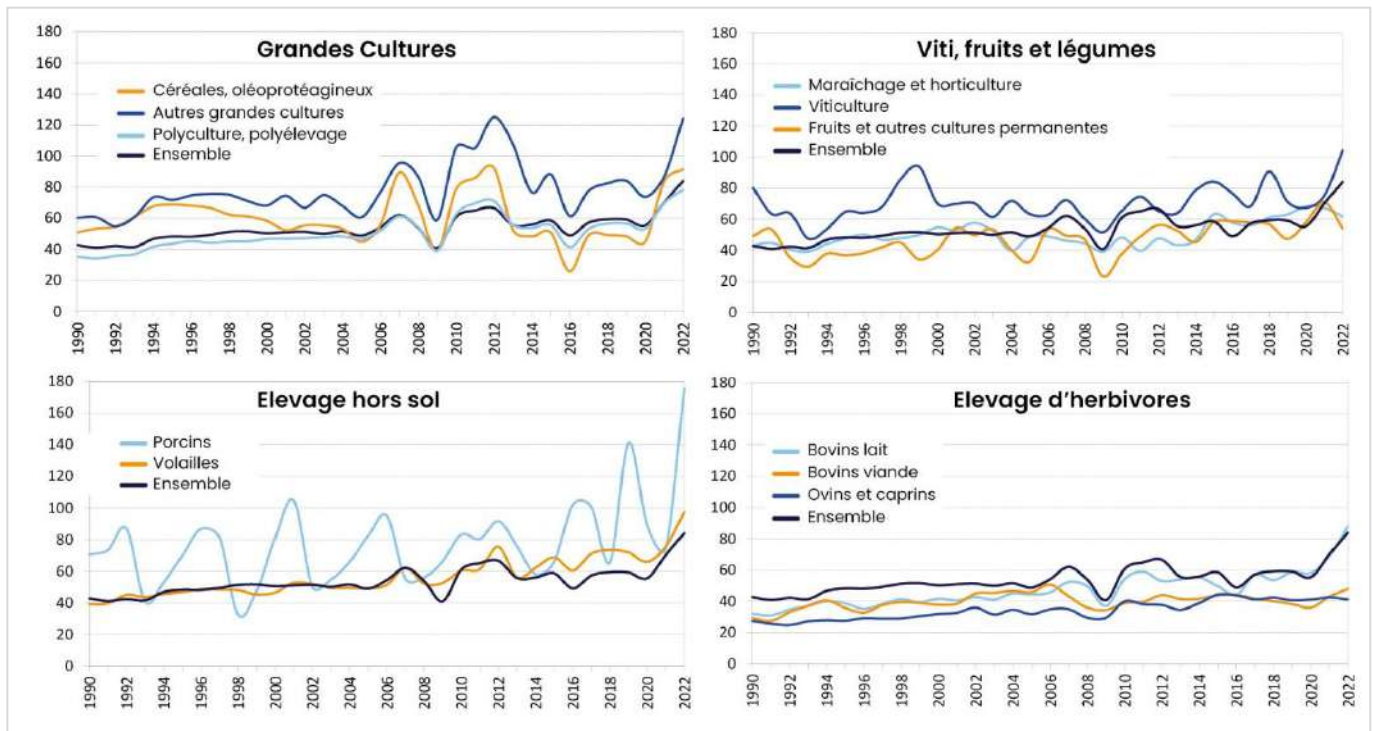


Figure 18 : Évolution de l'excédent brut d'exploitation (EBE) par ETP non salarié (UTANS), en millier d'euros – 1988-2020

Source : CGAER

Ces disparités se retrouvent dans les derniers résultats économiques disponibles, ceux de l'année 2022, qui affichent par ailleurs une forte progression⁵⁶. Celle-ci s'explique essentiellement par la hausse globale des prix agricoles durant l'exercice, dans le contexte de la guerre en Ukraine, et malgré la hausse des charges. Néanmoins les filières fruitières, horticoles et les élevages ovins et caprins voient leurs résultats baisser sur cette période.

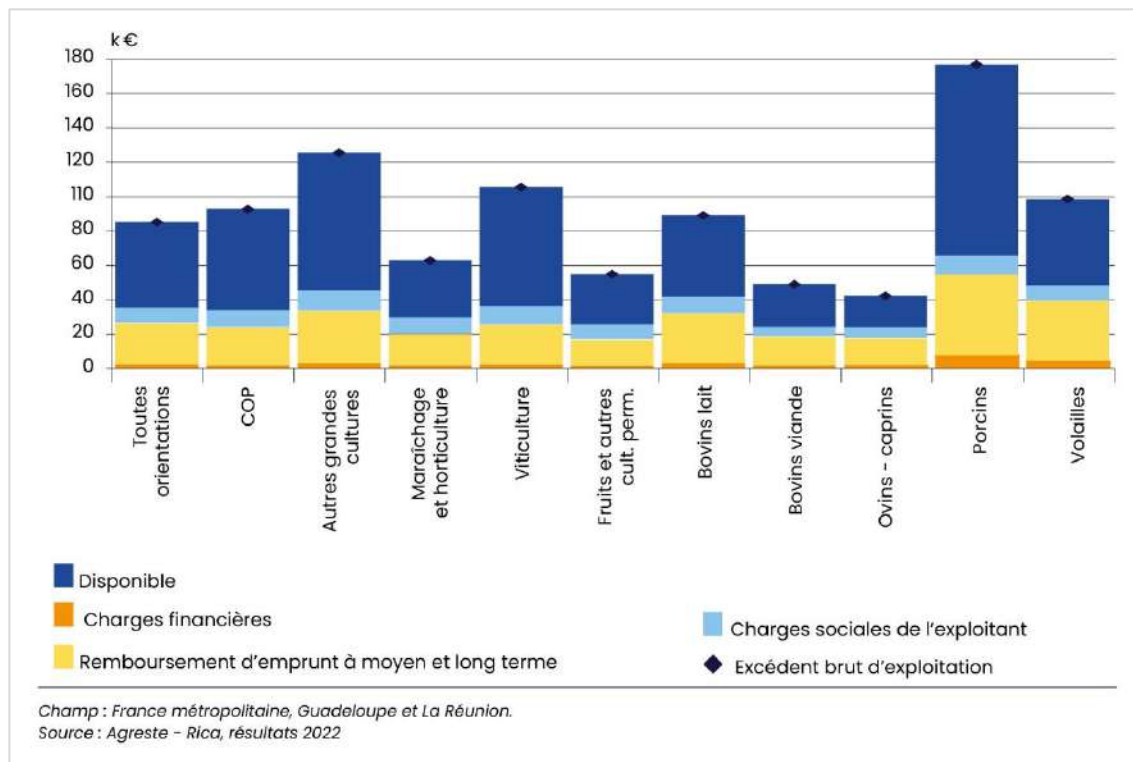


Figure 19 : Solde disponible par exploitant en 2022 par OTEX

Source : Agreste - Rica, résultats 2022

De façon globale, les subventions diminuent depuis le début des années 2000, mais **les soutiens publics restent, avec les marchés et les prix des intrants, un déterminant essentiel de la viabilité économique des exploitations**. Malgré tout, les gains de productivité et les aides publiques ne garantissent pas pour autant le maintien des résultats économiques, et n'ont ainsi par exemple pas bénéficié aux éleveurs bovins durant la période 1990-2020, ces gains de productivité ayant essentiellement bénéficié à l'aval⁵⁷.

On observe par ailleurs une hausse des dépenses publiques d'indemnités et de gestion des crises agricoles⁵⁸, s'expliquant par l'intensité croissante des aléas et le montant croissant des pertes économiques occasionnées, les agriculteurs n'étant plus à même économiquement de faire face seuls aux mauvaises années. Or ces crises se multiplient, qu'elles soient climatiques, sanitaires, ou liées au contexte géopolitique (voir II.) : les indemnités versées par les pouvoirs publics ont atteint des records en 2021 et 2022, dans le contexte de la crise sanitaire et de la guerre en Ukraine, provenant très majoritairement du budget du Ministère de l'Agriculture, pour lequel elles ont représenté 40 % du budget prévisionnel (2022). Ces indemnités croissantes questionnent d'une part l'équilibre des ressources publiques face à la multiplication des aléas, d'autre part les conséquences portées au financement d'autres actions essentielles à la transition écologique dans le cadre d'un budget contraint. Rien que pour les conséquences de la sécheresse, si toutes les fermes de l'hexagone étaient assurées, le niveau de 2,6 milliards d'euros de dommages serait désormais dépassé tous les dix ans en moyenne⁵⁹.

⁵⁶ https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/Pri2314/Primeur2023-14_Rica2022.pdf

⁵⁷ <https://agriculture.gouv.fr/evolution-du-revenu-agricole-en-france-depuis-30-ans-facteurs-devolution-dici-2030-et-lecons-en>

⁵⁸ https://www.i4ce.org/wp-content/uploads/2024/02/Estimation-des-depenses-publiques-liees-aux-crisis-agricoles-en-France-entre-2013-et-2022_V1.pdf

⁵⁹ Haut Conseil pour le Climat, 2024. Accélérer la transition climatique avec un système alimentaire bas carbone, résilient et juste

C. Une érosion des prix et de la valeur ajoutée dans le secteur agricole ayant conduit à la simplification des agroécosystèmes

Affichant une très forte hausse de la productivité physique du travail depuis les années 1960, à hauteur de 5 % en moyenne par an⁶⁰, le secteur agricole a vu ces gains se traduire par une baisse marquée du prix des produits agricoles⁶¹, en monnaie constante, la demande progressant moins vite que la production. À cela se sont ajoutées la forte concurrence exercée par les autres puissances agricoles, dont la productivité a connu une évolution comparable, voire plus rapide, que celle de la France sur la période (1960-2022), une hausse concomitante du coût des intrants et des équipements, ainsi qu'une stagnation des rendements sur les principales cultures de rente (blé, maïs...) constatée depuis une trentaine d'années⁶². Toutes ces dynamiques ont concouru à une diminution constante des prix agricoles depuis les années 1970, en monnaie constante, avant l'amorce d'une stagnation de 2005 à 2020 (suivie d'une hausse en 2022 dans le contexte de la guerre en Ukraine).

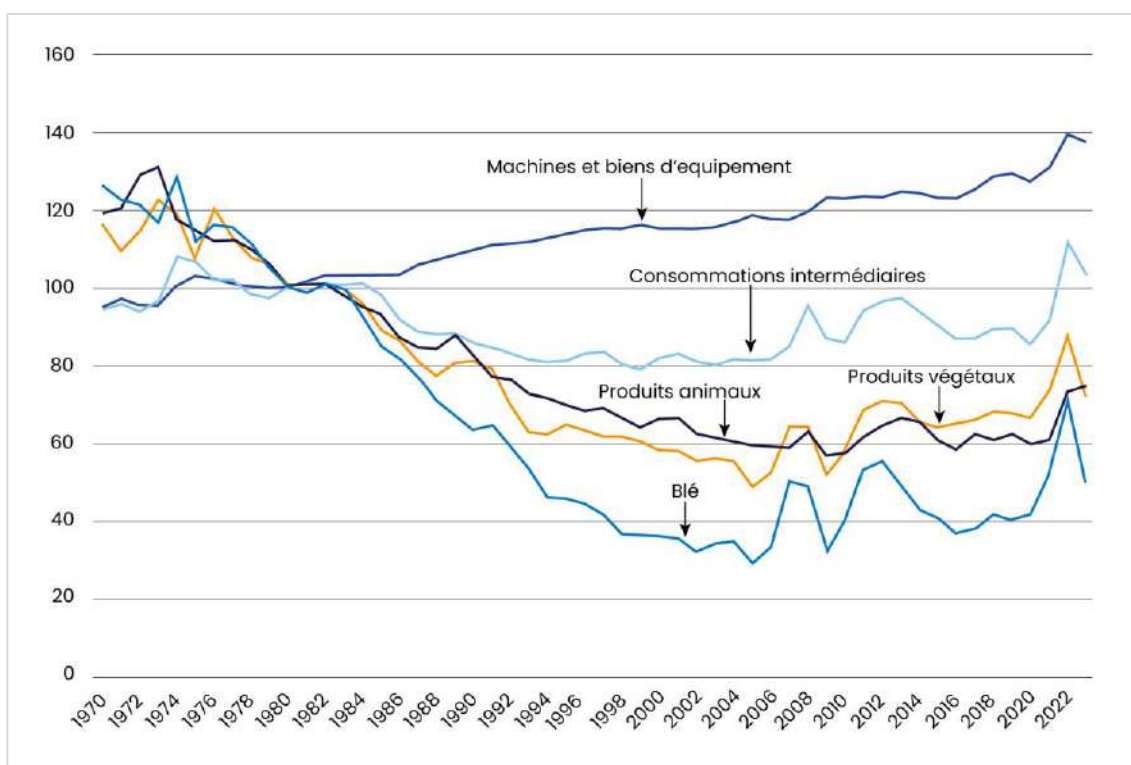


Figure 20 : Évolution des prix en monnaie constante en base 100 depuis 1970

Source : S. Devienne⁶³, à partir d'INSEE (Comptes de la Nation)

Ce ciseau des prix a également eu pour conséquence une diminution de la valeur ajoutée et du revenu des agriculteurs en monnaie constante depuis les années 1970⁶⁴. L'évolution comparée des prix face aux différentes composantes de l'activité agricole (intrants, équipements, coûts de l'énergie...) s'est révélée particulièrement préjudiciable aux performances économiques de la branche agricole dans son ensemble, en particulier du fait du poids croissant des consommations intermédiaires (intrants et énergie) et de la consommation annuelle de capital fixe dans la production agricole : les consommations intermédiaires sont passées de 40 % du produit brut dans les années 1960 à plus de 60 % aujourd'hui, tandis que les

⁶⁰ Accroissement le plus élevé sur la période tout secteur confondu

⁶¹ Cochet H., 2018, Le modèle de l'agriculture familiale* en France : les mutations récentes du foncier et des agricultures en Europe, Presses universitaires de Franche-Comté.

⁶² Charroin T., 2012, Productivité du travail et économie en élevages d'herbivores: définition des concepts, analyse et enjeux. INRA Productions Animales, 25 (2), pp.193-210.

⁶³ Devienne S., Webinaire Shift Project : Vers une agriculture bas carbone, résiliente et prospère, 6 juin 2024

⁶⁴ Devienne S., 2018, Les révolutions agricoles contemporaines en France : Les mutations récentes du foncier et des agricultures en Europe, Presses universitaires de Franche-Comté.

consommations de capital fixe ont crû de manière constante pour s'établir désormais à un peu plus de 15 % du produit brut, les prix du machinisme et autres biens d'équipement n'ayant cessé de croître. Ces dynamiques conjointes ont fait pression sur la valeur ajoutée nette de l'agriculture, qui représente actuellement environ 25 % de la valeur de la production agricole contre 55 % au début des années 1960. Quant au revenu agricole par actif, il ne se maintient qu'à la faveur des subventions et d'une diminution constante de la population active.

Ainsi, en dépit d'une progression remarquable de la productivité physique dans le secteur agricole, la valeur ajoutée de l'agriculture française a observé dans le même temps une réelle baisse (Figure 21 ci-dessous). Cette dynamique devrait amener à remettre en cause l'efficacité du modèle économique actuel, ainsi que la justesse de la répartition de la valeur au sein de l'écosystème agricole⁶⁵.

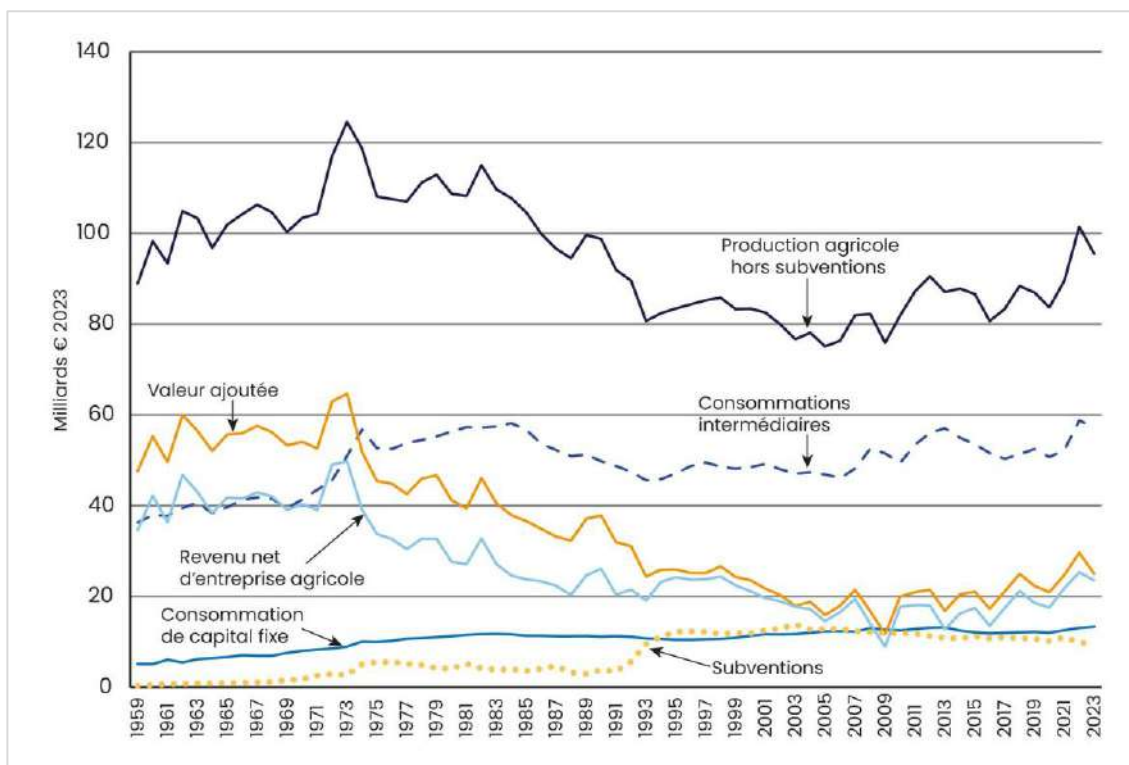


Figure 21 : Évolution en monnaie constante de la valeur ajoutée et du revenu de la branche agricole.

Source : S. Devienne, à partir d'INSEE (Comptes de la Nation)

Ces dynamiques baissières sur les prix agricoles et la valeur ajoutée ont eu pour conséquences une amplification des inégalités entre les agriculteurs et une baisse du nombre d'exploitations et de l'emploi agricole, et se sont accompagnées d'une simplification des agroécosystèmes⁶⁶. En effet, afin de maintenir leur revenu, les agriculteurs dotés d'une capacité d'investissement suffisante ont entrepris d'accroître leurs surfaces ou de développer des productions à plus forte valeur ajoutée par hectare. Si ces démarches ont pu permettre d'améliorer leurs marges nettes, elles se sont également révélées particulièrement gourmandes en intrants et ont contribué à une simplification des systèmes de production agricoles et in fine des agroécosystèmes (érosion génétique, déclin de la biodiversité animale et végétale, réduction du taux d'humus et de la vie biologique des sols...). À l'inverse, les agriculteurs n'ayant pas les moyens de réaliser ces investissements ont vu leur revenu diminuer et, sans successeur au moment de leur retraite, ont vu leurs terres reprises pour l'agrandissement d'autres exploitations.

Dans les systèmes de production où l'activité est en baisse tendancielle, émerge également aujourd'hui la question du devenir des outils de production en place qui risquent de perdre de la valeur : les « actifs à risque ».

⁶⁵ Ibid.

⁶⁶ Devienne S., 2018, Les révolutions agricoles contemporaines en France : Les mutations récentes du foncier et des agricultures en Europe, Presses universitaires de Franche-Comté.

Dans les fermes d'élevage, ce sont tout particulièrement les bâtiments qui sont concernés⁶⁷, pour des montants importants qui imposent de bien calibrer et conditionner les soutiens au secteur à des objectifs de durabilité, au risque d'augmenter le stock d'actifs échoués.

D. Vers un cadre plus satisfaisant au regard des enjeux socio-économiques et environnementaux ?

Alors que les prix garantis des premières décennies de la PAC mettaient les producteurs à l'abri des fluctuations du marché, les subventions aujourd'hui directement allouées aux exploitations ne permettent plus, par construction, d'y faire face. Les modalités de répartition de la valeur tout au long de la filière agroalimentaire ne permettent pas d'affronter les variations des coûts de production, malgré les lois EGAlim⁶⁸ censées renforcer la rémunération des producteurs. Issues des États Généraux de l'Alimentation de 2017, ces lois visent à améliorer l'équilibre des relations commerciales dans le secteur, en renforçant la transparence du prix de la matière première agricole et en consacrant le caractère non négociable.

La part de la valeur de la production agricole française représente en effet moins de 15 % du coût de l'alimentation. En 2019, pour 100 euros dépensés en France pour l'alimentation, 10,5 € ont servi à payer des taxes, 10,5 € des produits alimentaires importés, 12,8 € correspondent à la valeur de la production agricole incluse et 66,2 € à la valeur créée en aval de l'agriculture. Pire, en valeur ajoutée induite, pour 100 euros dépensés en France pour l'alimentation, seuls 6,4 € correspondent à la valeur ajoutée induite en production agricole nationale (après analyse des consommations intermédiaires, nationales et importées, pour chaque branche impliquée dans la chaîne alimentaire : agriculture, industries, restauration, services et commerce)⁶⁹.

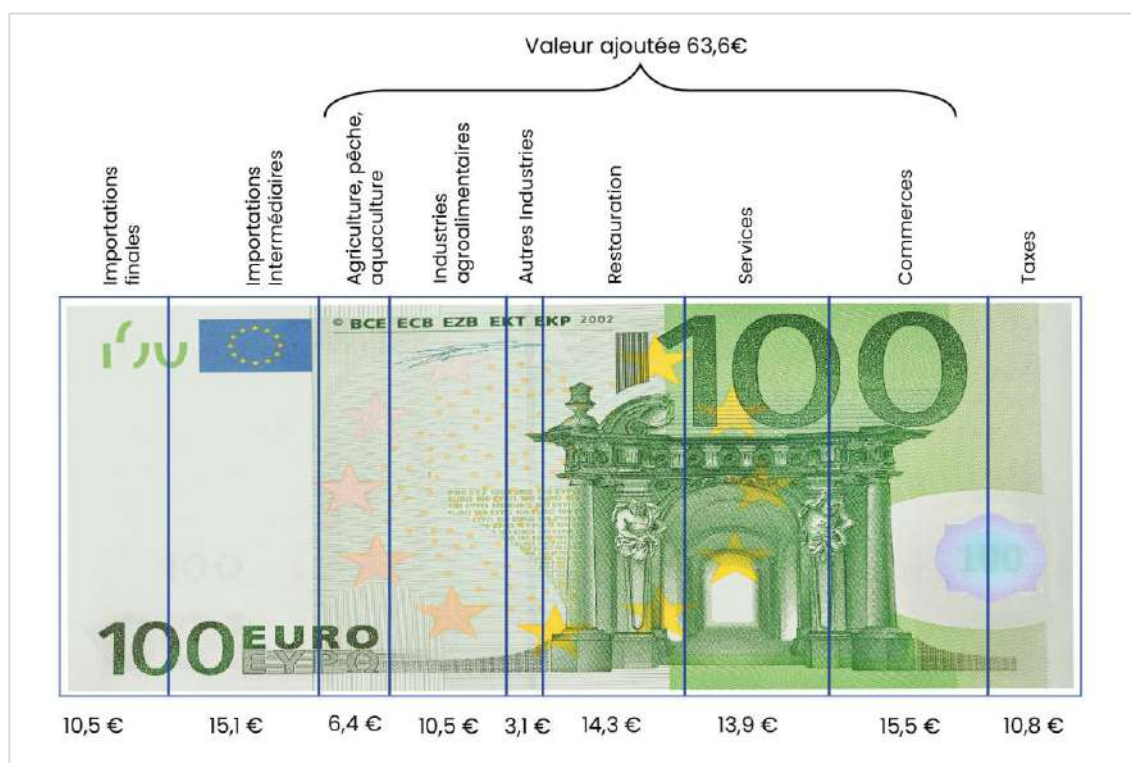


Figure 22 : L'euro alimentaire en 2019 décomposé en valeurs ajoutées induites par branche de l'économie nationale, importations d'intrants, importations alimentaires et taxes

Source : OFPM, d'après INSEE, Eurostat

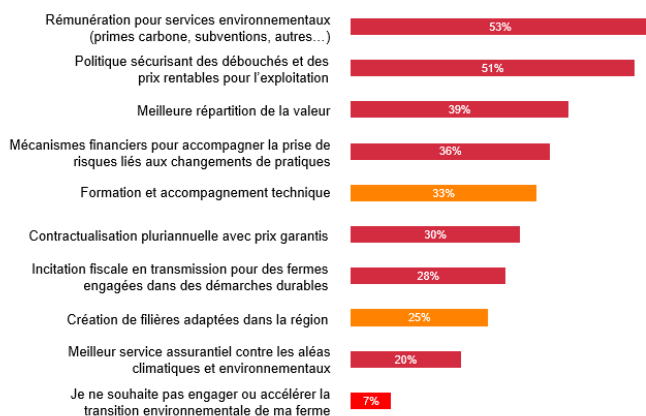
⁶⁷ <https://www.i4ce.org/publication/transition-elevage-gerer-investissements-passes-et-repenser-ceux-venir-climat/>

⁶⁸ <https://agriculture.gouv.fr/egalim-2>

⁶⁹ https://observatoire-prixmarges.franceagrimer.fr/sites/default/files/PDF/rapport_complet_ofpm_2024_internet_v11_0.pdf

Les entretiens menés lors de la GCA⁷⁰ confirment cette analyse et mettent en évidence l'importance de lever le « verrou financier » de la transition ; ainsi, 87 % des agriculteurs posent une condition financière pour s'engager ou accélérer leur transition, comme illustré par l'un d'entre eux : « 80 % du pas en avant fait par les agriculteurs sera par une incitation financière. J'ai des convictions mais elles ne me feraient pas vivre. ».

Sous quelles conditions accepteriez-vous d'engager ou d'accélérer la transition environnementale de votre ferme ? Plusieurs réponses possibles.



→ **87%** des agriculteurs posent une condition financière pour s'engager ou accélérer leur transition

→ **7%** seulement déclarent ne pas vouloir s'engager dans la transition

■ Verrou financier

a. Vers une nouvelle approche de la PAC renforçant la position des agriculteurs ?

Toutes les difficultés économiques du secteur combinées au cumul d'aléas climatiques particulièrement éprouvants ces dernières années, ainsi qu'à une charge bureaucratique de plus en plus pesante, ont conduit à des manifestations agricoles d'ampleur au cours de l'hiver 2023/2024, en France comme dans toute l'Europe. À titre illustratif, 87 % des agriculteurs déclarent avoir l'impression d'être mal représentés dans le débat public (source GCA). En réponse, le Dialogue stratégique sur l'avenir de l'agriculture européenne lancé début 2024 par la présidente de la Commission européenne s'était donné pour objectif d'« écouter les préoccupations de l'ensemble de la chaîne agroalimentaire » et de « forger une vision commune » de l'avenir du secteur. Publiées en septembre 2024, les conclusions de ces échanges⁷¹ entre une trentaine d'organisations représentant les acteurs de la chaîne de valeur agroalimentaire (syndicats agricoles, fournisseurs d'intrants, distributeurs, associations environnementales, etc.) semblent faire consensus et préfigurent d'évolutions substantielles de la PAC avec la prochaine réforme.

Est ainsi mise en exergue la nécessité de **renforcer la position des agriculteurs dans la chaîne de valeur alimentaire et de déployer une nouvelle approche pour atteindre les objectifs de durabilité des pratiques, en adaptant les soutiens de la PAC aux agriculteurs « qui en ont le plus besoin »**. L'idée d'un Fonds public-privé temporaire pour le financement de la transition en dehors de la PAC est avancée. Une plus grande cohérence entre politique agricole et politique commerciale de l'UE est réclamée, avec une nouvelle approche des négociations de traités de libre-échange. Pour consolider une nouvelle culture « de coopération, de confiance et de participation multipartite parmi les acteurs et au sein des institutions », la Commission européenne est encouragée à créer un Comité Européen de l'Agroalimentaire.

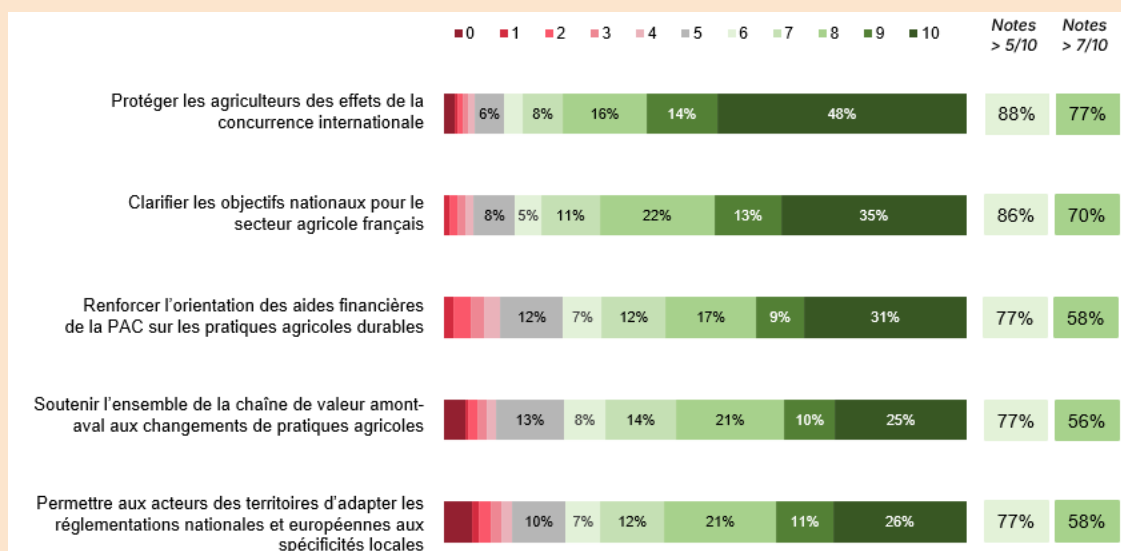
⁷⁰ Résultats de la Grande Consultation des Agriculteurs 2024, <https://theshiftproject.org/article/resultats-grande-consultation-des-agriculteurs/>

⁷¹ https://agriculture.ec.europa.eu/document/download/c9fdbb7b-10c9-405f-9be8-427ef6ad7614_fr?filename=strategic-dialogue-report-executive-summary-2024_fr.pdf

b. Et des objectifs de durabilité plus ambitieux ?

Les conclusions du Dialogue Stratégique mettent l'accent également sur la nécessité de soutenir des pratiques agricoles plus durables, de réduire les émissions de GES du secteur, de mieux préserver et gérer les terres agricoles avec l'adoption d'un objectif européen « zéro artificialisation nette » en 2050, et sur la promotion d'une agriculture résiliente « aux problèmes liés à l'eau » et moins intensive en ressources.

De telles conclusions concordent avec le souhait d'une large majorité d'agriculteurs, 77 % des répondants de la Grande Consultation des Agriculteurs⁷² étant favorables à « Renforcer l'orientation des aides financières de la PAC sur les pratiques agricoles durables » (note d'agrément de 6 à 10/10)



En matière de transition écologique, la Cour des Comptes européenne a de même récemment jugé que les PSN des différents pays audités, dont la France, ne témoignaient pas d'une hausse suffisante des ambitions⁷³, considérant que le système des écorégimes n'y avait pas entraîné de modification significative des pratiques existantes. Elle encourage le déploiement de pratiques agricoles durables à plus grande échelle, insistant sur l'adaptation des systèmes aux modifications attendues du cycle de l'eau. Elle insiste par ailleurs sur la planification territoriale en matière d'usage des sols et recommande la création d'un Observatoire européen des terres agricoles.

Dans un contexte de compétition internationale accrue, y compris au sein de l'Union européenne, et de hausse des aléas climatiques et énergétiques, le cadre politique actuel, le mode de construction du prix des productions agricoles et la hausse de la volatilité des marchés ne garantissent plus durablement, malgré des soutiens financiers européens et nationaux conséquents, la rentabilité des systèmes de production agricole français. Le bien-être économique et professionnel des agriculteurs s'en trouve considérablement questionné, la raison d'être du métier et le sentiment satisfaisant d'exercer une activité d'utilité publique disparaissant face à la multiplicité des difficultés et des défis à affronter. La dépendance du revenu aux aides publiques, si elle est nécessaire, ne satisfait pas les producteurs qui préféreraient des prix rémunérateurs et l'amélioration de la part de valeur ajoutée qui leur revient. Ces sujets soulèvent la question cruciale de l'attractivité économique et sociale du secteur dans la perspective du départ en retraite de la moitié des agriculteurs durant la prochaine décennie (voir partie I.1.B.). Nous invitons ici le lecteur à prendre connaissance du rapport « Quels actifs avec quelles compétences pour une agriculture bas carbone, résiliente et prospère en 2050 ? » paru conjointement au présent travail.

⁷² Résultats de la Grande Consultation des Agriculteurs 2024, <https://theshiftproject.org/article/resultats-grande-consultation-des-agriculteurs/>

⁷³ https://www.eca.europa.eu/ECAPublications/SR-2024-20/SR-2024-20_FR.pdf

3. Les usages de la biomasse agricole : connexions entre filières, débouchés croissants et arbitrages incontournables

La biomasse agricole produite sur les sols français est valorisée principalement pour l'alimentation, humaine et animale, mais aussi pour d'autres débouchés, énergétiques, textiles ou d'autres produits biosourcés (biomatériaux, chimie du végétal, cosmétiques, etc.) en fort développement.

Du fait de la variabilité des conditions climatiques, ce gisement de biomasse peut varier de façon significative selon les années. Les flux de biomasse agricole conservent donc une certaine souplesse et sont chaque année corrélés aux surfaces ensemencées (les choix d'assolement devenant de plus en plus opportunistes), aux rendements, à la qualité des productions au moment de la récolte, à son évolution lors du stockage, ou encore aux prix de commercialisation de la campagne en cours : le débouché d'une production est en effet adapté après récolte selon ses caractéristiques et la demande des marchés⁷⁴.

A. Des flux de biomasse agricole massifs et complexes

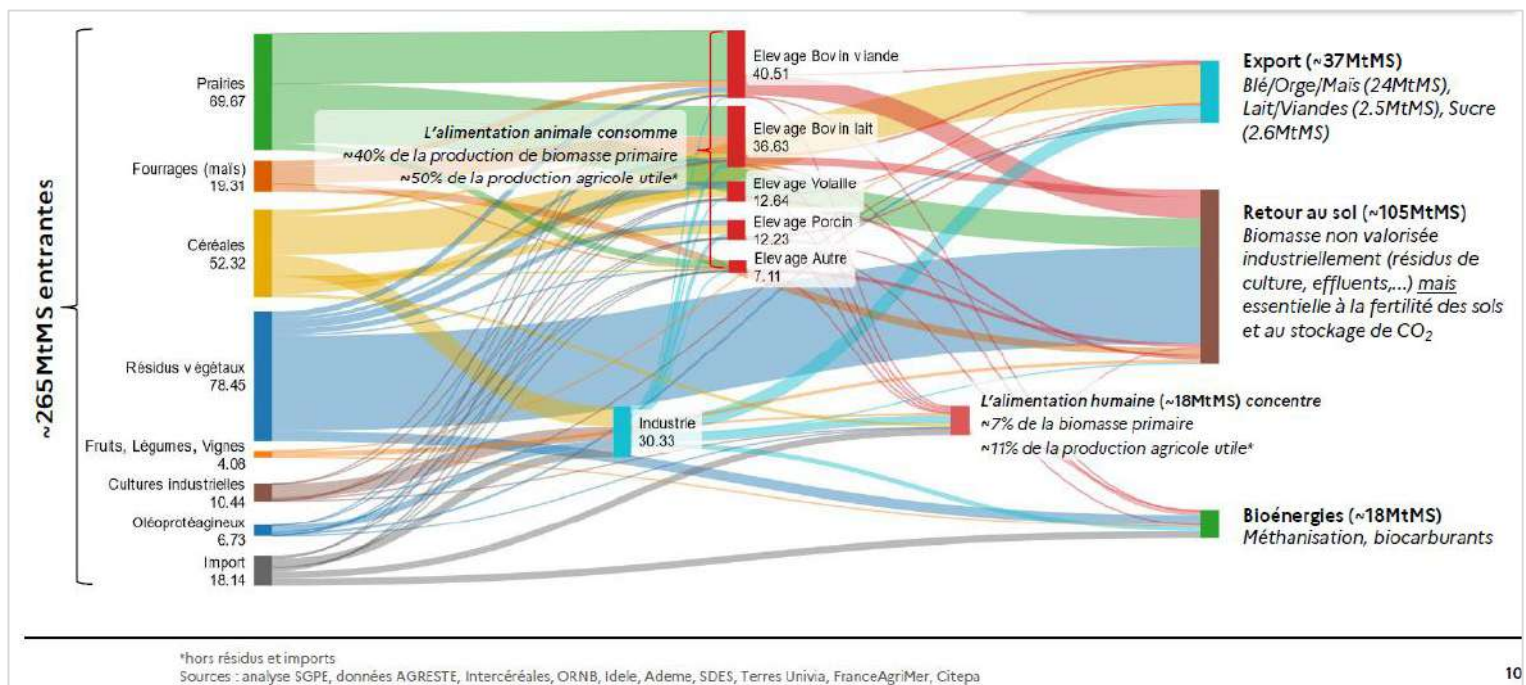


Figure 23 : Biomasse agricole : Cartographie des flux actuels de biomasse (en MtMS)

Source : SGPE, Bouclage biomasse : enjeux et orientations - Juillet 2024

La production totale de biomasse agricole sur le territoire est évaluée à environ 245 Millions de tonnes de Matière Sèche⁷⁵ (MtMS) par an⁷⁶, auxquelles s'ajoutent environ 20 MtMS de biomasse importée (en comparaison, la biomasse annuelle issue des forêts est estimée à 70 MtMS).

- Une part essentielle de la biomasse agricole (105 MtMS, soit environ 40 %) est restituée au sol, directement par les résidus de cultures ou via les effluents d'élevage, contribuant au maintien de la fertilité des sols, et potentiellement au stockage de carbone lorsque les apports sont supérieurs aux pertes par minéralisation.

⁷⁴ Pour en savoir plus, la complexité des flux et les connexions entre les différentes filières sont observables dans des diagrammes de Sankey élaborés lors du projet AF Filières mené par le GIS Avenir Élevage : <https://www.flux-biomasse.fr/>, pour l'année 2015

⁷⁵ Déduction faite de l'eau contenue dans les productions

⁷⁶ SGPE, Bouclage Biomasse : enjeux et orientations, Juillet 2024

- **18 MtMS (7 %) des tonnages annuels de biomasse primaire sont utilisés pour l'alimentation humaine** (directement ou via l'alimentation animale).
- **18 MtMS (7 %) des tonnages annuels ont des débouchés énergétiques** (biocarburants et biogaz).
- **37 MtMS (14 %) des tonnages sont exportés**, essentiellement sous forme de céréales (blé, orge et maïs), mais aussi de lait, viande et sucre.
- **Contribuant aux quatre débouchés ci-dessus, l'alimentation animale consomme annuellement environ 110 MtMS (45 %) de biomasse**, essentiellement des ressources non utilisables pour l'alimentation humaine (herbe, fourrages, tourteaux de graines oléagineuses après extraction de l'huile, coproduits des industries agro-alimentaires). En céréales, pour la campagne 2022/23, environ 15 % de la production française (près de 9 Mt sur 60 Mt) ont été utilisés par l'industrie de l'alimentation animale⁷⁷, dont environ la moitié pour les volailles, un quart pour les porcins et moins d'un cinquième pour les bovins. En termes de surfaces, avec les prairies temporaires, les oléo-protéagineux et les fourrages annuels, on peut estimer en moyenne ces dernières années à presque 50 % les surfaces arables françaises destinées à l'alimentation animale, y compris à l'export⁷⁸, et à 35 % si l'on prend en compte des clés d'allocation pour les oléagineux et protéagineux et considérant uniquement les cultures produites et consommées en France (donc hors importations de soja et exportations de céréales et lait).
- **Les usages de biomasse agricole pour tous les produits biosourcés (biomatériaux, textile, chimie verte etc.) sont aujourd'hui marginaux en volumes, mais en plein essor.**

La complexité des flux agricoles et du maintien de la fertilité des sols : des dépendances entre filières de production et entre agriculture biologique et conventionnelle

Si la traditionnelle association cultures - élevage au sein même des fermes a diminué avec la spécialisation de l'agriculture, **les différents systèmes de production restent interdépendants, à des échelles spatiales variables, interrégionales, nationales, voire internationales** : une partie des productions végétales est utilisée pour nourrir des animaux d'élevage, et les effluents d'élevage assurent en retour une part de la fertilisation des sols via les engrais organiques, le tout contribuant au cycle du carbone.

Les filières biologiques et conventionnelles partagent par ailleurs un destin commun⁷⁹, les fertilisants utilisables en agriculture biologique (UAB) comme les fumiers, les digestats de méthanisation, ou les vinasses de sucrerie, pouvant être en partie issus du circuit conventionnel, hormis dans le cadre de certains labels ayant des exigences différentes du label AB (notamment Demeter et Biocoherence). Dans les régions sans élevage, l'augmentation des surfaces biologiques a pu créer des tensions sur les approvisionnements en fertilisants organiques. **À l'avenir, des problèmes de disponibilité sont à prévoir du fait de l'utilisation par les cultures conventionnelles d'une quantité croissante d'engrais organiques**, plus à même de préserver ou d'augmenter les taux de matière organique des sols, et ce d'autant plus si la baisse de la consommation d'engrais minéraux est encouragée pour diminuer les émissions de GES liées à leur fabrication (voir partie II.3.B). Toutefois, la production d'engrais décarbonés en voie de développement (voir partie III.1.B.) pourrait permettre de maintenir un niveau de consommation de ces engrais sans compromettre la baisse des émissions dans les années à venir, si le prix de vente de celui-ci reste abordable pour les agriculteurs.

Le maintien de la fertilité des sols en agriculture biologique est ainsi particulièrement dépendant d'autres filières : il est étroitement lié à la disponibilité de surfaces de production en légumineuses (source d'azote primaire), mais également à la disponibilité de sources d'azote secondaire telles que les effluents d'élevage et les nouvelles ressources que sont les digestats de méthanisation, notamment issus de biodéchets dont la collecte est désormais obligatoire depuis le 1^{er} janvier 2024. La fertilité actuelle des sols et donc la composition des produits peuvent par ailleurs reposer sur des apports d'engrais minéraux passés : des travaux⁸⁰ ont évalué à 72 % la part du phosphore actuel des productions biologiques provenant des engrais minéraux accumulés lors de la période précédente, conduite en conventionnel.

⁷⁷ Chiffres clés 2023 - Intercéréales

⁷⁸ <https://sfecologie.org/regard/r116-nov-2023-duru-et-therond-agriculture-et-usage-des-terres/>

⁷⁹ <https://agriculture.gouv.fr/etude-prospective-sur-les-estimations-des-besoins-actuels-et-futurs-de-l-agriculture-biologique-en>

⁸⁰ <https://hal.inrae.fr/tel-02810775>

La concentration des gisements de fertilisants organiques dans les régions spécialisées en élevage pose la question de leur transportabilité et de la répartition spatiale des productions sur le territoire (voir partie III.2). Le gisement de matières fertilisantes repose aussi sur les coproduits des industries agroalimentaires et les déchets alimentaires, qui peuvent également être valorisés en alimentation animale. Ce sujet sera abordé plus largement lors de la deuxième phase du projet, qui étudiera l'aval de la production agricole (transformation, distribution et consommation).

B. Des débouchés énergétiques appelés à se développer : biocombustibles, biocarburants et biogaz

C'est en réponse à l'obligation de gel des terres instaurée par la réforme de la Politique Agricole Commune (1992) et à la recherche de débouchés non alimentaires qu'ont émergé les filières agricoles des biocarburants dans les années 1990-2000. Désormais, puisqu'elle permet une utilisation moindre d'énergies fossiles par effet de substitution, la valorisation de la biomasse en énergie est encouragée par les politiques publiques, le territoire disposant d'une importante ressource, agricole et forestière, dont on estime pouvoir compter sur des volumes additionnels conséquents. Dans le cadre global de l'atténuation du changement climatique, la Stratégie Nationale de Mobilisation de la Biomasse⁸¹ rappelle qu'il s'agit dans le même temps d'assurer une meilleure indépendance énergétique et d'œuvrer en faveur d'une meilleure résilience économique des entreprises agricoles et forestières, par le développement de filières rémunératrices, tout en visant à s'assurer de la durabilité des pratiques et de la préservation de la santé des sols.

Les directives européennes RED II et RED III sur les énergies renouvelables fixent des exigences de durabilité à l'utilisation des bioénergies⁸², selon trois grands critères : la durabilité amont (approvisionnement en biomasse garantissant la pérennité des puits de carbone et limitant l'impact sur la biodiversité), les réductions des émissions de gaz à effet de serre et l'efficacité énergétique.

a. La biomasse agricole en substitution du fuel dans les chaudières

Un premier débouché énergétique correspond aux usages directs de biomasse agricole comme combustible, tel que le miscanthus utilisé en chaudières biomasse polycombustibles. Cette culture pérenne au fort pouvoir calorifique est récoltée en sec à la fin de l'hiver et peut être utilisée directement dans ces chaudières adaptées. La filière ne représente qu'une surface limitée, soit 20 %, des quelques 11 000 hectares de miscanthus cultivés aujourd'hui en France métropolitaine⁸³, les usages en litière et paillage ayant tendance à l'emporter. Cependant les surfaces augmentent régulièrement ces dernières années, de l'ordre de 15 % par an. Le rendement progresse avec le nombre d'années après l'implantation (de 4 tonnes par ha la deuxième année à 13 tonnes au bout de 5 ans⁸⁴). **On estime qu'un hectare de miscanthus peut remplacer l'équivalent de 4 000⁸⁵ à 6 000 litres de fuel par an en moyenne⁸⁶.**

Un autre exemple est celui des chaudières à paille ou à rafles alimentées à base de maïs. Ce co-produit du maïs semences présente un pouvoir calorifique deux fois supérieur à celui des plaquettes forestières et permet d'alimenter des chaudières puissantes. Là encore cette biomasse ne peut venir en substitution directe du bois compte-tenu de propriétés techniques (taux de cendre, température de fusion des cendres...) qui impliquent d'utiliser des chaudières adaptées.

La valorisation de ces biomasses alternatives en combustion suppose aussi de structurer de nouvelles chaînes logistiques.

⁸¹ <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Strat%C3%A9gie%20Nationale%20de%20Mobilisation%20de%20la%20Biomasse.pdf>

⁸² <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/durabilite-bioenergies>

⁸³ https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/241003_%20FAQ%20RED.pdf

⁸⁴ <https://france-miscanthus.org/debouches/energie-renouvelable/>

⁸⁵ https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/20231020_INRAe_Biomasse-Energie-2050.pdf

⁸⁶ https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/20240402_Rapport%20GT%20INRAE%20Bioe%CC%81nergies%20SNBC-3_0.pdf

⁸⁶ <https://france-miscanthus.org/debouches/energie-renouvelable/>

b. Les biocarburants en substitution d'une part de pétrole

Les biocarburants sont des carburants de substitution issus de biomasse et incorporés aux carburants d'origine fossile. En 2022, un record de plus de 5 milliards de litres (soit 3,7 M tonnes-équivalent-pétrole - tep)⁸⁷ en ont été incorporés dans les carburants distribués en France, en hausse de 18 % par rapport à 2021, en majorité des substituts au gazole.

Filière et Carburants		Biomasse agricole utilisée
Filière Biodiesel		
EMAG (Esters Méthyliques d'Acides Gras), en particulier EMHV (Esters Méthyliques d'Huiles Végétales), utilisés en mélange dans le gazole de manière banalisée à hauteur de 7 %	90 %	Plantes oléagineuses, colza essentiellement (96 %)
HVHTG (Huiles Végétales Hydrotraitées Gazole)	9 %	Huiles alimentaires usagées, graisses animales et colza (huile de palme désormais interdite)
Total Biodiesel : 3,3 Mds de litres, soit 8 % de la consommation française Dont origine France à 26 % : environ 0,85 Md de litres		
Filière Bioessence		
Éthanol (bioéthanol) , incorporé dans SP95-E5 ou SP98-E5 (5 % d'éthanol), SP95-E10 (10 % d'éthanol) et E85 (jusqu'à 85 % d'éthanol)	84 %	Betteraves et céréales (blé et maïs en grande majorité), par fermentation des sucres, puis distillation
ETBE (Éther éthyle tertio-butyle) , fabriqué à partir d'éthanol et d'isobutène d'origine fossile, plus facile à mettre en œuvre d'un point de vue technique	10 %	
Total Bioessence : 1,65 Mds de litres, soit 12 % de la consommation française Dont origine France à 50 % : environ 0,82 Md de litres		

Tableau 2 : Principaux biocarburants consommés en France - Données 2023

Sources : Carbone.beta.gouv, IFPEN, UFIP Énergies et Mobilités⁸⁸

En surface, la SAU brute consacrée à la production de bioéthanol est de l'ordre de 300 000 hectares⁸⁹, soit environ 3 %⁹⁰ de la surface en céréales et plantes sucrières, la SAU nette, tenant compte de la part de coproduits issus de cette filière valorisés en alimentation animale, étant estimée à 223 000 hectares. De même, ce sont 400 000 hectares nets de colza et de tournesol qui sont consacrés au biodiesel. **Au total, les surfaces nettes consacrées aux biocarburants ont représenté entre 2 et 3,5 % de la SAU depuis 2009⁹¹.**

La surface nécessaire à la production d'un m³ de biocarburant dépend de la nature de la culture et du rendement⁹² : la meilleure productivité par hectare est atteinte en éthanol de betteraves, puis de blé ou maïs, puis en biodiesel de colza.

⁸⁷ <https://carbone.beta.gouv.fr/stats>

<https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/article/tableau-bord-biocarburants-2023#ref>

⁸⁸ https://www.energiesetmobilites.fr/uploads/pdf/2024_Approvisionnement_de_la_France_en_carburants_05_07_2024_DEF.pdf

⁸⁹ https://www.franceagrimer.fr/content/download/63194/document/2024_NOTE_MAJ%20SAU_MAJ_AVRIL24.pdf

⁹⁰ <https://www.ecologie.gouv.fr/biocarburants>

⁹¹ https://www.franceagrimer.fr/content/download/63194/document/2024_NOTE_MAJ%20SAU_MAJ_AVRIL24.pdf

⁹² <https://www.ocl-journal.org/articles/ocl/pdf/2021/01/ocl200067s.pdf>

Le pourcentage de réduction des émissions de GES permis par les biocarburants par rapport au carburant fossile est estimé à 63 % en moyenne⁹³ (en kgCO₂e par MégaJoule). D'autres travaux⁹⁴ montrent que de manière générale, sans tenir compte des changements d'utilisation des terres, les biocarburants produits en France montrent des bilans énergétiques et climatiques meilleurs que ceux des carburants fossiles. Néanmoins, des nuances sont à apporter à ces résultats si le développement de cultures énergétiques conduit à la disparition de prairies ou zones humides, modifiant en conséquence largement le bilan des émissions de GES, ou s'il s'accompagne d'autres impacts environnementaux tels que des atteintes à la biodiversité.

Ces carburants correspondent à la première génération de biocarburants, qui utilisent des productions agricoles pouvant entrer en concurrence avec la consommation alimentaire, mais ils génèrent par ailleurs des coproduits, tels que drèches et tourteaux pour l'alimentation animale ou encore de la glycérine végétale utilisée dans l'industrie pharmaceutique ou cosmétique. La filière biocarburants liquides a ainsi permis de renforcer l'autonomie protéique de la France (de 25 % en 1980 à 50 % aujourd'hui) par une réduction des importations d'alimentation animale, notamment de soja d'importation déforestant⁹⁵ (voir partie II.1.C).

La recherche se focalise aujourd'hui sur les carburants de deuxième génération⁹⁶, produits à partir de cultures secondaires (production d'huile ou de biomasse lignocellulosique) qui n'entreraient pas en compétition avec l'alimentation (couverts végétaux, dérobés, relay cropping, résidus de cultures comme la paille ou cultures ligneuses dédiées), qui sont amenés à se développer malgré la difficulté du passage à l'échelle industrielle. Des carburants de troisième génération envisagent par ailleurs de produire du biodiesel à partir de micro-algues riches en acides gras.

c. Des débouchés croissants en méthanisation

La méthanisation consiste à produire du gaz par fermentation de matières organiques, et en particulier de biomasse agricole, gisement qui offre en France le potentiel méthanisable majoritaire (90 % de l'énergie potentielle⁹⁷). La valorisation du biogaz évolue ces dernières années de la cogénération d'électricité à l'injection directe dans les réseaux de gaz, qui offre un meilleur rendement énergétique et pour laquelle les tarifs de rachat de gaz sont aujourd'hui plus favorables. Le biogaz peut également être utilisé en carburant, le BioGNV, après épuration.

L'essor de ce débouché est porté conjointement par les politiques de transition énergétique et de gestion des déchets. **Le facteur d'émission de GES du biogaz, ou biométhane, est en effet estimé entre 5 et 10 fois plus faible⁹⁸ que celui du gaz fossile.** L'obligation désormais faite aux collectivités locales de collecter les biodéchets⁹⁹ les conduit à s'impliquer dans la filière, cependant sa croissance continue à reposer sur des installations agricoles, le gisement des biodéchets des collectivités, les boues d'épuration et les déchets organiques des industries représentant une faible part des gisements mobilisables¹⁰⁰.

1920 installations de production de biogaz sont dénombrées en décembre 2023¹⁰¹, dont :

- **652 unités en injection, dont 85 % à la ferme, pour une production totale d'environ 9 TWh/an de biométhane injecté** (12 TWh/an de capacité), soit 2,4 % de la consommation nationale actuelle de gaz ;
- **1 065 en cogénération,** produisant de l'électricité à partir de biogaz, raccordées au réseau électrique pour une puissance électrique de 599 MW, pour une énergie produite de **1,6 TWh** ;
- **203 en chaleur seule.**

⁹³ Ministère de la Transition Écologique, 2020. Panorama 2020, Biocarburants incorporés dans les carburants en France, p.36 et 37

⁹⁴ <https://librairie.ademe.fr/consommer-autrement/1394-analyses-de-cycle-de-vie-appliquees-aux-biocarburants-de-premiere-generation-consommes-en-france.html>

⁹⁵ <https://www.ccomptes.fr/sites/default/files/2023-10/20211220-S2021-1718-politique-developpement-biocarburants.pdf>

⁹⁶ https://www.ocl-journal.org/fr/articles/ocl/full_html/2021/01/ocl200067s/ocl200067s.html#T2

⁹⁷ https://librairie.ademe.fr/cadic/8158/Avis_technique_M_thanisation.pdf

⁹⁸ Ibid.

⁹⁹ Loi AGECE (Anti-Gaspillage pour une Économie Circulaire)

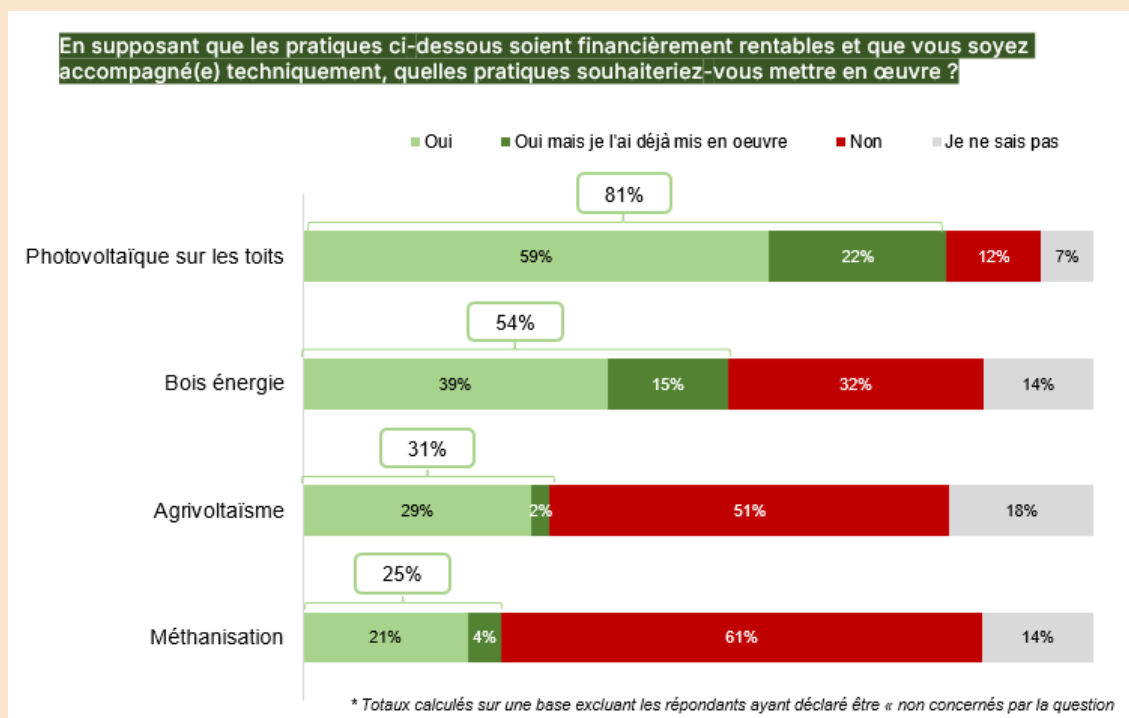
¹⁰⁰ https://librairie.ademe.fr/cadic/8158/Avis_technique_M_thanisation.pdf

¹⁰¹ https://www.syndicat-energies-renouvelables.fr/wp-content/uploads/basedoc/ser-panoramagazrenouvelables2023_web.pdf

580 nouveaux sites en sont au stade projet, mais plus spécifiquement dans les zones d'élevage, alors que **les effluents d'élevage constituent aujourd'hui plus de la moitié des intrants utilisés en méthanisation**¹⁰². Les autres ressources utilisées sont les coproduits des industries agro-alimentaires (16 %), des cultures intermédiaires à vocation énergétique ou CIVE (13 %) et des cultures principales dédiées (5,5 %). Une fraction (8,5 %) de la biomasse méthanisée n'est pas issue de l'agriculture et comprend notamment déjà des biodéchets des ménages. La variabilité des pouvoirs méthanogènes des intrants impose de les combiner pour un fonctionnement optimal des installations.

Seuls 2 % du biogaz produit et 4,3 % de l'électricité produite sont autoconsommés à la ferme¹⁰³. Le bioGNV représente presque 30 % du GNV consommé en France en 2023.

Ces débouchés attirent une minorité d'agriculteurs : à la question « En supposant que les pratiques ci-dessous soient financièrement rentables et que vous soyez accompagné(e) techniquement, quelles pratiques souhaiteriez-vous mettre en œuvre », seuls 25 % des agriculteurs souhaiteraient mettre en place la méthanisation. Les craintes associées étant souvent un risque de dévoiement de l'agriculture et d'accaparement des terres ou encore les investissements financiers et techniques requis : « *On réfléchit à devenir autonome en énergie de manière générale grâce à la production électrique sur l'exploitation et la méthanisation mais c'est pas des sujets faciles parce qu'on peut facilement planter une ferme sur le sujet.* »¹⁰⁴



C. Des arbitrages sur les usages énergétiques à anticiper

Si la biomasse agricole était autrefois traditionnellement destinée, au-delà de l'alimentation humaine, en partie à des débouchés énergétiques, pour l'alimentation des animaux de trait notamment, **les flux de biomasse attirés vers ces nouveaux débouchés de biogaz et biocarburants peuvent se placer en concurrence directe avec les usages préexistants**. Un exemple en zone de grandes cultures est celui des pulpes de

¹⁰² https://www.franceagrimer.fr/content/download/69402/document/20221007_RESSOURCES_EN_BIOMASSE_ET_METHANISATION_2022_WEB-V2.pdf

¹⁰³ ADEME, 2024. Chiffres clés du parc d'unités de méthanisation en France au 1er janvier 2024

¹⁰⁴ Résultats de la Grande Consultation des Agriculteurs 2024, <https://theshiftproject.org/article/resultats-grande-consultation-des-agriculteurs/>

betteraves, co-produits des industries sucrières, historiquement majoritairement réservées à l'alimentation animale en retour des livraisons de betteraves, mais de plus en plus intégrées aux « rations » des méthaniseurs. Ceci illustre la concurrence directe sur la biomasse, entre des usages destinés à l'alimentation animale ou la production d'énergie, qui peut s'exercer à l'échelle de certains territoires. Concurrence qui ne pourra que s'intensifier avec la perspective de nouvelles utilisations de ces mêmes pulpes en substitution de combustibles fossiles dans les sucreries, selon les feuilles de route de décarbonation de ces industries prévues dans le Plan de Transition Sectoriel Sucre¹⁰⁵.

Dans le contexte du changement climatique en cours, en conditions d'aléas météorologiques récurrents et de ressources en eau et en énergie contraintes, les hypothèses de production de biomasse agricole sont soumises à de grandes incertitudes. En parallèle, les enjeux de décarbonation impliquent un recours croissant à cette ressource, en particulier pour les autres secteurs économiques (voir ci-dessous et partie II.3.D.). Sans sobriété énergétique accélérée, des conflits d'usage croissants sont à attendre et vont poser la question du meilleur usage possible pour une ressource donnée. Collectivement, produire durablement plus de biomasse, comestible et non comestible, requiert de maximiser la photosynthèse par unité de surface, en conditions de ressources limitées et tout en réduisant les atteintes aux écosystèmes.

Le secteur agricole est ainsi appelé à jouer un rôle important dans la transition énergétique, mais les usages agronomiques (retour au sol et stockage de carbone) et énergétiques (exportation de la biomasse) peuvent être antinomiques (voir partie III.3) et devront s'équilibrer. En matière climatique, un compromis devra être trouvé entre l'augmentation du stockage de carbone dans les sols agricoles (voir partie II.3.C) et l'utilisation de biomasse agricole en substitution aux énergies fossiles.

Globalement, même avec l'hypothèse de nouvelles ressources agricoles, le bouclage biomasse de la planification écologique semble ainsi difficilement assuré en 2030¹⁰⁶, en particulier du fait de l'effondrement du puits forestier. L'incertitude se renforce davantage si l'on intègre les aléas climatiques (vagues de chaleurs, croissance attendue des stress hydriques, ou à l'inverse des excès d'eau...), qui seront à la source de pertes de rendement pour une variété de productions agricoles et sylvicoles. La question de la disponibilité en eau pourrait même constituer le principal facteur limitant, devant la fourniture d'azote, pour certains territoires français à horizon 2050 (voir partie II.2.D).

Traditionnellement, les arbitrages sur l'utilisation de la biomasse reposent sur une hiérarchisation des usages, qui, pour les cultures alimentaires, laissent la priorité à l'alimentation humaine, puis animale, avant la fertilité des sols et l'énergie. **La transition écologique conduit à questionner la priorité donnée à chaque usage et à réfléchir aux moyens de concilier tous les objectifs dépendants de la biomasse, avec une gouvernance qui reste à clarifier¹⁰⁷.**

La Grande Consultation des Agriculteurs révèle¹⁰⁸ à cet égard une certaine frilosité voire une défiance d'un grand nombre d'agriculteurs : 88 % d'entre eux considérant que la priorité de l'agriculture française doit être d'assurer l'autonomie alimentaire nationale alors que contribuer à l'indépendance énergétique de la France figure parmi les priorités de seulement 33 % des agriculteurs

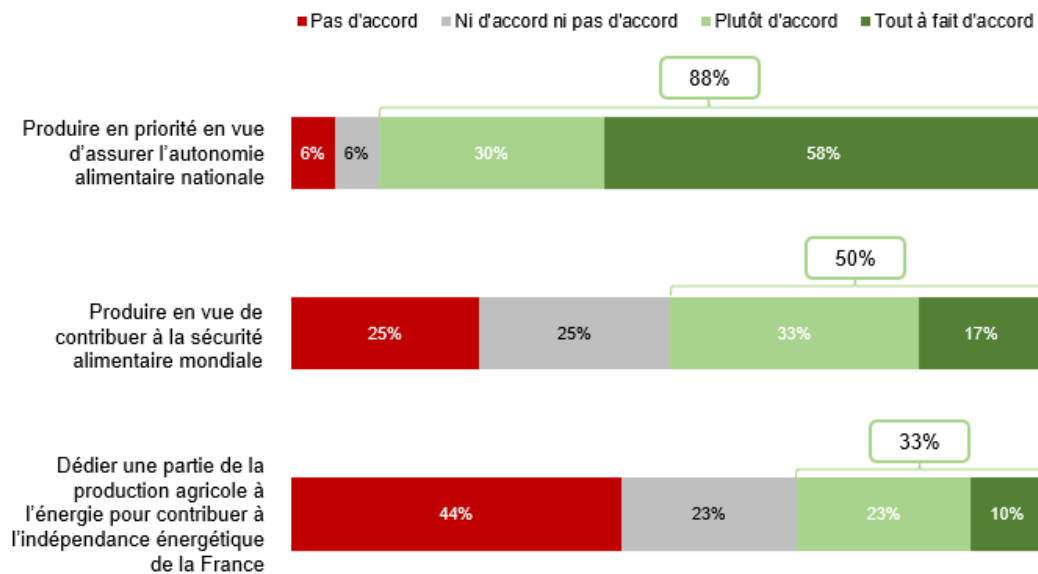
¹⁰⁵ https://librairie.ademe.fr/cadic/7667/memo_pts_sucre_vf.pdf

¹⁰⁶ <https://www.info.gouv.fr/upload/media/content/0001/10/00d496ed6c39499c18e94e799f0803c87649b3f5.pdf>

¹⁰⁷ https://www.lecese.fr/sites/default/files/pdf/Annexe/2023/2023_13_biomasse_synthese.pdf

¹⁰⁸ Résultats de la Grande Consultation des Agriculteurs 2024, <https://theshiftproject.org/article/resultats-grande-consultation-des-agriculteurs/>

En 2050, la priorité pour l'agriculture de la France devrait être de?



Piloter la transition du secteur et opérer les arbitrages implique une documentation fine des enjeux. Afin de renforcer les connaissances, le suivi et le pilotage de ces ressources, a été lancé lors du Salon International de l'Agriculture 2024 le GIS Biomasse¹⁰⁹, instance d'expertise sur les usages de la biomasse, associant l'INRAE, l'ADEME, FranceAgriMer et l'IGN. FranceAgriMer est déjà chargé de la gestion de l'ONRB, Observatoire National des Ressources en Biomasse¹¹⁰, qui assure l'identification et la quantification des ressources disponibles en France et leurs utilisations.

¹⁰⁹ <https://agriculture.gouv.fr/sia2024-lancement-dun-groupe-dinteret-scientifique-gis-en-faveur-de-la-biomasse>

¹¹⁰ <https://www.franceagrimer.fr/Eclairer/Outils/Observatoires/Observatoire-National-des-Ressources-en-Biomasse-ONRB>

4. L'importance d'une approche systémique des enjeux avec les autres secteurs économiques eux-mêmes en transition

Du fait de l'interdépendance entre le secteur agricole et les autres secteurs économiques, sa transition ne peut être envisagée qu'en adoptant une approche transversale et coopérative pour planifier leur décarbonation et plus largement leurs transitions respectives.

Les acteurs agricoles doivent à la fois contribuer aux objectifs d'atténuation nationaux et anticiper les évolutions des autres secteurs, qui vont engendrer de nouveaux besoins et le placer en concurrence sur certaines consommations de ressources (électricité, biomasse, sols, etc.). La réflexion doit porter notamment sur les secteurs suivants :

- **Le secteur du bâtiment** concourt aux activités agricoles pour construire, entretenir et rénover les bâtiments agricoles (hangars, bâtiments d'élevage, stabulations, etc.) et les logements des personnes travaillant dans les fermes (agriculteurs, salariés, etc.). Pour réduire sa consommation de matériaux dont la production est émissive (acier, béton, verre, plastique etc.), ce secteur mobilise déjà et va mobiliser davantage de matériaux bio-sourcés (bois, chanvre, etc.), devenant de manière croissante un déterminant de la demande en biomasse. Parallèlement, la construction neuve peut artificialiser (ou libérer) des terres. Pour réduire sa consommation de pétrole (gazole non routier en particulier), le secteur imagine électrifier certaines machines (camionnettes, petites machines de chantier, etc.) ou, lorsque le besoin de puissance est important (pelleteuses, etc.), recourir aux biocarburants. Pour réduire la consommation de fioul et de gaz fossile par les bâtiments (chauffage, eau chaude sanitaire), le secteur électrifie de nombreux usages, mais certains imaginent recourir massivement au biogaz pour le chauffage, en particulier des grands bâtiments.
- **Le secteur de la mobilité quotidienne** permet le déplacement des agriculteurs et professionnels du secteur et des consommateurs finaux vers les lieux d'achat ou de consommation, en plus des déplacements de tous les Français. Ce secteur constitue déjà une partie de la demande agricole au travers des biocarburants. Pour réduire leur consommation de pétrole, les acteurs de la mobilité quotidienne imaginent consommer à l'avenir davantage d'électricité pour électrifier les flottes de vélos, voitures, bus, trains, etc. Certains imaginent développer les voitures et bus au biogaz ainsi que les trains à hydrogène sur les lignes difficiles à électrifier. Certains, certes de plus en plus rares, imaginent même des voitures et bus à hydrogène pour la mobilité quotidienne.
- **Le secteur de la mobilité longue distance** permet le déplacement des personnes dans le cadre d'activités personnelles (loisirs, famille...) ou professionnelles. Ce secteur constitue déjà une partie de la demande agricole au travers des biocarburants. Pour réduire leur consommation de pétrole, les acteurs des transports prévoient de consommer à l'avenir davantage d'électricité pour électrifier les flottes de voitures, bus, trains, etc., ainsi que davantage d'hydrogène (avions, bus et trains hydrogène), et d'ammoniac (grands ferries, paquebots de croisière, etc.).
- **Le secteur du fret terrestre** permet le déplacement des intrants, des machines et de la production ainsi que sa distribution aux commerces et aux consommateurs finaux. Ce secteur constitue déjà une partie de la demande agricole au travers des biocarburants. Pour réduire leur consommation de pétrole, les acteurs des transports prévoient de consommer à l'avenir davantage d'électricité (camions, trains etc.), ainsi que davantage de biomasse gazeuse et liquide (biogaz, biocarburants) pour les camions. Certains imaginent même des camions à hydrogène et une part de train à hydrogène sur les lignes coûteuses à électrifier.
- **Le secteur du fret maritime et aérien** permet le déplacement des intrants, des machines et de la production sur des longues distances. Pour réduire leur consommation de pétrole, les acteurs du fret maritime et aérien imaginent mobiliser de grandes quantités de biomasse liquide (biokérosène pour avions), d'hydrogène (avion à hydrogène et aux carburants de synthèse), et d'ammoniac (pour les

navires de grande taille). Côté biomasse, l'aviation est un déterminant de la demande agricole¹¹¹. Côté hydrogène et ammoniac, l'aviation et le fret entrent en compétition avec la production d'engrais azotés pour le secteur agricole. La production d'hydrogène nécessitant de grandes quantités d'électricité, cette concurrence met également en tension le marché de l'électricité.

- **Le secteur du numérique** est à l'œuvre dans les transformations digitales du secteur, tant sur le plan de la production (Outils d'Aide à la Décision, robotisation, etc.) qu'administratif (Telepac, logiciels de gestion, etc.). De nouveaux usages sont susceptibles de générer des besoins d'infrastructures supplémentaires, notamment en termes de couverture réseau des zones agricoles (antennes, satellites), en particulier dans le cas de la robotisation. Des projets émergents incluent également l'intelligence artificielle au service de l'agriculture, susceptible de nécessiter d'importantes infrastructures de calcul supplémentaires pour les besoins de l'agriculture, ainsi que de nombreux capteurs embarqués (terres rares, métaux, etc.).
- **Le secteur énergétique** approvisionne en électricité, pétrole et gaz l'ensemble des machines, qu'elles soient dans les fermes (tracteurs, chauffage des bâtiments d'élevages, pompes d'irrigation, robots de traite, etc.) ou en dehors (camions et voitures permettant le déplacement des salariés ou le transport des intrants ou des productions). Les tensions sont nombreuses avec les autres secteurs de l'économie car l'électricité est le principal vecteur (direct ou indirect, sous forme d'hydrogène ou d'ammoniac) de la décarbonation. L'agriculture pourrait voir sa contribution au secteur énergétique augmenter fortement, soit via la biomasse liquide et gazeuse, soit via la production d'électricité, notamment agrivoltaïque. Les tensions entre la décarbonation de l'agriculture elle-même via les bioénergies qu'elle est en mesure de produire et les autres secteurs de l'économie semblent les plus prégnantes. La concurrence entre les usages de l'eau pour l'hydroélectricité et les usages agricoles doit également être prise en compte.
- **Le secteur de l'urbanisme** détermine le rapport des fermes à leur territoire et leur population, notamment en termes de disponibilité des terres agricoles et d'artificialisation, ainsi que d'accès aux biens et services nécessaires à la vie quotidienne dans les zones rurales (services publics, commerces, médecins, etc.). En cas de re-ruralisation, la consommation de terres agricoles pour l'étalement du secteur résidentiel doit être limitée.
- **Le secteur de l'industrie et de la chimie** fabrique les intrants nécessaires aux systèmes de production agricoles (engrais minéraux, produits phytosanitaires, etc.) et le matériel utilisé (tracteurs, outils, équipements, robots, etc.). Sa trajectoire de décarbonation (voir partie III.1.B.) dépendra et influencera le volume d'engrais consommés par le secteur agricole lui-même en transition.

La concurrence principale entre secteurs porte sur la biomasse, qui constitue aujourd'hui le principal moyen d'avoir des carburants liquides bas-carbone, et dont le gisement est convoité par de nombreux secteurs. Une économie décarbonée insuffisamment planifiée pourrait générer une demande forte en biomasse énergie qui serait alors régulée par l'offre.

Une seconde concurrence, plus limitée, porte sur la demande croissante en électricité de tous les secteurs, la demande en engrais décarbonés ajoutant, via le besoin en hydrogène, un poste de consommation électrique non négligeable augmentant la tension sur cette ressource en 2050.

Enfin, l'artificialisation des sols agricoles pour la construction neuve, les infrastructures, la réindustrialisation et plus marginalement pour la production d'énergie, restreint la surface agricole disponible, alors que celle-ci peut constituer un puits de carbone naturel à fort potentiel à même de contribuer à l'atténuation des émissions de GES. Moins l'agriculture pourra jouer son rôle de puits de carbone, plus il faudra réduire les émissions brutes de tous les secteurs ou alors recourir à des puits de carbone artificiels, aux technologies aujourd'hui peu matures.

¹¹¹ TotalEnergies et Air France-KLM ont signé un accord portant sur la fourniture de SAF (Sustainable Aviation Fuel) représentant jusqu'à 1,5 million de tonnes sur une période de 10 ans, soit jusqu'en 2035.
<https://totalenergies.com/fr/actualites/communiqués-presse/air-france-klm-revoit-hausse-son-accord-dachat-carburant-daviation>



Un système agricole contraint par des limites énergétiques, climatiques et écosystémiques

II. Un système agricole contraint par des limites énergétiques, climatiques et écosystémiques

Au cours de la deuxième moitié du XX^{ème} siècle, l'agriculture française est devenue totalement dépendante des énergies fossiles, que ce soit pour les carburants des tracteurs ou la fabrication de fertilisants azotés devenus nécessaires aux niveaux de productivité actuels. La majorité des intrants nécessaires à son fonctionnement est aujourd'hui importée (engrais, alimentation animale), le recours aux produits phytosanitaires est devenu la norme, la biodiversité cultivée a eu tendance à s'homogénéiser.

S'il s'est toujours adapté aux évolutions météorologiques, économiques, sociales et politiques, le monde agricole est soumis aujourd'hui à une accélération des changements à intégrer, le dérèglement climatique bousculant des systèmes et des filières construits sur des temps longs et exacerbant leur vulnérabilité intrinsèque. Contribuant aux émissions de GES nationales et source d'impacts sur les écosystèmes, le secteur est aussi l'un des rares à pouvoir stocker naturellement du carbone et contribuer à la décarbonation des autres secteurs économiques.

1. Des dépendances et des fragilités qui s'accumulent

A. Un système agricole devenu totalement dépendant des énergies fossiles

De la même façon qu'elle a modifié drastiquement le fonctionnement de tous les secteurs économiques, l'utilisation croissante du pétrole dans la seconde moitié du XX^{ème} siècle a totalement révolutionné les pratiques agricoles. **D'une part, les tracteurs et engins automoteurs ont – en un temps record d'une vingtaine d'années – remplacé la traction animale qui prévalait jusqu'alors, permettant une explosion de la productivité par actif, le tout dans un contexte de prix de carburant attractif et d'accès au crédit bancaire facilité. D'autre part, la généralisation de l'usage des engrais azotés minéraux, fabriqués à partir de gaz naturel, a permis une augmentation sans précédent des rendements et un doublement de la biomasse agricole produite entre 1960 et 2010¹¹².**

Le pétrole et le gaz se sont ainsi totalement substitués aux énergies humaines et animales : d'un système autonome énergétiquement, par autoconsommation d'une partie de la biomasse produite sur ses sols, le secteur agricole est passé à un système quasi totalement dépendant des énergies fossiles. L'assolement français s'en est trouvé bouleversé, les surfaces d'avoine destinées à l'alimentation des chevaux déclinant très rapidement, de même que celles des légumineuses, qui assuraient traditionnellement une fourniture minimum d'azote aux rotations. Dans le même temps, malgré cette perte d'autonomie énergétique, le retour sur investissement énergétique (TRE, ou EROI, Energy Return on Energy Invest)¹¹³ du secteur a été multiplié par deux, passant de 2 à 4 environ.

¹¹² Harchaoui S. & Chatzimpiros P., 2018. "Energy, Nitrogen, and Farm Surplus Transitions in Agriculture from Historical Data Modeling. France, 1882–2013", *Journal of Industrial Ecology* 23(2), pp. 412-425

¹¹³ Le taux de retour énergétique ou TRE — les acronymes anglais : EROEI, « Energy Returned On Energy Invested », ERoEI, ou EROI, « Energy Return On Investment » sont aussi utilisés en français — est l'énergie utilisable acquise à partir d'un vecteur énergétique, rapportée à la quantité d'énergie dépensée pour obtenir cette énergie.

L'enquête de la Grande Consultation des Agriculteurs¹¹⁴ montre que :

- **77 % des agriculteurs sont préoccupés par la hausse du prix de l'énergie**
- **71 % des agriculteurs sont préoccupés par leur dépendance aux énergies fossiles**

« La dépendance énergétique, c'est un sujet sur lequel on réfléchit beaucoup sur l'exploitation mais par contre, quelles sont les solutions ? »

« On réfléchit à devenir autonome en énergie de manière générale grâce à la production électrique et la méthanisation mais ce ne sont pas des sujets faciles parce qu'on peut facilement planter une ferme sur le sujet. »

« On a été manifester pour dire que les charges sont trop importantes, le prix du GNR augmente, on ne peut pas encaisser des augmentations pareilles »

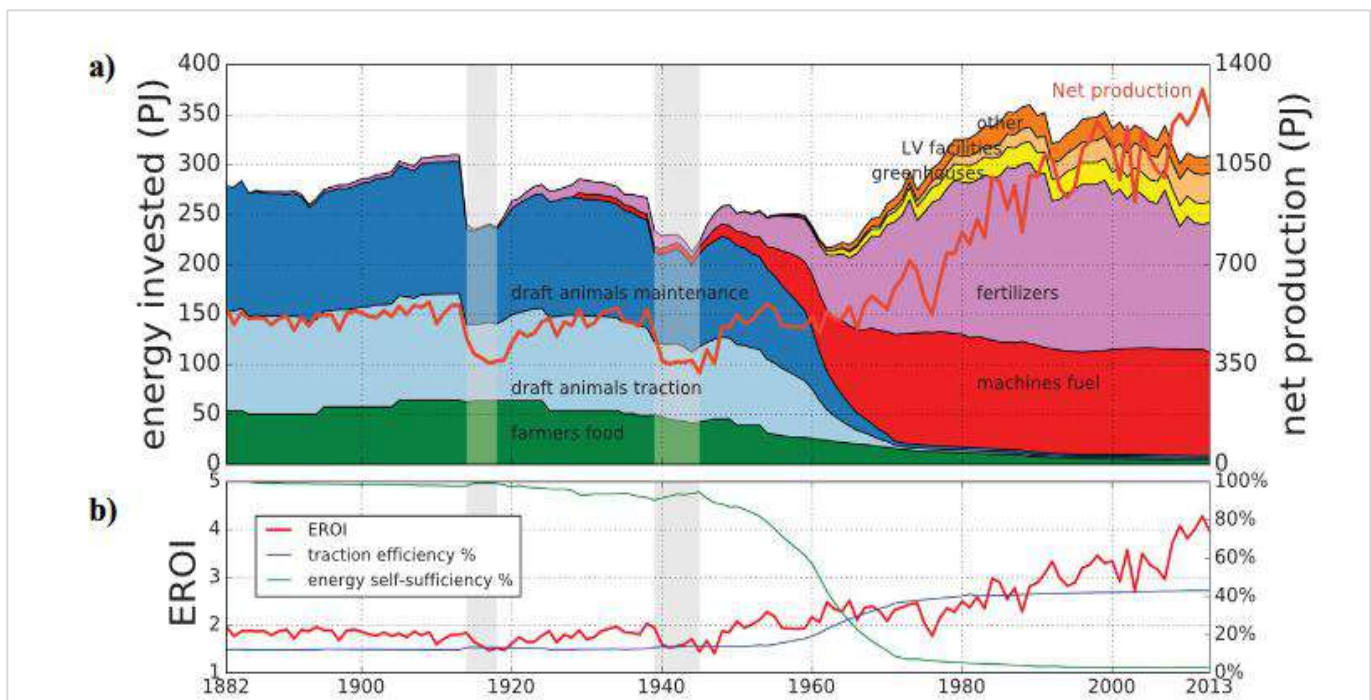


Figure 24 : a) Énergie investie par source et production nette (petajoules – PJ) et b) Retour énergétique sur énergie investie et autosuffisance énergétique

Source : Harchaoui S. & Chatzimpiros P. (2018)

a. Des énergies fossiles fournissant les trois quarts des besoins énergétiques du secteur

Le gazole est aujourd'hui la première source d'énergie consommée directement à l'échelle des fermes : ce sont les carburants des tracteurs et automoteurs à moteur diesel qui en constituent le principal poste de dépense énergétique (53 %)¹¹⁵, suivis par le fonctionnement et le chauffage des installations (notamment bâtiments d'élevage 11 %, et serres 10 %), l'irrigation, le séchage des grains et fourrages, etc.

En 2017, le secteur agricole a consommé environ 4,1 Mtep¹¹⁶, soit moins de 3 % de la consommation totale française. Tirée par la mécanisation croissante des travaux agricoles, cette consommation a augmenté de façon régulière durant la période 1970-2000, mais s'est depuis stabilisée. **Elle repose majoritairement sur**

¹¹⁴ Résultats de la Grande Consultation des Agriculteurs 2024, <https://theshiftproject.org/article/resultats-grande-consultation-des-agriculteurs/>

¹¹⁵ <https://agriculture.gouv.fr/decarbonation-de-lenergie-utilisee-en-agriculture-lhorizon-2050>

¹¹⁶ Ibid.

les produits pétroliers (72 %), le gaz fournissant 6 % des besoins. Les autres sources d'énergie sont l'électricité (18 %) et les énergies renouvelables (4 %), toutes deux en croissance.

Il faut noter qu'en 2015, **le secteur agricole a contribué à la production de 4,6 Mtep d'énergies renouvelables¹¹⁷, représentant 20 % de la production nationale** (96 % pour les biocarburants et 83 % pour l'éolien installé sur des parcelles agricoles - Chiffres 2017), soit une production d'énergies renouvelables légèrement supérieure à sa consommation directe d'énergie.

L'usage des énergies fossiles a aussi révolutionné, en les facilitant, le transport des fertilisants et des denrées agricoles, leur conservation, les filières de transformation, les circuits de distribution, dessinant peu à peu une nouvelle logistique de toute la filière agricole et agro-alimentaire. Cette nouvelle géographie agricole et alimentaire s'est calée dans le même temps sur la concentration de la consommation dans les villes, à mesure de l'urbanisation du territoire. Ces transports intérieurs comme extérieurs posent fortement question à moyenne échéance et supposent de réfléchir à la répartition des activités agricoles sur le territoire d'une part, à notre dépendance aux marchés étrangers d'autre part, dans un avenir où l'approvisionnement en énergie sera contraint. Ces questions seront approfondies lors de la deuxième phase du projet consacré à l'agroalimentaire et à l'alimentation.

b. Des intrants non énergétiques d'origine fossile : les engrais azotés minéraux

Ils ont révolutionné l'agriculture du XX^{ème} siècle dans les pays du Nord. **Les engrais azotés minéraux (aussi appelés engrais de synthèse), dont la fabrication repose sur le procédé Haber-Bosch développé avant la Première Guerre mondiale, ont permis une hausse spectaculaire des rendements, notamment en céréales, aidés par la sélection variétale et le recours aux traitements phytosanitaires. En France, le rendement moyen du blé tendre passe ainsi de 15 quintaux par hectare en 1950 à 70 quintaux par hectare dans les années 1990¹¹⁸.** Globalement, la corrélation entre rendements et apports d'engrais azotés est très élevée¹¹⁹. Le recours aux fertilisants minéraux va alors progressivement faire éclater les systèmes de production traditionnels, basés sur l'association de cultures et d'élevage, encore mis en œuvre en 1950 dans la plupart des régions françaises¹²⁰.

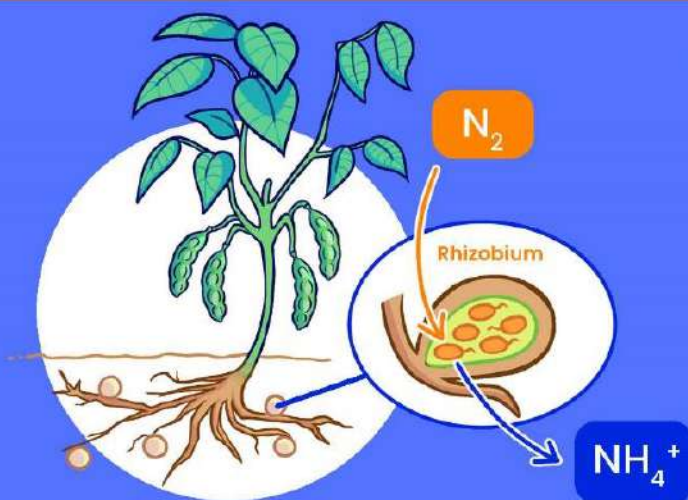
¹¹⁷ <https://librairie.ademe.fr/cadic/915/synthese-agriculture-efficacite-energetique-2019.pdf>

¹¹⁸ https://www.academie-agriculture.fr/sites/default/files/publications/encyclopedie/01.02.r02_rendement_annuel_ble_tendre_2024.pdf

¹¹⁹ <https://agriculture.gouv.fr/geographie-economique-des-secteurs-agricole-et-agroalimentaire-francais-quelques-grandes-tendances>

¹²⁰ Devienne, S. 2018. Les révolutions agricoles contemporaines en France. In Chouquer, G., & Maurel, M. (Eds.), *Les mutations récentes du foncier et des agricultures en Europe*. Presses universitaires de Franche-Comté

LES LÉGUMINEUSES, SOURCE D'AZOTE, D'AUTONOMIE PROTÉIQUE ET DE RÉSILIENCE



UN POUVOIR D'AUTO-FERTILISATION GRÂCE À LA FIXATION SYMBIOTIQUE

- Symbiose entre Rhizobium (bactéries du sol) et racines des légumineuses pour fixer le diazote de l'air (N_2) sous forme d'azote minéral (NH_3), assimilable par la plante

UNE RÉDUCTION DES BESOINS EN ENGRAIS AZOTÉS

- Évitement de fertilisation par l'introduction de légumineuses en substitution d'autres cultures
- Effet fertilisant sur les cultures compagnes et suivantes

Environ
- 200kg N/ha

-50 à
-200kg N/ha

UNE GRANDE DIVERSITÉ ET DE NOMBREUX DÉBOUCHÉS POTENTIELS

- Des débouchés en alimentation humaine et animale : aliments et fourrages très protéinés, intérêts nutritionnels
- Des débouchés énergétiques (biocarburants pour le soja, biogaz pour des légumineuses à forte biomasse : luzerne, trèfle, etc.)
- Des gains de productivité et un fort potentiel d'accroissement dans de nombreuses régions françaises

Légumineuses à graines



Pois chiche

Fève

Haricot

Légumineuses fourragères



Luzerne

Trèfle

Lupin

DES DÉPENDANCES ET DES FREINS ÉCONOMIQUES

- Une forte dépendance aux importations de soja (principalement du Brésil)
- Des élevages particulièrement dépendants du soja : volailles et bovins laitiers

- 50% du soja importé en France potentiellement issu de la déforestation
- Des légumineuses non compétitives sur le marché mondial ou manquant de débouchés

2/3

du soja
est
importé



44%

des tonnages de soja



36%

des tonnages de soja

UNE SOURCE DE RÉSILIENCE À HORIZON 2050



Atténuation des émissions de GES directes (N_2O principalement) et indirectes (CO_2 du soja déforestant) du système agricole



Co-bénéfices agroécosystémiques (sol, eau, air, biodiversité)



- Diminution de la dépendance à la fertilisation minérale azotée
- Amélioration de l'autonomie protéique et de la résilience des filières d'élevage françaises

Azote et fertilisation des cultures

Intérêt des Légumineuses et de la fixation symbiotique

L'azote (N) est le principal facteur limitant de la croissance des végétaux. S'il se trouve en abondance dans l'air (78 % du volume) sous forme de diazote (N₂), il n'est pas assimilable directement par les plantes, sauf pour les espèces de la famille des Légumineuses (luzerne, trèfle, soja, pois, haricot, lentille, féverole, etc.). Celles-ci jouissent en effet de la faculté unique de créer des symbioses avec des bactéries du sol du genre *Rhizobium*, qui induisent la formation de nodosités fixatrices de diazote sur les racines des plantes. Ce phénomène, qualifié de fixation symbiotique, permet la conversion de l'azote atmosphérique en « azote réactif » (nitrate ou ammonium), qui est alors mobilisable par la plante pour constituer ses molécules organiques et assurer son développement. De ce fait, les légumineuses fournissent une porte d'entrée d'azote symbiotique dans les agroécosystèmes prépondérante, un rôle majoritairement rempli par les cultures de soja, représentant les 2/3 de la quantité de N₂ fixé dans le monde par les légumineuses à graines (14 sur 21 Mt)¹²¹. Outre les *Rhizobium* existent également dans les sols des bactéries fixatrices d'azote dites « libres » capables de fixer et de rendre l'azote atmosphérique disponible à proximité des racines des végétaux (bactéries diazotrophes de type *Azotobacter* ou *Pseudomonas*).

L'azote peut se trouver en quantité suffisante dans certains sols particulièrement riches, mais les systèmes agricoles de productions végétales reposent sur des apports d'azote, via la fertilisation, pour compenser les exportations par les récoltes. Environ 80 % de l'apport en azote sur les parcelles agricoles provient aujourd'hui directement d'engrais azotés minéraux (ammonitrates, urée, solutions azotées, etc.), sources d'azote primaires, fabriqués industriellement à partir d'ammoniac (NH₃), lui-même issu du procédé Haber-Bosch qui permet de fixer le diazote atmosphérique en combinaison avec de l'hydrogène (H₂)¹²². Cet hydrogène est aujourd'hui essentiellement issu de ressources fossiles, en particulier du gaz fossile qui est utilisé à la fois comme matière première dans le procédé de vaporeformage du gaz et comme combustible. Les 20 %¹²³ d'apports restants sont assurés par des fertilisants organiques (déjections animales, boues de stations d'épuration, composts, etc.), sources secondaires dont l'azote est partiellement issu de la fertilisation minérale. Contrairement aux engrais organiques dont les éléments doivent d'abord passer par un processus de minéralisation complexe et étalé dans le temps, les engrais minéraux ont l'avantage d'être directement assimilables par les plantes.

L'apport d'engrais azoté minéral est interdit par le cahier des charges de l'Agriculture Biologique, qui repose uniquement sur des apports de fertilisants organiques, aujourd'hui majoritairement issus d'élevages bovins¹²⁴, et sur la fixation symbiotique assurée par les légumineuses incluses dans la rotation.

Azote, protéines et qualité des productions

Le cahier des charges exigé pour la commercialisation des céréales comprend généralement un taux minimum de protéines, corrélé à la disponibilité en azote pour les cultures (et inversement proportionnel au rendement par phénomène de dilution). Les recommandations de fertilisation pour un objectif de rendement donné visent donc à concilier ce rendement et un taux de protéines suffisant.

Les légumineuses donnent des fourrages (luzerne, trèfle, lupin) ou des graines (soja, pois, féveroles...) très riches en protéines : elles sont les plus intéressantes en termes de richesse protéique (oscillant entre 18 et 42 %, soit 2 à 3 fois plus que pour les cultures céréalières), de valeur nutritionnelle (teneur supérieure en fibres), et souvent les plus performantes en termes de production de protéines par hectare, le tout sans fertilisation azotée. La traditionnelle pratique des méteils associant céréales et légumineuses permet la production d'un fourrage équilibré (ratio énergie/protéine adapté et bonne complémentarité protéique, les

¹²¹ Herridge, D.F., Peoples, M.B. & Boddey, R.M. 2008. *Global inputs of biological nitrogen fixation in agricultural systems*, Plant Soil. New South Wales Department of Primary Industries

¹²² https://bibliothèque.ademe.fr/cadic/8111/PTS_Ammoniac_synthese.pdf

¹²³ <https://agriculture.gouv.fr/prospective-des-matieres-fertilisantes-dorigine-residuaire-mafor-lhorizon-2035-analyse-ndeq-176>

¹²⁴ <https://agriculture.gouv.fr/estimation-des-besoins-actuels-et-futurs-de-lagriculture-biologique-en-fertilisants-organiques>

légumineuses étant riches en lysine¹²⁵ au contraire des céréales). Plus largement, les légumineuses sont porteuses d'une grande diversité d'acides aminés (lysine, arginine, acide glutamique, méthionine, cystéine...), de vitamines (B1, B3 et B9 / E) et de nutriments jugés essentiels pour l'homme. Certains travaux ont en outre établi que les cultures associées céréales - légumineuses à graines amènent à une présence réduite des mycotoxines (toxines secrétées par les champignons phytopathogènes) dans les grains de la culture simultanée ou suivante de céréales¹²⁶. En cela, l'introduction de légumineuses jouerait sur la qualité nutritionnelle et sanitaire de la biomasse produite.

Par ailleurs, la culture des légumineuses en association concerne aussi bien les prairies (association graminées - légumineuses) que les parcelles cultivées (cultures simultanées ou en relais, utilisation dans les couverts végétaux). Enfin il existe des arbres et arbustes fixateurs d'azote (robiniers faux-acacias, albizias...) qui peuvent exister ou être implantés dans les paysages agricoles (haies ou plantations agroforestières).

Aujourd'hui, en agriculture conventionnelle, la quasi-totalité des surfaces de céréales, colza, betteraves ou encore pommes de terre est fertilisée avec de l'azote minéral¹²⁷. La consommation totale d'engrais azotés de synthèse représente environ 2 millions de tonnes d'azote par an, répartis entre les ammonitrates (37 %), les solutions azotées (31 %), l'urée (20 %) et les autres produits azotés (12 %)¹²⁸. **En hausse continue après les années 1960, les livraisons d'engrais azotés minéraux se sont stabilisées depuis les années 1990** autour d'une consommation moyenne par hectare fertilisable de l'ordre de 80/85 kg d'azote¹²⁹, avec une décroissance entre cette consommation et la production totale de céréales et colza¹³⁰, signe d'une efficacité accrue de leur utilisation.

Si la France dispose de quatre sites de production sur le territoire, leurs capacités de production (0,8 Mt) sont insuffisantes pour subvenir à la consommation nationale actuelle, ce qui soulève également des enjeux géopolitiques : les engrais minéraux azotés sont donc aujourd'hui importés à hauteur de 75 %, dont l'urée et les solutions azotées à presque 100 %, les ammonitrates à 53 %, en provenance de pays européens (Allemagne, Belgique), mais majoritairement hors Union européenne (Algérie, Égypte, États-Unis, Russie)¹³¹. La filière est ainsi fortement exposée à la concurrence internationale et sa dépendance aux importations a été particulièrement exacerbée en 2022 avec la guerre en Ukraine. Pour s'organiser face à cette dépendance, un plan national de souveraineté engrais est en cours d'élaboration.

B. Une dépendance à d'autres ressources critiques non renouvelables : exemple du phosphore

En plus de la généralisation des engrais minéraux azotés, **la modernisation agricole de la seconde moitié du XX^{ème} siècle a reposé sur l'utilisation croissante d'engrais minéraux phosphatés et potassiques, issus de ressources minières par essence non renouvelables**. Utilisés en engrais de fond, phosphore et potassium agissent fortement en début de cycle de végétation pour assurer une croissance saine des cultures et la bonne structuration du réseau racinaire. Généralement apportés sur les têtes de rotation, ils sont consommés de façon régulière sur les cultures exigeantes. Ainsi, maïs grain, lin fibre et pomme de terre sont, sur plus de 60 % de leur surface, amendés en phosphore minéral¹³².

¹²⁵ La lysine compte parmi les acides aminés essentiels, constituant eux-même la matière première des protéines. Ils sont jugés "essentiels" dans la mesure où le corps humain ne peut pas les produire en quantités suffisantes pour répondre à ses besoins et doit ainsi les obtenir à partir de l'alimentation.

¹²⁶ Carrouée et al., *Introduction du pois protéagineux dans des rotations à base de céréales à paille et colza : impacts sur les performances économiques et environnementales*. Innovations Agronomiques, 2012, 25, pp.125-142.

¹²⁷ https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/Chd2009/cd2020-9 %20PK%20_GC2017b.pdf

¹²⁸ https://bibliothèque.ademe.fr/cadic/8111/PTS_Ammoniac_synthese.pdf

¹²⁹ <https://www.notre-environnement.gouv.fr/themes/economie/l-agriculture-ressources/article/les-livraisons-d-engrais-en-france>

¹³⁰ <https://www.unifa.fr/actualites-et-positions/la-fertilisation-azotee-en-france-un-atout-rendement-et-qualite-pour-les>

¹³¹ https://bibliothèque.ademe.fr/cadic/8111/PTS_Ammoniac_synthese.pdf

¹³² https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/Chd2009/cd2020-9 %20PK%20_GC2017b.pdf

Des travaux indiquent que près de la moitié de la fertilité actuelle des sols en phosphore proviendrait du recours aux engrais minéraux¹³³, suggérant la difficulté des systèmes agricoles contemporains à s'affranchir de cette ressource. Or le phosphate et les roches phosphatées figurent depuis 2014 sur la liste des matières premières critiques pour l'Union européenne¹³⁴. Le moment où les ressources mondiales en phosphore seraient épuisées, pour certains estimé à l'échéance d'un siècle, fait l'objet de débat¹³⁵. Par ailleurs, des préjudices environnementaux sont documentés en lien avec la production et l'utilisation des engrais phosphatés. Se pose notamment la question de leur teneur en cadmium, variable selon les gisements, exposant les sols à des risques d'accumulation de ce métal toxique en cas de mauvaises pratiques de fertilisation et celle de l'exposition des populations¹³⁶.

En France, plusieurs grandes régions agricoles étaient jugées déficientes en 2012 en matière de phosphore minéral, principalement dans le Nord et l'Est du pays (Hauts-de-France, Bassin parisien, Grand Est...)¹³⁷. Les carences relevées dans ces territoires ne relèvent pas nécessairement d'une absence de phosphore souterrain, mais parfois d'une difficulté à le rendre biodisponible pour les plantes, faute d'une densité suffisante de cultures mycorhiziennes et/ou à enracinement profond¹³⁸, ou en raison d'un blocage en sols calcaires.

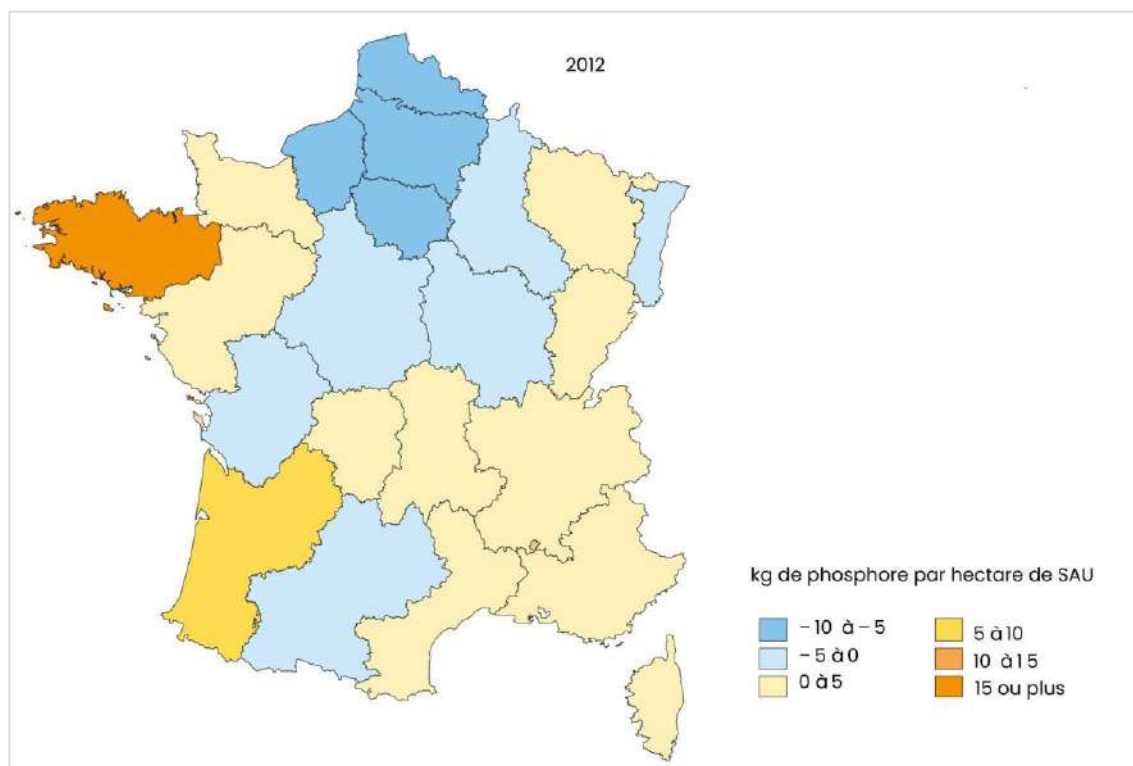


Figure 25 : Bilan régional du phosphore

Source : CEP MAAF, Agreste, Citepa, Unifa, Comifer citées dans GraphAgri France 2015, p. 98

Longtemps importés bruts en France¹³⁹, les phosphates naturels sont aujourd'hui transformés sur place par les pays producteurs produisant eux-mêmes les différents engrais phosphatés. Les fournisseurs de la France sont principalement le Maroc (les gisements étant essentiellement situés au Sahara occidental, ce qui n'est pas sans

¹³³ Demay J., Ringeval B., Pellerin S et al. (2023). Half of global agricultural soil phosphorus fertility derived from anthropogenic sources. Nature Geoscience. 5 January 2023

¹³⁴ Danino-Perraud R., « Phosphates et agriculture : de la géologie à la géopolitique », Sébastien Abis éd., *Le Déméter 2021*. IRIS éditions, 2021, pp. 95-113

¹³⁵ <https://agriculture.gouv.fr/vers-une-gestion-durable-du-phosphore-ressource-critique-pour-lagriculture-analyse-ndeg-93>

¹³⁶ <https://factuel.univ-lorraine.fr/node/9061>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004896971831876X?via%3Dihub>

¹³⁷ En considérant le tracé des régions prévalant jusqu'à la dernière réforme territoriale. Ces territoires ne s'inscrivent que dans 8 régions en suivant le découpage actuel.

¹³⁸ Demay J., Ringeval B., Pellerin S et al. (2023). Half of global agricultural soil phosphorus fertility derived from anthropogenic sources. Nature Geoscience. 5 January 2023

¹³⁹ <https://lelementarium.fr/product/acide-phosphorique/>

implication géopolitique¹⁴⁰), abritant 70 % des réserves mondiales, et la Tunisie. Au niveau mondial, de nouvelles perspectives s'ouvrent néanmoins au regard de la découverte récente de vastes gisements de phosphates en Norvège (estimés à 70 milliards de tonnes)¹⁴¹.

Si les livraisons de phosphore et de potasse ont suivi celles des engrais minéraux azotés jusqu'aux années 1990, elles sont désormais revenues à leur niveau des années 1950-1960¹⁴². Concernant le phosphore, les livraisons ont représenté environ 450 000 tonnes d'engrais¹⁴³ pour la campagne 2020/2021, mais ont reculé à 346 000 tonnes pour la campagne 2021/2022 (- 23 %), puis à 225 600 tonnes en 2022/2023 (- 35 %), dans le contexte de forte hausse des prix au début de la guerre en Ukraine.

Cet exemple du phosphore illustre la fracture métabolique qui s'est instaurée entre lieux de production et lieux de consommation de la biomasse agricole, notamment alimentaire. Jusqu'au XIX^{ème} siècle, le retour des nutriments au sol était assuré par le transfert des déjections humaines et animales et des résidus des abattoirs et des activités industrielles des villes vers les campagnes, dans cette « *quête incessante d'engrais pouvant compléter les fumiers de ferme jugés insuffisants* »¹⁴⁴. **L'éloignement des zones de consommation alimentaire des zones d'épandage possibles, du fait de l'urbanisation, et l'invention du tout-à-l'égout pour le traitement des eaux usées ont accru les besoins de fertilisation minérale par le non-retour au sol des déchets organiques, tandis que les nutriments sont en partie perdus dans les rivières et océans.** L'obligation de collecte des biodéchets depuis le 1^{er} janvier 2024 laisse toutefois présager d'un meilleur recyclage dans les prochaines années.

L'origine du soufre et du cuivre mobilisés en agriculture¹⁴⁵

L'origine du soufre et du cuivre, ressources principalement utilisées en agriculture biologique, n'est pas souvent retracée, alors que des **origines fossiles et/ou minières** sont mises en évidence.

Le soufre est utilisé pour deux applications principales en agriculture, d'une part en qualité de fertilisant des cultures (nutriment indispensable à la synthèse protéique), d'autre part en qualité de fongicide. Dans la pratique, 1/3 des vignes françaises et 15 % des surfaces arboricoles étaient traitées en 2007 à l'aide de soufre élémentaire sous différentes formes (triturerées, micronisées, sublimées). Or, ce soufre est principalement issu de la purification du gaz naturel ou de la désulfuration des pétroles bruts.

Quant au cuivre, il se retrouve principalement sous forme de chlorure ou de sulfate, à l'instar de la bouillie bordelaise pulvérisée en vue de protéger les vignes ou certains légumes face au mildiou et autres pressions fongiques. Le cuivre n'est pas d'origine fossile, mais provient pour l'essentiel de gisements miniers dont l'exploitation se révèle polluante (pollution de l'eau, déforestation, etc.)¹⁴⁶.

C. Une dépendance aux importations de soja pour l'alimentation animale

Le système agricole français est soumis à la forte dépendance d'importations de protéines végétales, en provenance du continent américain, à destination des animaux d'élevage. Cette dépendance est la conséquence directe de choix politiques passés. Dans le contexte de la décolonisation qui modifie les flux

¹⁴⁰ Territoire revendiqué par le Royaume marocain et les indépendantistes sahraouis fédérés au sein du Front Polisario (bénéficiant du soutien de l'Algérie).

¹⁴¹ <https://www.geo.fr/environnement/decouverte-norvege-gisement-phosphate-suffisant-pour-100-ans-batteries-panneaux-solaires-penurie-helleland-215543>

¹⁴² <https://agriculture.gouv.fr/geographie-economique-des-secteurs-agricole-et-agroalimentaire-francais-quelques-grandes-tendances>

¹⁴³ https://www.unifa.fr/sites/default/files/2022-09/livraisons-des-engrais-en-france-metropolitaine_2020-2021-regions_0.pdf

¹⁴⁴ <https://www.cairn.info/revue-pour-2018-4-page-49.htm>

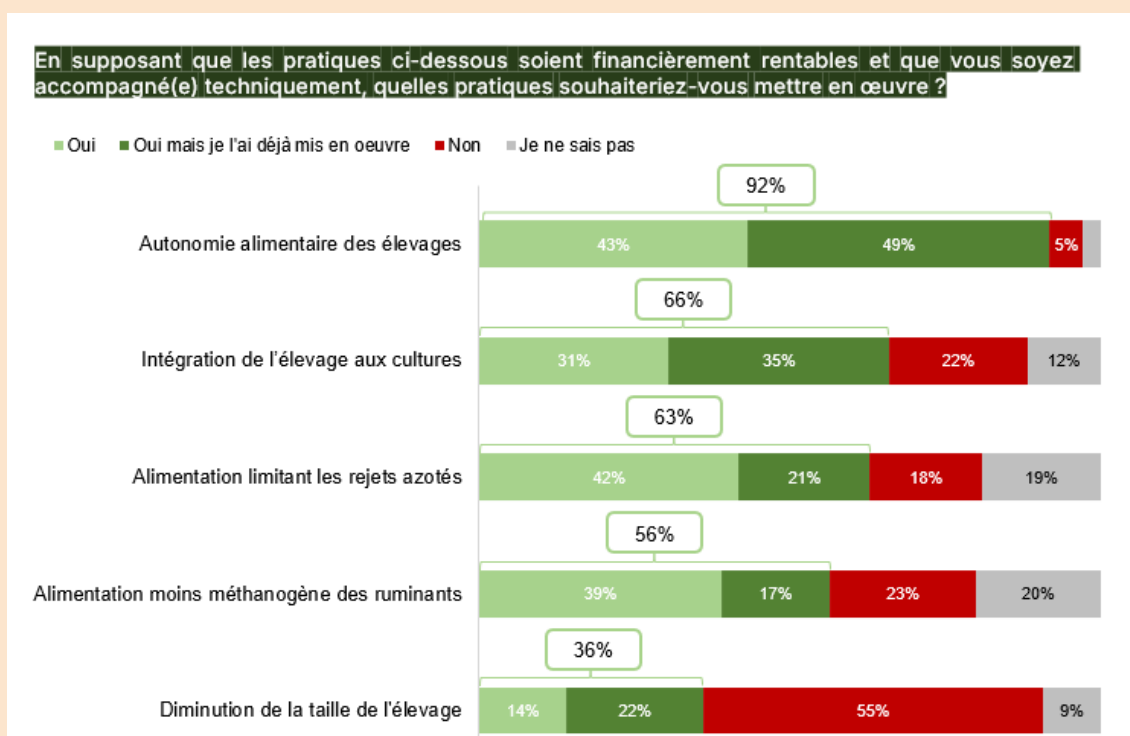
¹⁴⁵ Source : Elementarium

¹⁴⁶ <https://www.sorevo.com/recyclage-du-cuivre-plus-qu'une-simple-preservation-des-ressources-naturelles#:~:text=Une%20extraction%20polluante,la%20pollution%20de%20l'eau.>

de graines oléagineuses à l'échelle mondiale¹⁴⁷, des accords commerciaux laissent à l'Europe le libre accès au soja des États-Unis en échange de la possibilité de protection des marchés céréaliers européens, puis de la limitation de la production d'oléagineux en Europe via l'Accord de Blair House de 1992. La modernisation de l'élevage européen se développe alors en partie sur la base du modèle américain dit « maïs-soja », qui associe l'apport énergétique du maïs aux apports protéiques¹⁴⁸ du soja dans la ration des vaches laitières. L'apport protéique pour les élevages de monogastriques devient également rapidement (le plus) dépendant du soja importé (voir ci-dessous).

D'après la Grande Consultation des Agriculteurs¹⁴⁹, cette dépendance est problématique pour les éleveurs, puisqu'ils sont 92 %* à déclarer avoir mis en place ou souhaiter mettre en place l'autonomie alimentaire des élevages si cette démarche était rentable et s'ils étaient accompagnés techniquement.

*Pourcentage calculé sur la base de la totalité des répondants hormis ceux ayant déclaré n'être pas concernés par cette démarche.



Malgré des politiques de soutien successives via des « Plans Protéines »¹⁵⁰ et une baisse de la consommation depuis les années 2000, la France reste toujours déficitaire en protéines végétales et a importé en 2023 environ 2,7 millions de tonnes de tourteaux de soja et près de 400 000 tonnes de graines de soja, les deux tiers environ provenant désormais du Brésil¹⁵¹. Ce soja, dont la traçabilité est difficile à garantir, est issu dans certains cas de cultures résultant de la déforestation et utilisant de grandes quantités d'herbicides. 8,2 millions d'hectares ont ainsi été déboisés pour le soja entre 2000 et 2015, dont 97 % en Amérique du Sud. Les estimations montrent qu'environ 1,5 % du soja annuellement produit au Brésil serait issu de la conversion directe d'écosystèmes naturels dans les cinq années précédentes (hors conversion indirecte, c'est-à-dire le fait que la conversion de pâturages en culture de soja puisse repousser les activités

¹⁴⁷ Berlan J.-P., Bertrand J.-P., Lebas L., Marlon M., 1976. Les conditions de la concurrence internationale entre soja, arachide et colza. In : Économie rurale. N°11, Les produits alimentaires stratégiques - deuxième partie, pp. 10-22

¹⁴⁸ Avec 35 % de protéines dans la graine à maturité, le soja est la plante la plus riche en protéines.

¹⁴⁹ Résultats de la Grande Consultation des Agriculteurs 2024, <https://theshiftproject.org/article/resultats-grande-consultation-des-agriculteurs/>

¹⁵⁰ <https://www.terresuniviva.fr/decouvrir-terres-univiva/l-interprofession/historique>

¹⁵¹ <https://www.franceagrimer.fr/fam/content/download/72952/document/MOL-0124.pdf?version=1>

d'élevage extensif vers d'autres lieux où les zones de végétation naturelle sont converties en pâturages). Cependant cette conversion indirecte est un phénomène majeur : 60 % des terres déboisées en Amazonie brésilienne le sont pour des pâturages. **Près de 50 % des approvisionnements de soja vers la France présenteraient un risque de contenir du soja issu de la conversion (occasionnant de la déforestation)**¹⁵². Du fait de ces tonnages conséquents, le soja est la denrée agricole importée qui pèse le plus lourd dans l'empreinte surface (ou empreinte terre : surface nécessaire dans les pays producteurs pour satisfaire les importations) du système agroalimentaire¹⁵³, et pour plus de 40 %¹⁵⁴ de l'empreinte des matières premières à risque de déforestation.

Sur les cinq dernières années, la production française de soja n'atteint qu'environ 400 000 tonnes, avec un rendement de l'ordre de 25 quintaux/hectare sur une surface de 154 à 187 000 hectares¹⁵⁵.

L'autonomie protéique de l'élevage français est parfois définie comme le rapport entre la production totale française de protéines végétales et les protéines nécessaires à l'alimentation des cheptels français, cependant cette approche ne tient pas compte de la part de production française de protéines non disponible pour l'alimentation animale car destinée à d'autres débouchés. Une définition de l'autonomie protéique de l'élevage français plus proche des flux de matières premières et de leurs filières consommatrices a été proposée par le GIS Élevage, comme étant le rapport entre les protéines d'origine française consommées en alimentation animale et les protéines nécessaires à l'alimentation des cheptels français. Avec cette approche, **l'autonomie de l'élevage français en MRP** (matières premières contenant plus de 15 % de protéines, c'est-à-dire tourteaux, graines oléagineuses et protéagineuses, coproduits céréaliers et luzerne déshydratée) **est de seulement 43 % en 2015**¹⁵⁶.

Selon les filières d'élevage (ruminants ou monogastriques), les besoins - et de fait l'autonomie - protéiques diffèrent. Ainsi en 2015, les animaux les plus consommateurs de soja sont les volailles (44 % des tonnages) du fait de besoins protéiques plus élevés, puis suivent les bovins laitiers et mixtes (36 %), les bovins viande (8 %) et les porcs (6 %)¹⁵⁷.

En alimentation animale, une autre dépendance critique existe, celle de l'approvisionnement en lysine. Cet acide aminé est en effet un facteur limitant pour la croissance des animaux d'élevage (le premier acide aminé limitant pour les porcs, le deuxième pour les volailles, le premier ou le second avec la méthionine pour les ruminants), et il n'existe plus qu'une seule usine productrice de cet acide aminé essentiel encore en fonctionnement en Europe (MetEx à Amiens, récemment reprise par le groupe Avril).

D. Une diversité domestique à la base génétique restreinte

L'agriculture contemporaine repose sur un nombre restreint de plantes cultivées et de races animales. Les gains de production agricole du XX^{ème} siècle ont en effet reposé sur la sélection génétique de plantes cultivées et de races animales les plus productives dans le contexte technique de l'époque : variétés de plantes à haut rendement répondant efficacement à l'intensification de la fertilisation et de la protection phytosanitaire, cépages les plus performants, races animales issues de schémas de sélection exigeants via le recours à des reproducteurs d'élite. Outre les gains de productivité obtenus, ce travail de sélection a permis de s'affranchir de certaines maladies autrefois très préjudiciables aux récoltes, par exemple l'anthracnose sur haricots, ou de proposer des variétés plus résistantes à des maladies fréquentes, telles que la septoriose et les fusarioses en céréales, et garantir ainsi plus facilement la qualité sanitaire des récoltes.

¹⁵² CST Forêt (Trase, Canopée, IDDRI), <https://www.deforestationimportee.ecologie.gouv.fr/>

¹⁵³ SOLAGRO, 2022. La face cachée de nos consommations, Quelles surfaces agricoles et forestières importées ?

¹⁵⁴ https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2023-12/etudes_1_importations_sndi_decembre%202023_0.pdf

¹⁵⁵ <https://www.franceagrimer.fr/fam/content/download/72952/document/MOL-0124.pdf?version=1>.

¹⁵⁶ <https://hal.inrae.fr/hal-03128009v1>

¹⁵⁷ <https://hal.inrae.fr/hal-03128009v1>

Mais le revers de la médaille a été l'érosion de la diversité des plantes cultivées et des races animales, dont la base génétique est devenue plus étroite. En céréales, les « variétés populations » ont laissé la place aux lignées pures modernes qui conservent entre elles une grande proximité génétique. Une étude de cas menée sur le blé tendre¹⁵⁸ montre par exemple que, malgré l'effort de création variétale et la multiplication du nombre de variétés disponibles, cette augmentation n'a pas empêché l'homogénéisation de la diversité génétique cultivée dans les champs (sans présager d'une érosion au sens strict, au sens d'une perte d'allèles). En 2023, alors qu'il en existe plus de 400 variétés inscrites sur les listes du catalogue officiel français¹⁵⁹, dont 43 nouvelles en 2022 (flux de nouveauté assez récurrent d'une année sur l'autre), seulement cinq variétés de blé tendre cultivées en semis pur ont représenté 34 % des surfaces nationales, 10 variétés ont représenté plus de 40 %, la variété Chevignon occupant à elle seule 16 % des surfaces nationales¹⁶⁰. Cependant, les agriculteurs recourent de plus en plus aux mélanges variétaux, sur presque 20 % des surfaces aujourd'hui, encouragés par les travaux de la recherche agronomique (projet Wheatamix¹⁶¹ de l'INRAE).

Autre exemple en fruits et légumes : selon le Groupe d'Étude et de contrôle des Variétés et des Semences (GEVES), 384 variétés végétales sont considérées comme sous-utilisées¹⁶² (parmi les 3 259 inscrites sur les listes du catalogue officiel en 2022).

En élevage, les filières se sont concentrées sur un nombre réduit de races par rapport à la diversité initiale, fortement corrélée à la diversité des agroécosystèmes français. Sur 200 races locales identifiées en France pour 12 espèces (cheval, âne, bovin, mouton, chèvre, porc, poule, dinde, pintade, oie, canard commun et canard de Barbarie), 168 (84 %) sont aujourd'hui considérées comme menacées d'abandon¹⁶³.

Chez les races les plus compétitives comme par exemple la Prim'Holstein en élevage bovin, les schémas de sélection et de reproduction, accélérés par les techniques de génomique, entraînent aujourd'hui une perte préoccupante de diversité génétique et des conséquences directes sur la productivité des animaux par consanguinité¹⁶⁴. Ceci n'est pas vrai cependant pour d'autres races comme la Normande ou la Montbéliarde pour lesquelles la génomique est utilisée avec plus de prudence. Les pratiques de sélection se distinguent d'ailleurs entre élevage bovin viande et bovin lait où l'insémination artificielle est beaucoup plus répandue.

Cette tendance à l'homogénéisation génétique pose la question de la fragilité des systèmes agricoles actuels, reposant principalement sur un nombre restreint de plantes et de races animales, et de leur faculté de résilience et d'adaptation aux changements globaux à affronter simultanément (pathogènes, conditions climatiques, etc.).

E. Une dépendance à l'usage de produits phytosanitaires

La protection des cultures est une préoccupation historique de l'agriculture. On retrouve ainsi la trace de pratiques comme l'échenillage, l'échardonnage, ou le hannetonnage dans des manuels agricoles, édits et autres documents administratifs des XVIII^{ème} et XIX^{ème} siècles¹⁶⁵. Avec les progrès de la chimie et des sciences agronomiques, les produits phytosanitaires de synthèse se sont petit à petit généralisés tout au long de la seconde moitié du XX^{ème} siècle. **Faciles d'utilisation, efficaces face aux problèmes rencontrés (champignons, insectes ravageurs, adventices concurrentes¹⁶⁶, etc.), réduisant les besoins en main d'œuvre et à coût accessible, ils ont contribué significativement à la hausse de la production agricole française,** accompagnant la sélection de variétés à hauts rendements en mesure de mieux valoriser les apports d'engrais azotés.

¹⁵⁸ https://www.fondationbiodiversite.fr/wp-content/uploads/2019/05/frb_etude_bl_web.pdf

¹⁵⁹ <https://www.geves.fr/catalogue/>

¹⁶⁰ <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/repartition-des-varietes-de-cereales-paille-les-resultats-de-lenquete-2023-sont>

¹⁶¹ <https://wheatamix.hub.inrae.fr>

¹⁶² <https://www.geves.fr/wp-content/uploads/Rapport-RPG-v23-Juin-2023.pdf>

¹⁶³ <https://agriculture.gouv.fr/races-menacees-dabandon-pour-lagriculture>

¹⁶⁴ <https://www.web-agri.fr/holstein/article/859795/prim-holstein-on-va-tuer-la-race-si-on-n-y-prend-pas-garde>, consulté le 06/02/2024

¹⁶⁵ <https://www.academie-agriculture.fr/sites/default/files/sections/fichiers-privés/methodesanciennes-jean-louisbernard.pdf>

¹⁶⁶ Espèce végétale étrangère à la flore cultivée sur une parcelle et s'introduisant de manière non planifiée (mauvaises herbes)

Il existe aussi des phytosanitaires d'origine naturelle autorisés en agriculture biologique, comme par exemple le spinosad¹⁶⁷ d'origine microbienne ou l'azadirachtine¹⁶⁸ extraite du margousier (Neem), deux molécules aux propriétés insecticides.

Cependant, ces produits phytosanitaires peuvent aussi être à l'origine d'effets délétères sur l'environnement (effets biocides sur des espèces non-cibles, contamination des milieux, érosion des ressources alimentaires pour la faune sauvage et particulièrement les insectes, etc.) et sur la santé humaine. Pour ces deux motifs, de nombreuses substances aux effets particulièrement néfastes ont été retirées du marché. Entre 2008 et 2020, le nombre de substances actives contenues dans au moins un produit phytosanitaire est ainsi passé de 425 à 323¹⁶⁹. Les substances actives les plus dangereuses pour la santé (CMR1 : cancérigènes, mutagènes et reprotoxiques de catégorie 1, avérées ou présumées) ont progressivement été retirées du marché et leurs ventes ont diminué de 95 % depuis 2015¹⁷⁰.

L'étude de la Grande Consultation des Agriculteurs¹⁷¹ fait ressortir que **plus de 70 %* des agriculteurs sont préoccupés pour leur santé, pour l'environnement, et pour la santé humaine en générale par l'utilisation de produits phytosanitaires.**

En supposant que ces pratiques soient financièrement rentables et qu'ils soient accompagnés techniquement...88 %* souhaitent diminuer l'usage de produits phytosanitaires.

**Ces pourcentages ont été calculés sur la base de la totalité des répondants hormis ceux ayant déclaré n'être pas concernés par ces pratiques.*

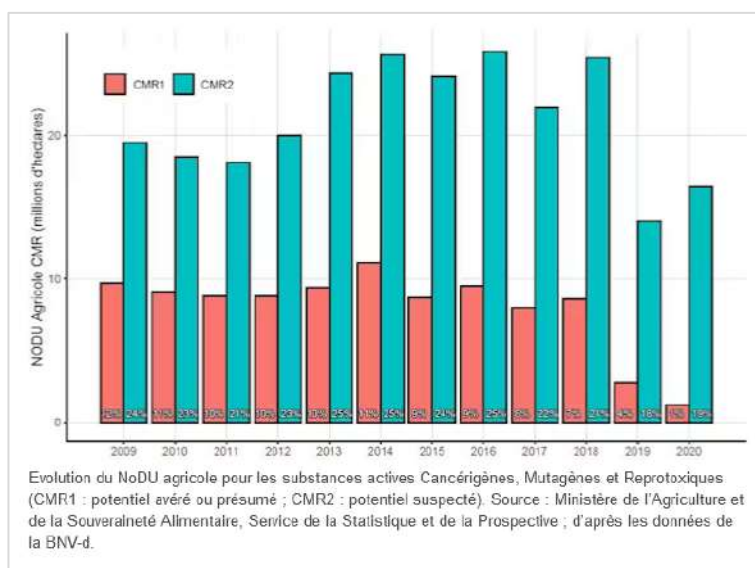


Figure 26 : Évolution du NoDU agricole pour les substances actives Cancérigènes, Mutagènes et Reprotoxiques
 Source : Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire, Service de la Statistique et de la Prospective

a. Consommation actuelle de produits phytosanitaires

Sur la période 2014-2021, la consommation moyenne de substances actives, toutes substances confondues, s'élève à environ 68 000 tonnes, selon la Base Nationale des Ventes des Distributeurs de produits phytosanitaires, ou BNVD. Parmi ceux-ci, le soufre (également utilisé en agriculture biologique) est en tonnage le produit le plus massivement vendu pour ses propriétés antifongiques, suivi par le glyphosate et le

¹⁶⁷ https://abiodoc.docressources.fr/doc_num.php?explnum_id=345

¹⁶⁸ <https://www.medecinesciences.org/fr/articles/medsci/pdf/2020/01/msc190214.pdf>

¹⁶⁹ <https://www.agra.fr/agra-presse/le-nombre-de-pesticides-autorises-divise-par-deux-en-dix-ans>

¹⁷⁰ <https://agriculture.gouv.fr/strategie-ecophyto-2030>

¹⁷¹ Résultats de la Grande Consultation des Agriculteurs 2024, <https://theshiftproject.org/article/resultats-grande-consultation-des-agriculteurs/>

prosulfoarbe qui sont des herbicides (le soufre utilisé comme fertilisant n'est normalement pas pris en compte dans la BNVD).

Les quantités de substances actives achetées en France étaient restées relativement stables ces dix dernières années, mise à part une faible variabilité annuelle dépendant des conditions météorologiques et des politiques publiques. En 2018 par exemple, de fortes pluies au printemps combinées à la prévision de la hausse de la RPD (Redevance Pollution Diffuse) l'année suivante ont entraîné davantage d'achats, expliquant une partie de la baisse des ventes en 2019. **Le bilan présenté à l'occasion de la présentation de la nouvelle stratégie Ecophyto 2030 publiée en mai 2024¹⁷² met en avant une baisse de l'usage des produits phytosanitaires :**

- dynamique de baisse sur les ventes de substances actives (hors agriculture biologique et biocontrôle¹⁷³) avec un retrait de 20 % en 2022 par rapport à la moyenne 2015-2017,
- hausse continue sur les ventes de substances autorisées en agriculture biologique ou de biocontrôle avec une augmentation de 55 % par rapport à la moyenne 2015-2017.

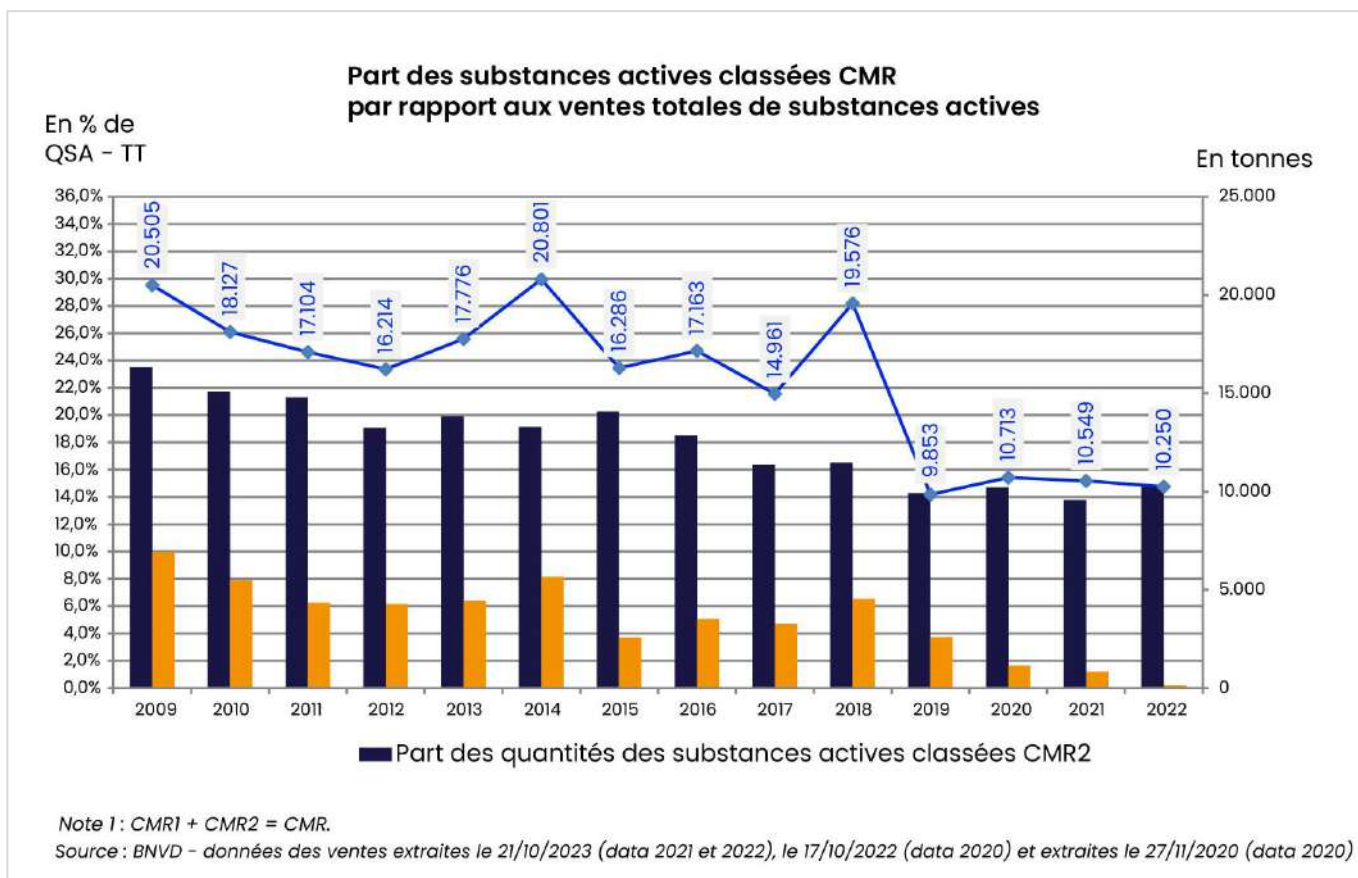


Figure 27 : Évolution des quantités totales de substances actives vendues par type d'usages

Source : BNVD – Ventes au code commune Insee des distributeurs, extraites le 17 mai 2022. Traitements : OFB, 2022 ; SDES, 2022.

¹⁷² <https://agriculture.gouv.fr/strategie-ecophyto-2030>

¹⁷³ <https://agriculture.gouv.fr/quest-ce-que-le-biocontrrole>

Indicateurs de suivi de la consommation des produits phytosanitaires

La définition d'indicateurs quantitatifs¹⁷⁴ est nécessaire pour éclairer les décisions et assurer le suivi des politiques publiques. Idéalement, ces indicateurs doivent permettre de décrire :

- l'intensité de l'utilisation des produits phytopharmaceutiques,
- les services agronomiques rendus par les produits phytopharmaceutiques,
- les risques pour la santé humaine,
- les risques pour la biodiversité.

Or, par nature imparfait, chaque indicateur ne peut à lui seul rendre compte de la complexité de la question. La comptabilité des ventes ne décrit qu'imparfaitement la toxicité des produits. Un indicateur spécifique de toxicité pose le problème de la définition des écosystèmes et espèces considérées (humains, insectes, faune du sol, faune aquatique...), se distinguant par leur exposition et leur sensibilité aux différentes substances actives. Plusieurs indicateurs sont ainsi proposés.

En France, la création en 2008 de la RPD (redevance pour pollutions diffuses), taxe payée par les utilisateurs de produits phytosanitaires, a permis l'enregistrement des ventes de produits par année civile dans une base de données (Base Nationale des Ventes des Distributeurs de produits phytosanitaires). Il faut noter que cette mesure des ventes ne permet pas de suivre les pratiques de traitement en temps réel : les produits peuvent être achetés à l'avance et leur utilisation est adaptée aux observations des parcelles et des cultures (présence et stade des adventices, maladies, ravageurs...).

La quantité de substance active (QSA)

La QSA correspond à la masse totale de substances actives dans les produits vendus au cours d'une année civile. Elle additionne donc des substances ayant des doses d'application par hectare très différentes, pouvant varier d'un facteur de 1 à 100, y compris au sein d'une même classe de produits (par exemple certains herbicides sont actifs à quelques grammes par hectare, d'autres à un kilo ou plus par hectare).

Le nombre de doses unité (NoDU)

Historiquement construit pour pallier les faiblesses de la QSA et corriger le problème de la diversité des doses auxquelles sont utilisées les substances actives, le NoDU¹⁷⁵ est l'indicateur de référence du plan Ecophyto depuis sa création en 2008. Il divise chaque quantité de substance commercialisée par une dose de référence à l'hectare, la « dose unité » (DU), et correspond ainsi à la somme des surfaces qui seraient traitées à ces doses de référence. Le calcul de la DU repose sur les doses maximales homologuées, validées par l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES)¹⁷⁶ sur la base de l'efficacité et de la toxicité et écotoxicité de chaque produit.

Le calcul des DU est très complexe car une matière active peut être présente dans différents produits commercialisés, chaque produit pouvant être homologué sur différentes cultures, pour différents usages, et potentiellement à différentes doses. La DU est aujourd'hui définie par la moyenne des maxima, par culture, des doses homologuées pour une substance une année civile donnée, cette moyenne étant pondérée par la surface relative de chaque culture en France. Pour simplifier ce calcul et la compréhension de l'indicateur, les membres du Comité Scientifique et Technique du plan Ecophyto proposent de calculer la DU d'une substance active comme la médiane de toutes ses doses homologuées.

Les indicateurs européens HRI

D'autres indicateurs ont été proposés au niveau européen, les HRI-1 et 2¹⁷⁷ (Harmonized Risk Indicator). Ils prennent en compte la masse de substances actives en les pondérant selon leur appartenance à des groupes de risque : coefficient de 1 pour les substances de faible risque, 8 pour les substances autorisées, 16 pour les substances dont l'interdiction est envisagée, 64 pour les substances interdites.

Pour le Comité Scientifique et Technique du plan Ecophyto, ces indicateurs européens sont problématiques car d'une part les masses calculées ne sont pas rapportées à des doses d'utilisation, d'autre part les valeurs de pondération utilisées sont arbitraires et non étayées scientifiquement. De plus, pour la France, environ 80 % des substances vendues sont par défaut classées dans le second groupe (substances autorisées), le classement étant donc peu discriminant.

¹⁷⁴ <https://theconversation.com/plan-ecophyto-tout-comprendre-aux-annonces-du-gouvernement-223571>

¹⁷⁵ <https://agriculture.gouv.fr/quest-ce-que-le-nodu>

¹⁷⁶ Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

¹⁷⁷ <https://agriculture.gouv.fr/les-indicateurs-de-risque-harmonises-etablis-au-niveau-europeen>

b. Différentiel de productivité entre traité et non traité

Les produits phytosanitaires sont utilisés pour sécuriser les rendements et la qualité sanitaire des productions, en empêchant la destruction des cultures par des organismes indésirables ou en limitant la concurrence de plantes adventices. Ils contribuent à stabiliser la production et donc le revenu agricole. En revanche, ils peuvent entraîner la présence de résidus de molécules dans les produits agricoles ainsi que dans les sols, l'air et les milieux aquatiques environnants (eaux souterraines et superficielles).

Le différentiel de productivité entre des cultures traitées ou non traitées par des produits phytosanitaires n'est pas estimable de façon globale, puisqu'il dépend d'un grand nombre de facteurs : des espèces végétales, des variétés utilisées, des conditions météorologiques de l'année, du contexte pédoclimatique, des techniques culturales, etc.

Par ailleurs, dans la mesure où les systèmes culturaux conventionnels se sont en partie structurés avec l'utilisation des produits phytosanitaires (sélection génétique, itinéraires techniques, etc.), il n'est pas facile de comparer les systèmes avec et sans produits phytosanitaires de synthèse, toutes choses égales par ailleurs. La comparaison avec les rendements obtenus par l'agriculture biologique ne permet pas d'isoler la part de gain apportée par les produits phytosanitaires, car l'Agriculture Biologique permet l'utilisation d'un certain nombre de substances pour protéger les cultures (comme le sulfate de cuivre ou le soufre), mais, surtout, exclut également la fertilisation azotée minérale et repose sur des rotations de culture différentes et souvent plus longues.

À titre d'exemple néanmoins, concernant le blé tendre en agriculture conventionnelle, un indicateur donne une estimation des différences de rendement avec ou sans traitement fongicide pour lutter contre les maladies du feuillage au printemps : l'écart « traité-non traité » estime la nuisibilité des maladies foliaires entre 10 et plus de 30 quintaux par hectare (pour un rendement moyen de 72 qx/ha, soit une diminution de 14 % à 42 % des rendements) selon la rusticité des variétés¹⁷⁸, généralement inversement proportionnelle à leur productivité. Autre exemple, en production de noisettes conventionnelles, l'absence de traitement insecticide contre le balanin peut, certaines années, entraîner une diminution du rendement de 80 %¹⁷⁹.

c. Le développement de résistances

L'apparition continue de résistances aux produits phytosanitaires chez les organismes cibles réduit progressivement leur efficacité. Les résistances apparaissent en moyenne au bout de 7 ans après la mise sur le marché du produit, mais elles peuvent être plus rapides pour certaines molécules (par exemple les sulfonilurées)¹⁸⁰. Comme pour les antibiotiques, les résistances se généralisent rapidement chez les populations de nuisibles lorsque le produit est utilisé souvent (peu de rotation des cultures par exemple, ou molécule peu efficace et peu persistante et donc nécessitant d'être pulvérisée plusieurs fois). Le nombre de substances phytosanitaires autorisées ayant tendance à se réduire, les résistances des bioagresseurs aux produits phytosanitaires risquent d'augmenter si cette évolution se poursuit.

Ces effets peuvent être accrus en contexte de changement climatique, phénomène déjà avéré pour certaines graminées problématiques en cultures céréalières comme par exemple les vulpins, d'autant plus que les hivers moins rigoureux favorisent des levées beaucoup plus échelonnées qu'auparavant : la persistance d'action des herbicides appliqués à l'automne ne suffit plus à couvrir la période de germination des vulpins¹⁸¹.

¹⁷⁸ <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/une-resistance-varietale-exploiter-pleinement>

¹⁷⁹ https://abiodoc.docressources.fr/doc_num.php?explnum_id=4486

¹⁸⁰ Christian Huyghe, directeur scientifique agriculture à l'INRAE, Commission d'enquête parlementaire, 12 juillet 2023

¹⁸¹ <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/des-levees-de-vulpin-qui-sechelonnet-de-plus-en-plus>

d. Les difficultés et les impasses techniques à la suppression de certains produits phytosanitaires

Face aux enjeux techniques, environnementaux et sociétaux liés à leur utilisation, des objectifs de réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires ont été fixés par les pouvoirs publics via des plans d'actions successifs. Initialement lancés en 2008, ces plans « Ecophyto », qui visaient une réduction de 50 % des utilisations en 2018, échéance ensuite reculée à 2025, n'ont pas atteint leurs objectifs.

Fin 2023, les pouvoirs publics ont souhaité se doter d'un nouveau programme, le **Plan d'action stratégique pour l'anticipation du potentiel retrait européen des substances actives et le développement de techniques alternatives pour la protection des cultures (PARSADA)**¹⁸². Il s'agit de donner de la visibilité aux agriculteurs pour les usages sous tension, reposant sur des produits phytopharmaceutiques en risque d'être retirés du marché dans les années à venir, et d'identifier de nouveaux leviers pour protéger les récoltes, tout en préservant la santé et l'environnement. Décliné en différents plans d'action élaborés par les filières, il identifie un certain nombre de fragilités et d'impasses technico-économiques en cas de suppression européenne de substances actives clés, telles que la gestion des graminées en grandes cultures, la gestion des insectes ravageurs de la famille des coléoptères en semences et en plants, ainsi que lors du stockage des grains, mais aussi le mildiou et le black-rot en viticulture, la gestion des adventices mais aussi des lépidoptères en horticulture et en fruits et légumes, etc. Un plan d'action national est également prévu contre *Drosophila Suzukii*, ravageur arrivé en Europe en 2008 et provoquant des dégâts significatifs dans la filière cerise depuis l'interdiction d'une matière active, le diméthoate, utilisé à cet effet jusqu'en 2016. En agriculture biologique, un plan d'action spécifique concerne la gestion des maladies fongiques par des produits à base de cuivre dont l'accumulation dans le sol est toxique pour les organismes vivants.

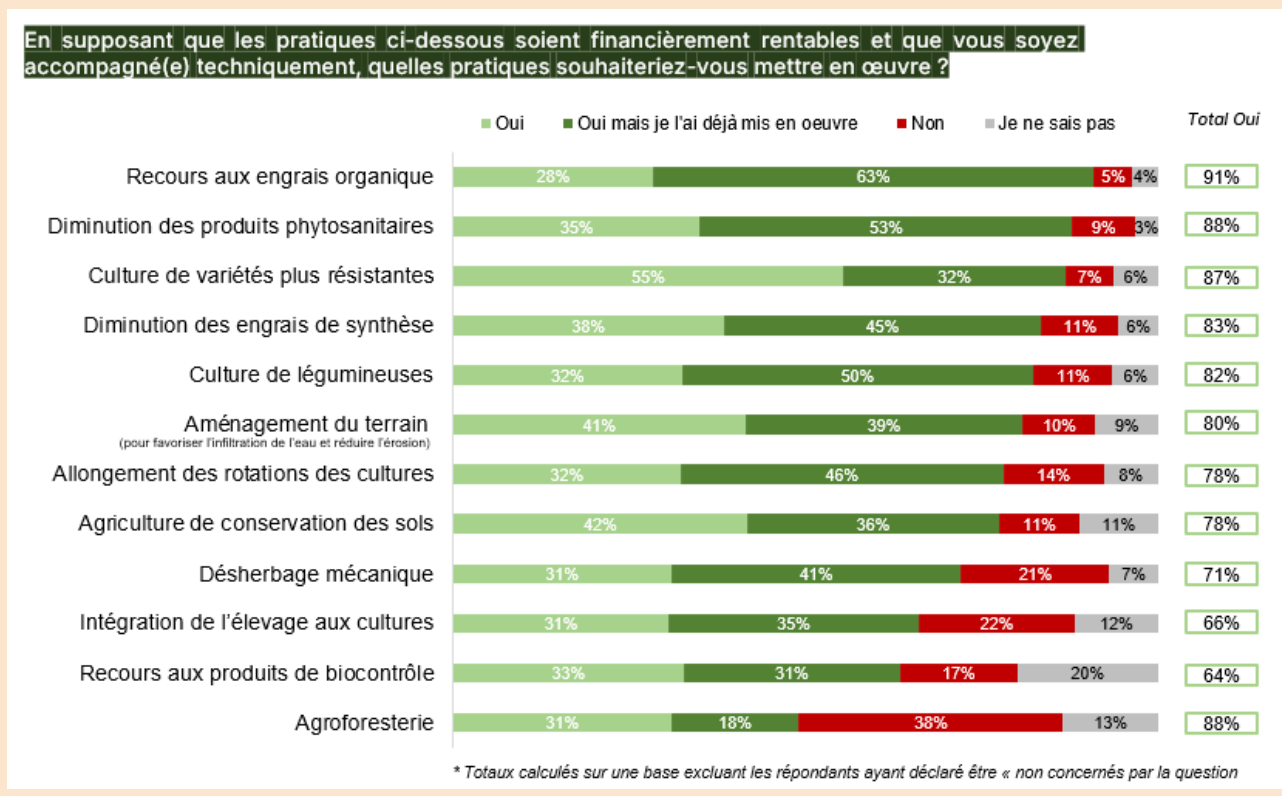
e. Production intégrée et agroécologie : une réponse permettant de réduire l'usage des phytosanitaires

Un certain nombre de pratiques agricoles et agronomiques, regroupées sous les termes de **production intégrée des cultures et d'agroécologie**, visent à combiner différents leviers pour prévenir l'usage des **phytosanitaires** : la lutte ou protection intégrée, officiellement recommandée par le Règlement européen de 2009 concernant la mise sur le marché des produits phytopharmaceutiques¹⁸³.

¹⁸² <https://agriculture.gouv.fr/plan-daction-strategique-pour-lanticipation-du-potentiel-retrait-europeen-des-substances-actives-et>

¹⁸³ <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:309:0001:0050:FR:PDF>

La très grande majorité des agriculteurs sont favorables à ce type de pratiques et souhaiteraient mettre en place ces pratiques agroécologiques si celles-ci étaient rentables financièrement et s'ils étaient accompagnés techniquement, comme illustré par le graphe ci-dessous.¹⁸⁴



Mais elle reste insuffisamment déployée en raison de nombreux freins techniques (protection des rendements), économiques (surcoûts, manques à gagner), et sociaux (acceptabilité, changements de pratiques, charge de travail, etc.). Ainsi, une étude française publiée en 2014¹⁸⁵ a estimé que **les pertes de rendements de blé français résultant d'une baisse de moitié de l'IFT (Indice de Fréquence de Traitement) et d'une redirection vers des systèmes de culture à protection intégrée se situeraient entre 5 % et 13 %**. L'étude précise en outre que ce choix induirait une perte financière pour les producteurs agricoles, à prix du blé et des produits phytosanitaires constants, et ce malgré l'économie réalisée sur les achats de produits phytosanitaires. Cette étude, mais aussi le principe de prix plus élevé des aliments issus de l'agriculture biologique, illustrent qu'**une partie importante des réponses aux enjeux de réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires se situe autour des questions liées à la rémunération des agriculteurs**, et pose ainsi de nombreuses questions sociétales plus larges : arbitrages budgétaires de consommation des foyers, gestion du risque, sécurité alimentaire.

Selon les cultures, l'amélioration des techniques de biocontrôle¹⁸⁶ peut permettre le déploiement de méthodes alternatives de protection des végétaux : basées sur l'étude des interactions entre espèces dans le milieu naturel, elles utilisent des organismes vivants, des médiateurs chimiques tels que des phéromones ou encore des substances naturelles d'origine minérale, animale ou végétale. Ces méthodes de biocontrôle, dont certaines sont encore en voie de développement, peuvent notamment être mobilisées de manière combinée à d'autres leviers (prophylaxie, moyens mécaniques ou chimiques) dans le cadre d'une reconception des itinéraires techniques.

¹⁸⁴ Résultats de la Grande Consultation des Agriculteurs 2024, <https://theshiftproject.org/article/resultats-grande-consultation-des-agriculteurs/>

¹⁸⁵ Hossard, L., Philibert, A., Bertrand, M. *et al.* Effects of halving pesticide use on wheat production. *Sci Rep* 4, 4405 (2014)

¹⁸⁶ <https://agriculture.gouv.fr/quest-ce-que-le-biocontrôle>

f. Les effets possibles des changements climatiques sur la santé des plantes

Avec l'évolution du climat, et particulièrement en raison du réchauffement global, apparaissent des risques d'émergence de nouveaux ravageurs ou des modifications non linéaires des cycles biologiques de bioagresseurs (les insectes se développent plus rapidement quand les températures moyennes journalières augmentent), **ainsi que l'extension de leurs habitats** (remontée vers le Nord). La réduction des gels hivernaux, qui contribuent à la régulation de certaines adventices ou certains insectes et animaux, est susceptible d'accroître significativement leur capacité de nuisance sur les cultures. Les alternances de chaleur et d'humidité sont également des conditions propices au développement de certaines maladies fongiques.

Ces phénomènes sont susceptibles de faire peser des pressions d'autant plus grandes sur l'agriculture française que les substances les plus efficaces sont de moins en moins nombreuses en raison de leur toxicité.

À l'inverse, le changement climatique pourrait, certaines années, atténuer certaines pressions fongiques liées aux paramètres humidité/température, notamment durant la saison estivale. Le risque sera toujours présent (certains scénarios le renforcent même) au printemps et à l'automne.

L'usage des antibiotiques en élevage : une consommation en forte baisse depuis 10 ans

La modernisation agricole de la deuxième moitié du XX^{ème} siècle s'était également accompagnée de l'utilisation croissante de molécules de synthèse en santé animale, en particulier d'antibiotiques. Cet usage qui s'était généralisé dans les élevages a fortement reculé depuis le succès des plans EcoAntiBio¹⁸⁷ qui visent à en réduire la consommation et à en préserver l'efficacité thérapeutique tout en prévenant l'antibiorésistance, qui menace l'ensemble du vivant, des écosystèmes aux populations humaines¹⁸⁸. Ces démarches s'inscrivent dans le concept One Health¹⁸⁹ (Une seule santé), qui reconnaît l'interdépendance entre santé humaine, santé animale et santé environnementale, et promeut une approche intégrée des problématiques de gestion des maladies infectieuses, émergentes ou à risque pandémique.

Depuis 2011, l'exposition aux antibiotiques a ainsi diminué en moyenne de 52 %, et notamment de 23 % pour les bovins, 67 % pour les porcs, 72 % pour les volailles (et seulement 3 % pour les chiens et chats, sur lesquels se focalise le 3^{ème} Plan 2023-2028), avec de fortes baisses concernant l'exposition aux antibiotiques les plus critiques¹⁹⁰. En 2022, la baisse importante des ventes d'aliments médicamenteux contenant des antibiotiques, désormais interdits à titre préventif, ne s'est pas accompagnée de report vers d'autres types d'antibiotiques. Globalement, l'ANSES témoigne d'une diminution générale de l'antibiorésistance, à une exception : l'augmentation, depuis 2018, des bactéries résistantes chez les chevaux. En 2020, sur 31 pays participants, la France était au 14^{ème} rang des pays consommateurs d'antibiotiques vétérinaires, avec une consommation très inférieure à la moyenne européenne (56,6 mg/kg vs 89,0 mg/kg)¹⁹¹.

Différents moyens (biosécurité dans les élevages, bonnes pratiques d'hygiène dans les cliniques vétérinaires...) permettent de contrôler la transmission des résistances bactériennes entre les animaux et les humains. Depuis 2022, une attention supplémentaire est également portée au suivi des bactéries isolées de viandes importées des pays en dehors de l'Union européenne (Décision de la Commission européenne 2020/1729¹⁹²), l'importation d'aliments et d'animaux pouvant favoriser l'introduction sur le territoire de bactéries portant de nouveaux gènes de résistance ou de bactéries multirésistantes.

Par ailleurs, la lutte contre les épizooties reste d'une grande actualité : influenza aviaire, fièvre catarrhale ovine, tuberculose bovine, maladie hémorragique épizootique, engendrent des crises sanitaires de grande ampleur dans les différents cheptels. Le manque d'anticipation et de détection précoce des foyers a pu nuire à la gestion de ces crises¹⁹³.

¹⁸⁷ <https://agriculture.gouv.fr/lutte-contre-lantibioresistance-le-plan-ecoantibio-3-poursuivra-la-dynamique-positive-engagee-et>

¹⁸⁸ <https://sante.gouv.fr/prevention-en-sante/les-antibiotiques-des-medicaments-essentiels-a-preserver/des-antibiotiques-a-l-antibioresistance/article/l-antibioresistance-pourquoi-est-ce-si-grave>

¹⁸⁹ <https://www.inrae.fr/alimentation-sante-globale/one-health-seule-sante>

¹⁹⁰ <https://www.anses.fr/fr/system/files/Press2023DPA01.pdf>

¹⁹¹ <https://www.anses.fr/fr/content/suivi-des-ventes-antibiotiques-veterinaires>

¹⁹² <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32020D1729&from=DA>

¹⁹³ <https://agriculture.gouv.fr/tirer-les-lecons-des-crisis-dinfluenza-aviaire-quelle-organisation-de-letat-pour-gerer-les-crisis>

2. Changement climatique et nouveaux contextes pédoclimatiques : des besoins d'adaptation et de résilience

Historiquement, les systèmes agricoles se sont développés selon les spécificités locales des territoires, mettant en valeur des ressources biologiques fonctions du contexte pédoclimatique. Il existe une très grande diversité de sols sur le territoire, avec des potentiels de fertilité et une facilité de mise en culture très variables selon la texture, la profondeur, le pH, la pente... Ce sont ces caractéristiques de terrain qui, avec le climat local, déterminent les systèmes et techniques agricoles possibles et donc les solutions à mettre en œuvre pour toute transition.

Avec l'industrialisation de l'agriculture au XX^{ème} siècle, le recours aux engrais minéraux avait pu permettre de s'affranchir des limites de fertilité de certains sols, tandis que le machinisme a permis d'intensifier le travail mécanique du sol. Durant cette période, ces évolutions ont fragilisé la qualité et la santé des sols, rendus plus vulnérables aux aléas climatiques qui s'accumulent désormais.

A. Fragilisation biologique, physique et chimique des sols

Le taux de matière organique (MO) est un paramètre couramment utilisé dans les analyses de sol car il est le reflet, pour une texture de sol donnée, de la capacité du sol à fonctionner correctement : bonne structure, résistance à l'érosion, capacité de stockage de l'eau, bonne activité biologique, etc. **Globalement, les teneurs en matière organique des sols ont eu tendance à baisser durant les décennies passées** (GIS SOL, 2011), pour différentes raisons selon les régions : abandon de la fertilisation organique au profit des engrais azotés minéraux dans les zones de grandes cultures, retournement des prairies permanentes au profit de cultures annuelles dans les zones d'élevage, travail plus intensif des sols. Les baisses observées ont en général été d'autant plus grandes que le taux de MO initial était important. **Cependant, les taux ont actuellement tendance à se stabiliser, voire à remonter, dans certaines régions, sous l'effet de meilleures pratiques agricoles qui augmentent le retour au sol (couverts végétaux, fertilisants organiques...).**

Augmenté par de faibles teneurs en MO (pour un contexte pédologique donné), l'aléa d'érosion physique sous l'effet des fortes précipitations, du vent ou encore des mouvements de terrain est un autre facteur de risque majeur pour les sols français : on estime qu'environ un quart¹⁹⁴ présente une susceptibilité à l'érosion, notamment dans les régions du Nord, de la Bretagne, du Sud-Ouest et des Alpes. Les pertes peuvent aller jusqu'à 20 tonnes de terre par hectare et par an¹⁹⁵. On mesure ainsi l'intérêt de la couverture végétale des sols et des prairies.

¹⁹⁴ <https://www.gissol.fr/donnees/cartes/lalea-derosion-des-sols-par-petite-region-agricole-1133>

¹⁹⁵ https://geoidd.developpement-durable.gouv.fr/#c=indicator&f=per_terplus20&i=erosion_terhydri.per_terrehydrique&i2=sol_erosion_an.alea_erosion_an&s=2010&t=A08&t2=A08&view=map19

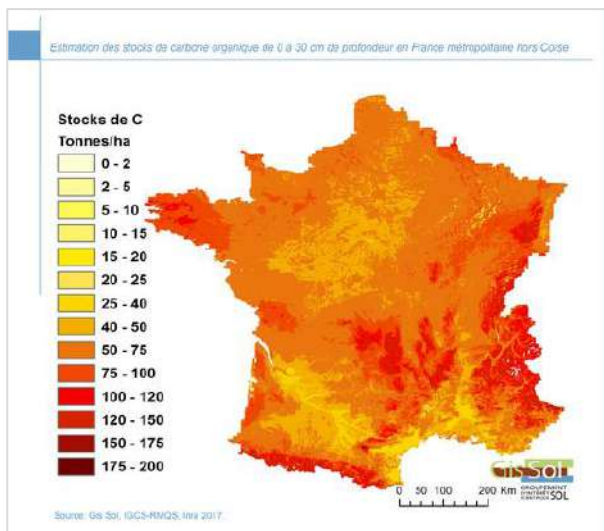


Figure 29 : Estimation des stocks de carbone organique de 0 à 30 cm de profondeur en France métropolitaine hors Corse

Source : Gis Sol, IGCS-RMQS, Inra 2017

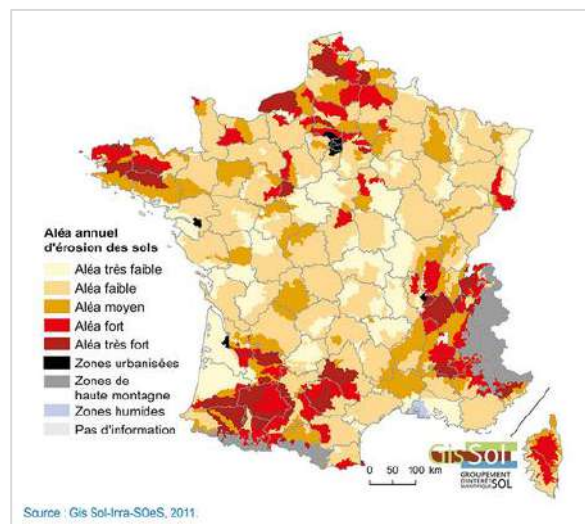


Figure 28 : Aléa annuel d'érosion des sols

Source : GIS Sol

B. Augmentation des aléas climatiques et de leurs impacts sur les sols et les systèmes agricoles

Combinant des phénomènes aigus et une évolution chronique des paramètres climatiques (température, pluviométrie, etc.), les conséquences du changement climatique affectent déjà directement les systèmes agricoles français, et vont continuer à s'amplifier. Les sécheresses (2022), les inondations ou excès d'eau notamment pendant les récoltes et les semis (2016, 2023-2024), les vagues de chaleur (2022) et les gels tardifs au printemps (2021, 2024) survenus au cours des dernières années ont eu des impacts directs sur la production agricole (baisse de rendements, dégâts matériels, perte d'animaux). La récurrence des sécheresses est l'un des effets les plus perceptibles du changement climatique sur l'agriculture hexagonale, en grande majorité non irriguée (93 % des surfaces).

Une inquiétude vis-à-vis du changement climatique confirmée par les agriculteurs¹⁹⁶

86 % des agriculteurs sont inquiets pour la viabilité de leur ferme face aux aléas climatiques.

« Avant, on disait qu'on perdait une récolte tous les 20 ans, puis tous les 10 ans, aujourd'hui c'est tous les 3 ans. »

« Rien n'est plus acquis, on doit s'adapter en permanence, revoir ce qui a été prévu. La première année on a eu de la pluie tout le temps, la deuxième année la canicule... là on ne sait pas ce que ça va donner. »

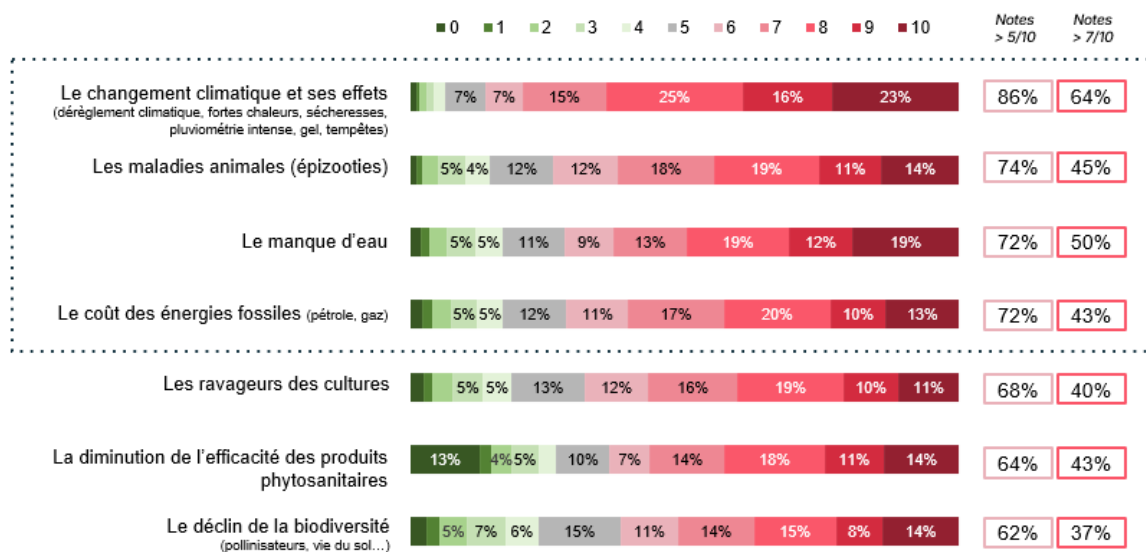
72 % des agriculteurs citent le manque d'eau comme une préoccupation pour la viabilité de leur ferme.

« J'aimerais repenser l'aménagement de la parcelle pour favoriser l'infiltration de l'eau, mais cela devrait être fait aussi au niveau du territoire pour créer un microclimat »

Les épizooties sont également une préoccupation de 74 % des agriculteurs.

¹⁹⁶ Résultats de la Grande Consultation des Agriculteurs 2024, <https://theshiftproject.org/article/resultats-grande-consultation-des-agriculteurs/>

Sur une échelle de 0 à 10, pensez-vous que les sujets suivants représentent un risque pour la viabilité de votre ferme ?



Or, ces aléas peuvent contribuer dans le même temps à l'altération de la santé des sols : les variations de conditions de température et d'humidité affectent la capacité des sols à dégrader et à stocker la matière organique, essentielle pour la productivité, la rétention de l'eau et la biodiversité, et font peser un risque plus particulier sur les sols qui présentent un faible taux de MO (vignobles, vergers, cultures intensives) ou de faible épaisseur¹⁹⁷.

Chaque fraction de degré de réchauffement entraîne une intensification des extrêmes climatiques. En France, le réchauffement sur la dernière décennie (1,9 °C par rapport à la période 1900-1930) est plus élevé que la moyenne mondiale (1,15 °C). Un réchauffement de 4 °C y est possible à l'horizon 2100 si la neutralité carbone n'est pas atteinte rapidement¹⁹⁸. **Cette augmentation des températures altère le cycle de l'eau et le régime des pluies**, en intensité comme en répartition au cours de l'année. De potentielles pluies extrêmes augmentent le risque d'inondations.

Au-delà de son impact direct sur la physiologie des animaux (voir ci-dessous), le changement climatique influe sur les dynamiques épidémiologiques des maladies animales¹⁹⁹, dans le contexte d'une altération des milieux (artificialisation, déforestation) et de l'intensification des élevages et du commerce international. Cet impact peut se répercuter sur les populations sauvages, avec des effets sur la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes, dont dépendent en retour les systèmes agricoles.

C. Une vulnérabilité des systèmes face aux variations de la disponibilité en eau et aux stress thermiques

a. Un dérèglement des volumes d'eau disponibles

¹⁹⁷ Pellerin et al., 2019. Stocker du carbone dans les sols français, Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût ? Synthèse du rapport d'étude, INRA (France)

¹⁹⁸ Haut Conseil pour le Climat, 2024. Accélérer la transition climatique avec un système alimentaire bas carbone, résilient et juste

¹⁹⁹ <https://agriculture.gouv.fr/la-lutte-contre-les-maladies-animales-dans-le-contexte-du-changement-climatique>

Les travaux de prospective climatique (CGAAER, Aqua 2030, Climator, Garonne 2050, Varenne de l'eau, Explore 2070, etc.) annoncent des déséquilibres quantitatifs sur la ressource en eau, du fait notamment d'un changement du régime des précipitations, se manifestant par des fenêtres météo plus courtes et imprévisibles ainsi que par un renforcement structurel des déficits hydriques en période estivale. Parmi les principales évolutions anticipées figurent :

- Un **déficit hydrologique** avec une baisse du débit moyen annuel des cours d'eau : fleuves (réduction des débits d'étiages estivaux de 30 % à 60 % avec une baisse plus marquée pour le Rhône et la Seine²⁰⁰), rivières (- 20 à - 40 % de baisse moyenne du débit, recul plus prononcé attendu dans le bassin Adour-Garonne)²⁰¹ ;
- Une **accentuation de la sécheresse météorologique** : diminution des volumes de précipitations assurant la recharge des cours d'eau et des lacs par ruissellement et celle des nappes par infiltration ;
- Une **intensification de l'évapotranspiration** entraînant une part plus importante des précipitations retenues dans les sols superficiels au détriment de l'alimentation des nappes ;
- Un **manque de 2 milliards de m³ d'eau en 2050**²⁰² si la demande reste stable (consommation moyenne d'eau douce de 4,1 milliards de m³, dont 2,4 imputés à l'irrigation agricole²⁰³).

De même, une sécheresse hydrologique pourrait également s'observer dans les nappes, avec des effets en cascade. En effet, plus d'un tiers (37 %) de l'eau mobilisée à des fins d'irrigation provient des nappes souterraines²⁰⁴. Sur ce terrain, le projet Explore 2070²⁰⁵ livre trois grands enseignements :

- Une **baisse quasi-générale de la piézométrie**²⁰⁶ avec une diminution de la recharge en eau comprise entre 10 et 25 % pour la France à horizon 2050-2070 (bassin versant de la Loire et le Sud-Ouest particulièrement affectés avec des baisses qui pourraient être comprises entre 25 et 50 %) ;
- Une **diminution globale des prélèvements d'eau souterraine de 20 % à horizon 2070** (sobriété subie) obtenue en simulant le principal scénario de réchauffement climatique ;
- Un **risque accru de biseau salé pour les aquifères côtiers** (nappe de la Crau, nappe des calcaires vendéenne). Ces derniers, en connexion directe avec la mer en profondeur, sont exposés à des "intrusions salines" et ce risque croît à mesure que le niveau de la nappe baisse. Ainsi, sous l'effet du changement climatique et d'un pompage plus intense des eaux souterraines, la perspective de biseaux se renforcerait. Dans le cas français, la problématique de la recharge naturelle des nappes reste cependant moins pressante que celle de la pollution des eaux souterraines²⁰⁷.

La configuration géologique de la France est marquée par une forte connectivité entre eaux de surface et eaux souterraines. Dès lors qu'une baisse est constatée au niveau des eaux de surfaces, tout particulièrement en période estivale, des tensions sont inévitablement présentes au niveau des aquifères censés les alimenter.

b. Des systèmes d'élevage de plus en plus vulnérables

Les conséquences du changement climatique sur l'eau et la température affecteront les conditions, voire l'équilibre économique des élevages en cas de renchérissement du prix de l'eau. Le bien-être et les besoins physiologiques des animaux seront en effet directement impactés. À titre d'exemple, la zone de confort thermique d'une vache est située entre 3 et 15 °C. Si l'adaptation est possible en conditions plus fraîches tant que la force du vent et le niveau d'humidité ne sont pas trop élevés, les vaches peuvent difficilement s'acclimater

²⁰⁰ Jusqu'à -50 % de baisse du débit minimum mensuel pour le Rhône et -70 % pour la Seine

²⁰¹ Chiffres issus du rapport Aspexit sur la gestion de l'eau en agriculture

<https://www.aspexit.com/gestion-de-leau-et-technologies-numeriques-en-agriculture/>

²⁰² Observatoire National sur les Effets du Changement climatique, 2009. Changement climatique : coûts des impacts et pistes d'adaptation. Rapport au Premier Ministre et au Parlement

https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/ONERC_Rapport_2009_CoutsImpacts_WEB.pdf

²⁰³ <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/leau-en-france-ressource-et-utilisation-synthese-des-connaissances-en-2023>

²⁰⁴ https://www.aspexit.com/gestion-de-leau-et-technologies-numeriques-en-agriculture/#La_vapeur_d'eau_est_bien_un_gaz_a_effet_de_serre

²⁰⁵ Projet porté par la direction de l'eau et de la biodiversité du MTE

²⁰⁶ La piézométrie est la mesure de profondeur de la surface de la nappe d'eau souterraine.

²⁰⁷ Rapport Aspexit sur la gestion de l'eau et des outils numériques en agriculture.

à des températures supérieures à 30-35°C. Ce constat vaut également pour les autres animaux d'élevage, ruminants comme monogastriques, pour lesquels un inconfort thermique s'observe en moyenne à partir de 25°C. La vulnérabilité est particulièrement prononcée pour les porcs, affichant une zone de confort thermique particulièrement resserrée (18°C - 25°C). À l'inverse, les agneaux sont les plus résilients aux coups de chaleur (plage de confort thermique comprise entre - 5°C et 30°C).

De forts stress thermiques entraînent des préjudices en cascade sur la santé et la productivité des animaux (baisse de la production laitière, développement de mammites²⁰⁸, abaissement des capacités reproductrices, hausse de la mortalité des jeunes animaux, etc.). Ce risque thermique est présent aussi bien à l'extérieur que dans les bâtiments d'élevage, pas toujours bien isolés, et où la circulation de l'air pourrait être améliorée. En outre, un manque d'eau compromet l'abreuvement du bétail, bien que ce poste représente moins de 10 % l'eau mobilisée en agriculture.

De plus, la capacité à assurer l'alimentation des cheptels peut être compromise en cas de stress hydriques prolongés ou, à l'inverse, d'excès d'eau. Les prairies ou les cultures fourragères affectées pourraient voir leur productivité tout comme la qualité de leur fourrage chuter. En cas de sécheresses répétées, certaines formes d'élevage pourraient être abandonnées, à l'image des pâturages alpins éloignés, présents sur des zones peu productives mais assurant des services écosystémiques certains (entretien de paysages, valeur culturelle...). Ces facteurs d'instabilité sur la production fourragère amènent les filières herbivores à s'interroger sur le type de bâtiments à prévoir pour l'été ainsi qu'au pilotage du fourrage dans les élevages, ce qui peut être problématique pour les investissements réalisés et non encore amortis. Il y a également une réflexion naissante sur le besoin ou non de réviser des cahiers des charges de qualité de type AOP en lien avec l'imprévisibilité météorologique et saisonnière portée par le changement climatique.

c. Une vulnérabilité accrue des systèmes de culture

L'évapotranspiration (ETP), une des variables climatiques dont les impacts sont les plus significatifs sur la production agricole et sur la recharge des nappes, est amenée à augmenter très significativement avec un impact majeur pour certaines cultures. En effet, **vont se combiner augmentation de l'ETP et diminution de la ressource en eau pour l'irrigation en été, du fait du changement du régime des précipitations en été, conduisant à des fortes aggravations des phénomènes de stress hydriques pour les cultures.** Les baisses de rendement seraient potentiellement considérables pour beaucoup de cultures d'été actuellement pratiquées sans irrigation. Par ailleurs, l'augmentation possible du régime de précipitations hivernales pourrait quant à elle entraîner des excès d'eau pénalisants pour les rendements (phénomènes d'anoxies racinaires).

La multiplication des aléas (pluies intenses, grêle, gel, sécheresses, vagues de chaleur) entraîne également **des impacts sur la structure et les caractéristiques des sols**, avec notamment des risques de diminution de leur fertilité et de leur réserve utile²⁰⁹ (voir aussi III.4.C).

Plus globalement, les changements de régimes de précipitations et de températures peuvent également entraîner des **difficultés pour les opérations agricoles**. Ainsi, au-delà de "fenêtres météo" d'intervention dans les parcelles parfois réduites, la qualité des productions est aussi hautement dépendante des conditions d'humidité et de température à la récolte, qui peuvent par exemple favoriser le développement de moisissures à l'origine de mycotoxines. La facilité et le bon déroulement du stockage et de la conservation des récoltes s'en retrouvent alors impactés, tout particulièrement si les conditions hivernales ne permettent pas un refroidissement par ventilation et en l'absence de moyen de traitement chimique.

²⁰⁸ Inflammations des mamelles provoquées par des bactéries.

²⁰⁹ « Rapport du CGAAER / CGEDD - Changement climatique, eau et agriculture d'ici 2050 ».

D. Des impacts du changement climatique contrastés selon les productions et les zones géographiques

L'évolution des températures liée au changement climatique a un impact sur la longueur, le calage du cycle et la phénologie²¹⁰ de certaines cultures, renforçant dans certains cas leur vulnérabilité (échaudage, déficit hydrique, brûlures) et impactant les rendements. Dans d'autres cas, des opportunités pourraient se présenter en lien avec l'évolution des aires de production, la meilleure faisabilité de certaines pratiques culturales ou encore l'augmentation du rendement de certaines cultures du fait de l'augmentation de la concentration en CO₂ atmosphérique²¹¹.

a. Une évolution des potentiels de rendements

Si l'évolution des rendements sous l'effet d'un climat futur modifié est pressentie comme plutôt défavorable pour les cultures et les surfaces actuellement en place, les impacts sont très contrastés selon les cultures considérées, les zones géographiques et l'horizon de temps étudié.

Effets du changement climatique sur les rendements à horizon 2050

AXA Climate, qui accompagne notamment les acteurs agricoles et agroalimentaires sur leur adaptation climatique et environnementale a pu compiler des données issues des études d'impacts du changement climatique (toutes choses égales par ailleurs) menées sur plusieurs territoires Français.

Les évolutions de rendement en tendance expriment « le coût de l'inaction », parfois des opportunités pour certaines filières. Elles varient d'un territoire à l'autre, chacun ayant ses propres singularités en termes de climat, de sols, d'assolement et de pratiques de la part des agriculteurs.

Pour apporter un maximum de robustesse aux résultats, l'évolution des rendements d'ici à 2050 (scénario SSP5 8.5) est modélisée en prenant en compte la typologie des sols et la spécificité des cultures. Les dates d'apparitions des stades phénologiques et un bilan hydrique précis du semis jusqu'à la récolte sont calculés et la survenance d'accidents climatiques tels que les vagues de chaleur, les risques de gel ou, les excès d'eau (selon la vulnérabilité spécifique de l'espèce) est également considérée.

Voici quelques exemples concernant les grandes cultures :

Pour le blé tendre : selon les territoires, les rendements 2050 seront stables jusqu'à - 10 quintaux de perte. Deux causes majeures ressortent : le stress hydrique et le raccourcissement des cycles végétatifs.

Pour le tournesol : l'impact va d'une légère augmentation de + 5 % notamment dans les secteurs où le tournesol est peu présent aujourd'hui à - 25 % pour d'autres territoires sujets à de forts stress hydriques et de fortes vagues de chaleur.

Pour le pois protéagineux : des opportunités se présentent pour certains territoires qui voient le rendement progresser de + 10 % alors que d'autres se retrouveront dans une situation *a priori* délicate avec des baisses jusqu'à - 20 % de rendement. Sur ces derniers, des leviers d'adaptation sont parfois déjà initiés avec par exemple des implantations de plus en plus précoces en saison (hiver vs printemps).

Pour le soja : dans des situations comparables en termes d'irrigation (c'est-à-dire à volume constant), la baisse est significative sur les zones actuellement productrices car le stress hydrique augmente. L'augmentation des températures moyennes pourrait être cependant favorable à cette culture sur des territoires qui auront, grâce à des sommes de températures plus importantes pendant le cycle végétatif, accès à des variétés à plus haut potentiel. Attention, la disponibilité en eau restera clé.

Pour le maïs : sans adaptation, les baisses de rendement sont très fortes, -10 à -30 qx/ha. L'innovation génétique et la capacité à assurer une bonne disponibilité en eau que ce soit par l'irrigation et/ou par la mise

²¹⁰ La phénologie est l'étude des variations des phénomènes périodiques de la vie animale et végétale, en fonction du climat.

²¹¹ CGEDD, CGAAER, 2020. Changement climatique, eau, agriculture. Quelles trajectoires d'ici 2050 ?

en œuvre de pratiques favorisant le maintien de l'eau dans les sols plus longtemps et en plus grande quantité sont capitales.

Pour les prairies : il est difficile de généraliser tant les espèces et les pratiques (pâturage, fauche, mixte...) utilisées diffèrent entre les territoires et au sein d'un même territoire. Globalement, le tonnage de matières sèches est souvent en baisse avec des variations saisonnières. Une pousse moins importante sur la période estivale et plus importante tardivement dans l'année invite à ce que les agriculteurs adaptent leurs pratiques à l'automne et en sortie d'hiver.

Des travaux de cartographie sur un horizon plus lointain (horizon 2100) permettent de mettre en avant les effets d'un climat futur modifié et les disparités d'évolution des rendements potentiels selon les cultures, toutes choses égales par ailleurs (à pratiques constantes, hors effet de la teneur en CO₂ dans l'atmosphère, stress biotiques²¹², et adéquation des conditions pédologiques aux cultures considérées).

Pour de nombreuses cultures d'été actuellement pratiquées sans irrigation, le déficit hydrique estival supplémentaire engendré par l'augmentation de l'évapotranspiration aura un impact considérable sur les rendements, rendant dans certains cas difficile voire impossible leur culture dans certaines zones méridionales.

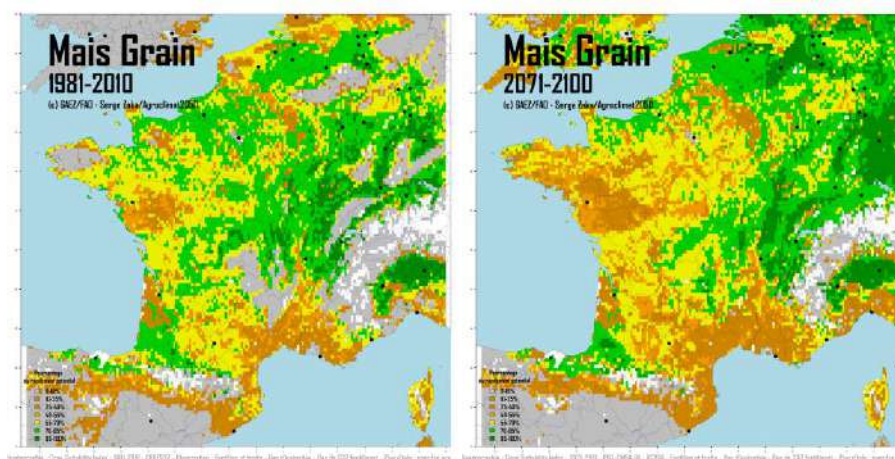


Figure 30 : Évolution du pourcentage de rendement potentiel (crop suitability index) du maïs non irrigué (RCP6.0, hors effet de l'augmentation de la teneur en CO₂ dans l'atmosphère et hors conditions pédologiques et stress biotiques)

Source : S. Zaka - AgroClimat

Par exemple, les cartographies d'évolution du pourcentage de rendement potentiel du **maïs non irrigué**, ici entre la période 1981-2010 (observée) et la période 2071-2100, dans un scénario RCP6.0, montrent une généralisation de potentiels de rendement inférieurs à 55 % sur tout l'arc méditerranéen et une grande partie de la façade atlantique nord-ouest ainsi que la vallée de la Loire.

²¹² Stress résultant de l'action d'un organisme vivant (champignon pathogène, insecte, plante parasite), par opposition au stress abiotique résultant de modifications de facteurs environnementaux (température, salinité, carence en minéraux, vent,...)

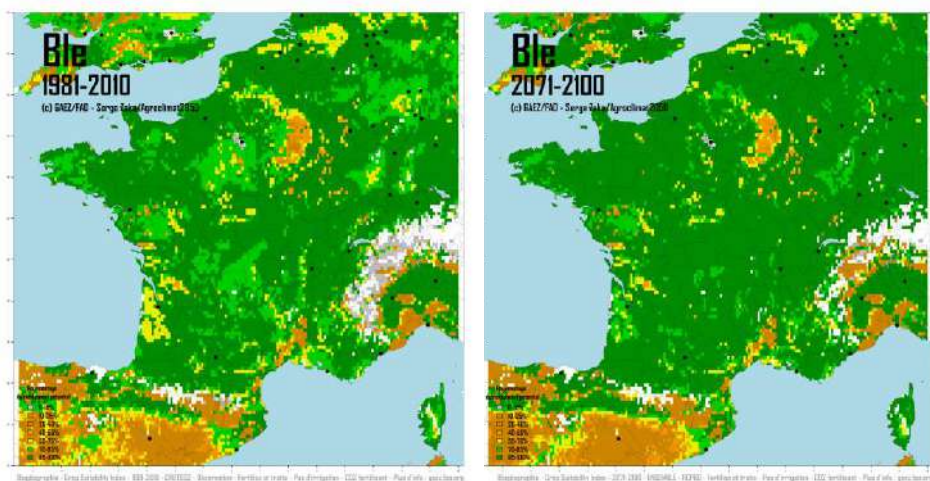


Figure 31 : Évolution du pourcentage de rendement potentiel (crop suitability index) du blé non irrigué (RCP6.0, avec effet de l'augmentation de la teneur en CO₂ dans l'atmosphère et hors conditions pédologiques et stress biotiques)

Source S. Zaka - AgroClimat

En revanche, **pour des cultures d'hiver, à titre d'exemple le blé**, les cartographies d'évolution du pourcentage de rendement potentiel, ici entre la période 1981-2010 (observée) et la période 2071-2100, dans un scénario RCP6.0 (scénario intermédiaire), montrent un effet climatique plutôt favorable aux rendements, notamment dans les zones du Massif Central, du Bassin Parisien et de la façade atlantique.

- **Une évolution des aires biogéographiques des cultures**

L'évolution des variables climatiques entraîne également une évolution des zones biogéographiques (i.e. aire de répartition des cultures). On constate d'ores et déjà une remontée vers le nord de certaines cultures déjà largement présentes (maïs grain, tournesol, blé dur), quand d'autres cultures ont fait leur apparition ou se sont significativement développées depuis une vingtaine d'années : dans le Sud (pois sec, lin oléagineux), dans le Nord (miscanthus, silphie) ou sur l'ensemble du territoire (sorgho, soja, sarrasin, millet, fève et féverole...) ²¹³. Si ces changements créent de nouvelles opportunités pour l'agriculture, par l'implantation possible de nouvelles cultures dans des régions plus septentrionales (tournesol, vigne, maraîchage, certains fruitiers...) ou en plus haute altitude (maïs fourrage), et si les cultures annuelles offrent plus de possibilités d'adaptation, ils sont en revanche **un défi majeur à affronter pour les cultures pérennes du Sud de la France et pour les prairies permanentes. Par ailleurs, ces évolutions biogéographiques nécessitent d'anticiper la création de nouvelles filières et les investissements à prévoir en conséquence. Elles impliquent tout particulièrement de sécuriser et repenser les zones de production de semences**, dont 60 % des surfaces seraient soumises à fort risque climatique en 2050 en l'état actuel de leur répartition géographique, des pratiques agronomiques et des capacités de résilience des variétés actuelles ²¹⁴. À noter : en 2050 comme aujourd'hui, plus de la moitié du risque correspond à des risques de manque d'eau.

b. Déplacement des aires biogéographiques pour des cultures annuelles : cas de la tomate

Pour un certain nombre de cultures annuelles, le déplacement des aires de production de certaines cultures se traduit par un changement de saisonnalité, c'est-à-dire que la zone géographique la plus propice aux saisons attendues pour cette culture "se déplace". Ainsi, par exemple, l'aire de répartition de la tomate se déplace globalement vers le Nord et tend à disparaître depuis le Sud de l'Espagne (et de l'Italie).

²¹³ « Varenne de l'eau : rapport du CGAAER sur les cultures résilientes face au changement climatique », Ministère de l'Agriculture, de la Souveraineté alimentaire et de la Forêt

²¹⁴ <https://climate.axa/axa-climate-semes-étude-changement-climatique-semences/>

En été (exemple de la semaine 33), le potentiel de croissance en Espagne devient progressivement très limité, alors que la façade atlantique nord-ouest française devient plus favorable. En intersaison (exemple de la semaine 24), l'Espagne deviendrait au contraire plus favorable, ainsi que le Sud de la France.

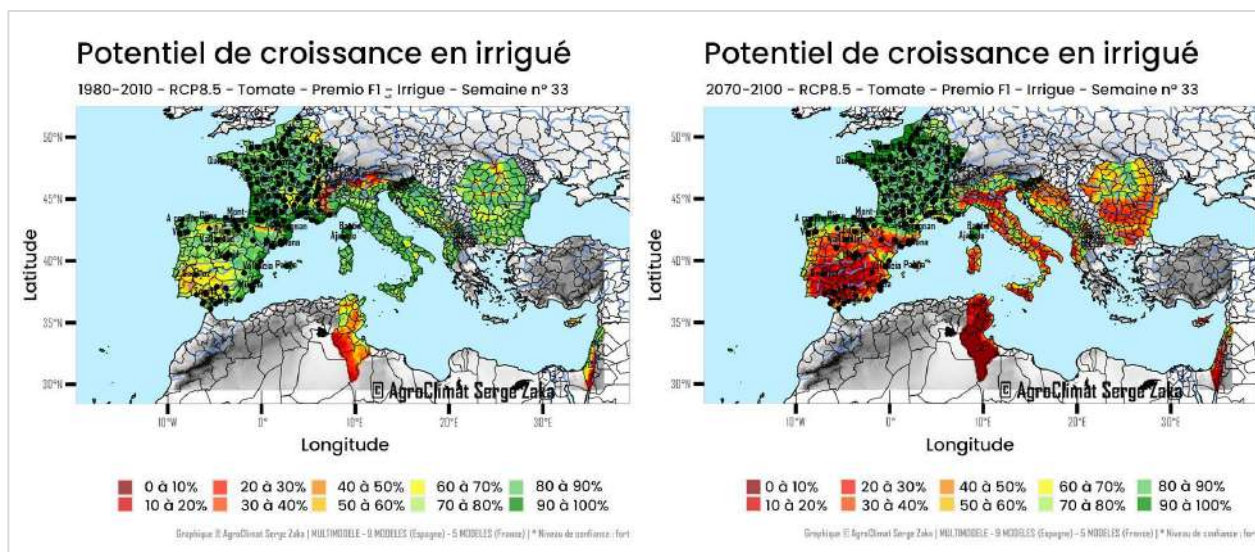


Figure 32 : Évolution du potentiel de croissance de la tomate irriguée (plein champ, hors serres) dans un scénario RCP8.5 en plein été (semaine 33) hors conditions pédologiques et stress biotiques
Source : S. Zaka - AgroClimat

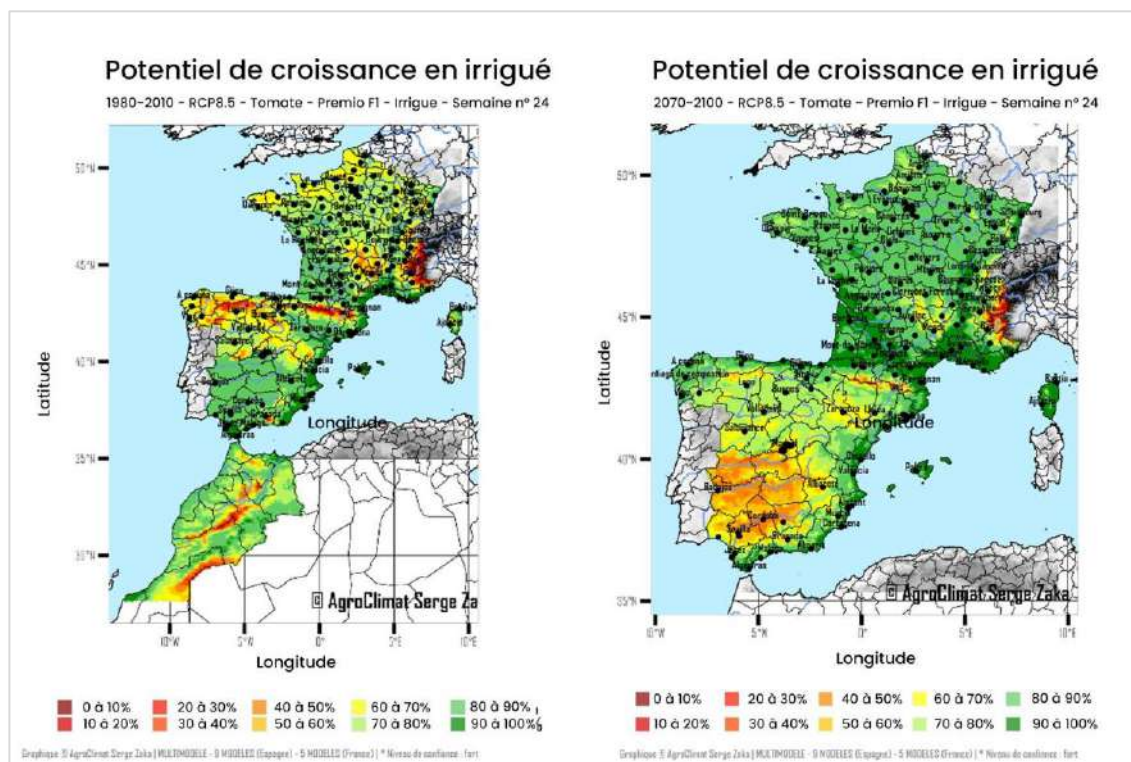


Figure 33 : Évolution du potentiel de croissance de la tomate irriguée (plein champ, hors serres) dans un scénario RCP8.5 en intersaison (semaine 24) hors conditions pédologiques et stress biotiques
Source : S. Zaka AgroClimat

c. Déplacement des aires biogéographiques pour des cultures pérennes : cas de la vigne et du citron

Pour des cultures pérennes, l'évolution des aires biogéographiques se traduit, toutes choses égales par ailleurs (par exemple en l'absence de modification des espèces et variétés en place), par des changements dans les caractéristiques des productions (cas de la vigne) et/ou de nouvelles zones de production potentielles (cas du citronnier).

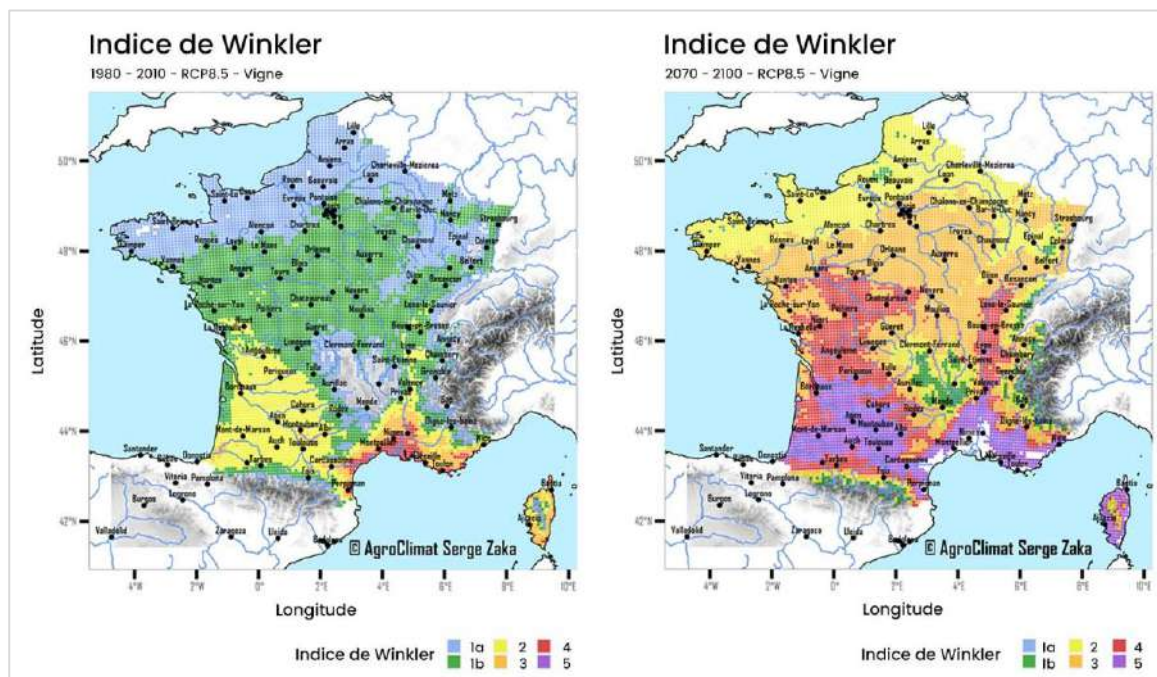


Figure 34 : Évolution de l'indice de Winkler pour la vigne dans un scénario RCP8.5, hors conditions pédologiques et stress biotiques

Source : S. Zaka - AgroClimat

Utilisé en particulier pour la vigne, l'indice de Winkler calcule la somme des températures journalières supérieures à 10°C (température minimale pour l'activité physiologique de la vigne) sur la période d'avril à octobre dans l'hémisphère Nord. L'échelle de Winkler (autrement appelée méthode de sommation thermique) permet alors de classer les zones de culture de la vigne en cinq régions climatiques, de I à V.

Les cartographies d'évolution de l'indice de Winkler pour la vigne montrent ainsi à horizon 2070-2100 une disparition en France du climat I-a (climat Champenois notamment), une quasi-disparition du climat I-b (climats de la vallée de la Loire et de la Bourgogne), un déplacement du climat 2 (climat Bordelais) vers la Bretagne, la Normandie et le Nord de la France, une généralisation du climat 3 (climat de la Vallée du Rhône Nord) en Bourgogne et Vallée de la Loire et un développement très marqué des climats 4 et 5 (climats au Sud de l'Europe) dans la Vallée de la Loire, le quart Sud-Ouest et la Vallée du Rhône.

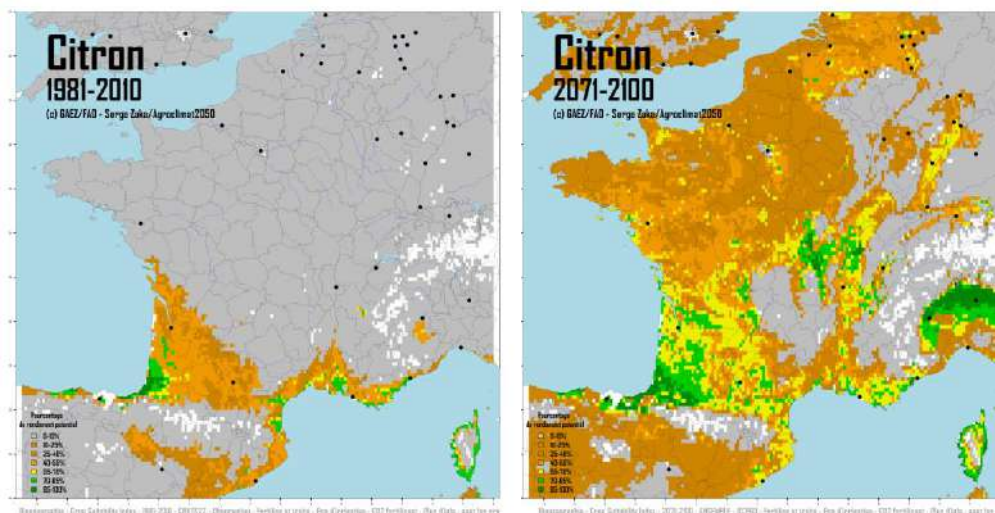


Figure 35 : Évolution du pourcentage de rendement potentiel (crop suitability index) du citron (RCP6.0, avec effet de l'augmentation de la teneur en CO₂ dans l'atmosphère et hors conditions pédologiques et stress biotiques)

Source : S. Zaka - AgroClimat

Aujourd'hui culture plutôt confidentielle dont les surfaces sont principalement localisées sur le pourtour méditerranéen (IGP de Menton totalisant une centaine d'hectares), le citron pourrait bénéficier d'une extension significative, sous réserve de conditions pédologiques adéquates, de sa zone de production vers le Nord-Est et le Sud-Ouest.

d. Déplacement des aires biogéographiques projetées pour les principales légumineuses à graines : soja, lentille, féverole, haricot, pois chiche

L'évolution des rendements et des aires biogéographiques favorables à la culture du soja à horizon 2050 ont pu être estimées²¹⁵ : des baisses de rendement sont anticipées dans le Sud-Ouest de la France, tandis que des gains de productivité pourraient être dégagés en Île-de-France et dans le Grand Est. **Le soja pourrait ainsi être appelé à occuper des surfaces plus importantes dans le Bassin parisien et le Nord-Est de la France alors que sa présence y est marginale aujourd'hui.**

²¹⁵ https://hal.inrae.fr/hal-04583740/file/2024_Marteau-Bazouni_Innovations%20Agronomiques%2093.pdf

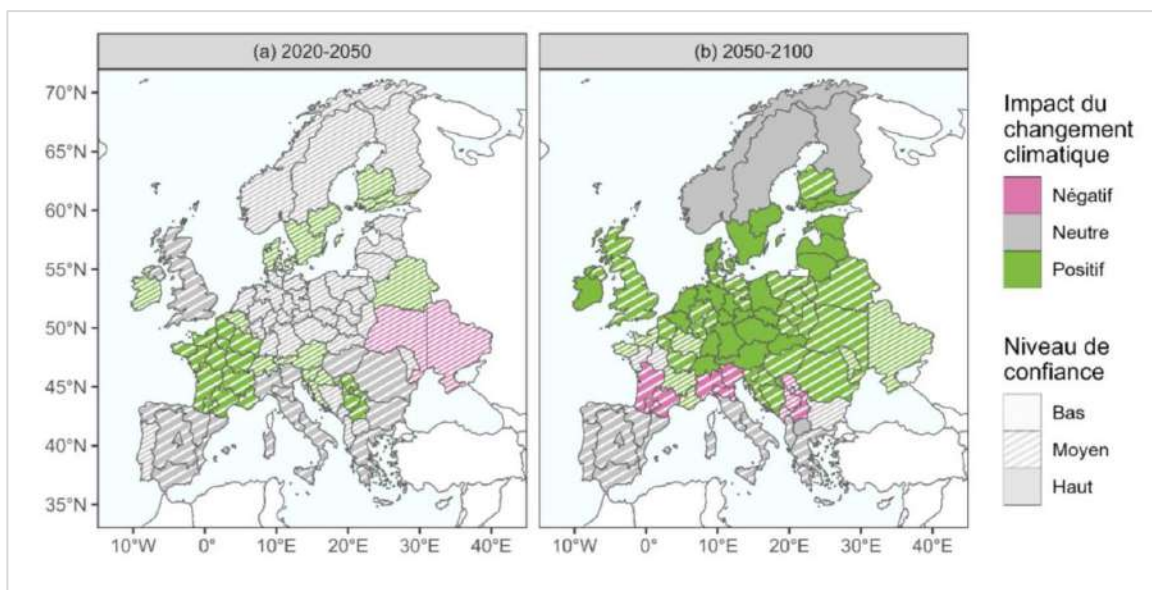


Figure 36 : Impact du changement climatique sur les performances du soja en Europe dans un futur proche (2020- 2050) (a) et dans un futur lointain (2050-2100) (b) par rapport au passé récent (1960-2010)

Source : M. Marteau-Bazouni - Innovations Agronomiques

Concernant la lentille, les travaux comme les dires d'experts collectés²¹⁶ font ressortir un potentiel de rendement appelé à baisser dans les bassins de production du Sud (Occitanie, Provence voire Puy-en-Velay), et à l'inverse, se maintenir dans le Berry (Centre-Ouest) voire même s'accroître dans le Grand Est et une grande partie du Nord de la France. **Les lentilles disposent ainsi d'un potentiel d'accroissement modéré à l'échelle de la ferme France d'ici 2050, fortes d'un potentiel de rendement relativement préservé et de nouvelles aires géographiques à investir (Hauts-de-France, Nord-Ouest, Bassin parisien).**

Les perspectives sont sensiblement comparables pour les féveroles, avec le maintien de zones favorables dans le Nord-Est et Nord-Ouest de la France, ainsi que dans le Massif Central au sein duquel le potentiel de rendement devrait même s'accroître à horizon 2050.

Concernant le haricot, les prospectives examinées²¹⁷ sont plutôt engageantes avec des aires biogéographiques favorables appelées à se maintenir d'ici la fin du siècle, y compris dans les scénarios de réchauffement les plus sévères (MIROC - H simulant + 4.31 °C d'ici 2100). **Le haricot aurait alors une carte à jouer, en tant que culture résiliente, fixatrice d'azote et adaptée à des cultures associées avec des céréales et d'autres cultures de rente** (maïs, cultures potagères...).

Enfin, le pois chiche présente un potentiel de développement particulièrement intéressant. Les surfaces françaises ont triplé en trois ans, passant de 10 000 à 35 000 hectares en 2021²¹⁸ avec des surfaces essentiellement développées dans le Sud-Ouest, et de petits collecteurs dans le Centre-Est. **L'évolution attendue de l'aire biogéographique de sa culture permet d'envisager, avec des conditions pédologiques adaptées, son développement sur une très large partie de l'hexagone.**

²¹⁶ Manners R. et al., 2020, Protein-rich legume and pseudo-cereal crop suitability under present and future European climates, European Journal of Agronomy, Volume 113 + entretien avec l'agronome Marie-Hélène Jeuffroy (UMR Agronomie INRAE).

²¹⁷ Cabral R., 2016, Crop niche modeling projects major shifts in common bean growing areas, Agricultural and Forest Meteorology. 218-219. 102-113.

²¹⁸ <https://www.terresinovia.fr/-/perenniser-la-production-francaise-des-pois-chiches>

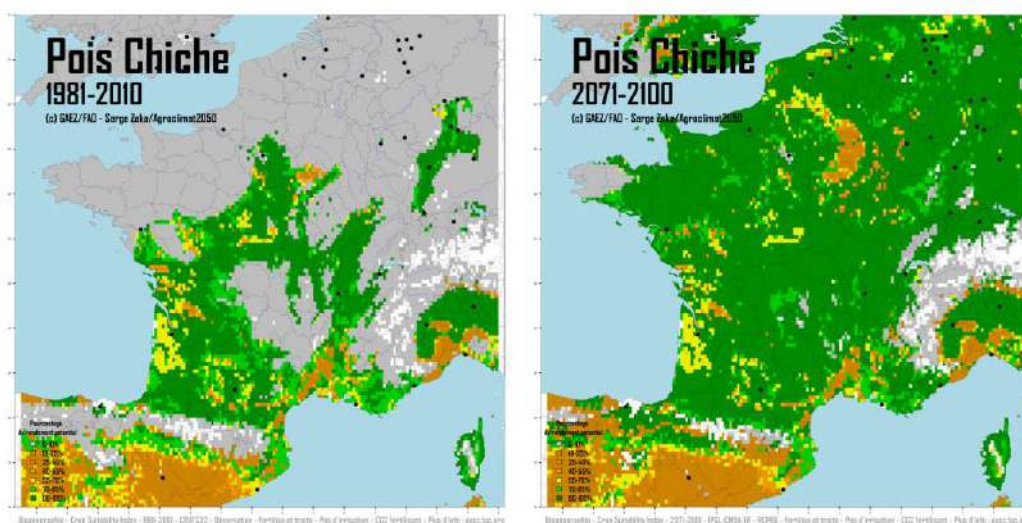


Figure 37 : Évolution du pourcentage de rendement potentiel (crop suitability index) du pois chiche (RCP6.0, avec effet de l'augmentation de la teneur en CO₂ dans l'atmosphère et hors conditions pédologiques et stress biotiques)

Source : S. Zaka - AgroClimat

Si l'effet d'un climat futur modifié sur les rendements peut s'appréhender par production et à l'échelle territoriale, la modification des aires biogéographiques potentielles des différentes productions (actuelles et futures) rend néanmoins complexe d'envisager quel pourrait être le paysage de la France agricole à horizon 2050. **La répartition des productions dépendra en effet de multiples facteurs** : existence des filières pour de nouvelles productions, impacts sur la valeur du foncier, disponibilité des outils et compétences sur le territoire pour la valorisation des productions, niveau de la demande (alimentation animale et humaine), volontés de structuration de filières nourricières au niveau local, disponibilité en eau, etc.

S'agissant des cultures considérées comme les plus intéressantes en termes de résilience, car pouvant intégrer une stratégie de diversification des assolements et ayant de bons potentiels d'adaptation à de nouveaux contextes climatiques ainsi que des effets synergiques (notamment sur la gestion des adventices et la fertilité des sols), **le tournesol, le soja, le sorgho, le méteil, le pois chiche, les prairies multi-espèces, le chanvre, et la pistache** ont été identifiés comme des cultures présentant d'ores et déjà des potentiels d'adaptation et de résilience intéressants et cultivés sur des surfaces croissantes²¹⁹.

Certaines cultures se distinguent par leurs faibles besoins en eau (chanvre, pois chiche, autres légumineuses à graines), d'autres par une résistance à la sécheresse importante (tournesol, pois chiche). Les cultures de printemps présentent des avantages en termes de rupture du cycle des adventices, et les légumineuses de nombreux co-bénéfices bien documentés. Un tableau en Annexe 2 résume les principaux atouts et les perspectives adossées à ces cultures résilientes.

Face au risque climatique, les modes de production agricole français sont déjà en voie d'adaptation : décalage des dates de semis, modification des itinéraires techniques (notamment par la protection du sol avec des couverts végétaux et moins de travail mécanique), changement des variétés ou des espèces utilisées, évolution des pratiques de taille des fruitiers et de la vigne, constitution de stocks de fourrages, outils numériques d'aide à la décision etc. **Cependant, la superposition des facteurs d'impact et la diversité des chocs susceptibles de survenir sur un territoire donné, ou encore de se répéter dans le temps, questionnent la résilience des systèmes actuels et leur niveau de préparation, soulevant le risque de ruptures futures dans la capacité productive du système agricole.**

²¹⁹ « Varenne de l'eau : rapport du CGAAER sur les cultures résilientes face au changement climatique », Ministère de l'Agriculture, de la Souveraineté alimentaire et de la Forêt

3. Les impacts et contributions climatiques de l'agriculture

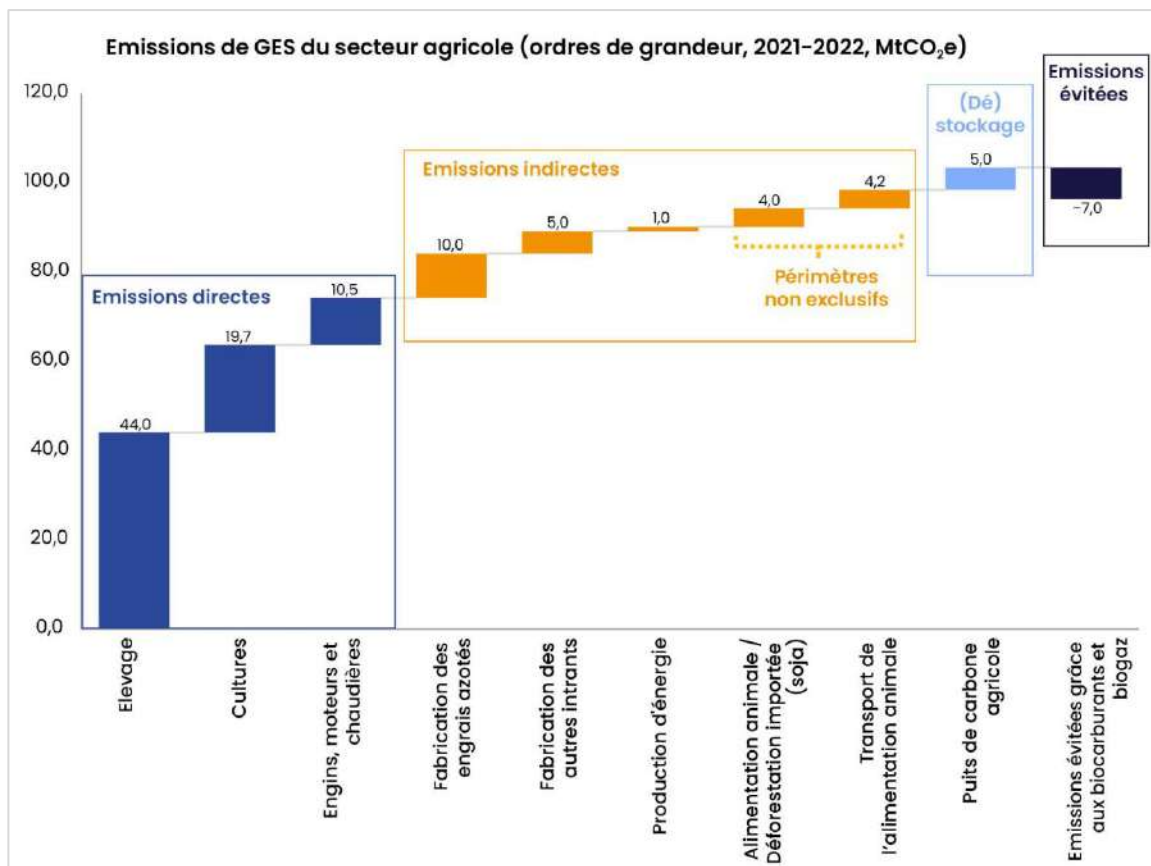


Figure 38 : Répartition des émissions de GES du secteur agricole
Sources : CITEPA, SGPE, ADEME, IDDRI

A. Les émissions directes de GES du secteur agricole français

Les activités agricoles sont sources d'émissions de gaz à effet de serre (GES) de différentes natures, dont les principaux sont le méthane (CH₄) et le protoxyde d'azote (N₂O) et, dans une moindre mesure, le dioxyde de carbone (CO₂). **Contrairement à celles des autres secteurs économiques, les émissions du secteur ont en effet la spécificité d'être majoritairement d'origine non énergétique. Elles sont contrôlées par des processus biologiques dont le caractère diffus et la complexité rendent parfois difficile leur quantification** qui est donc associée à de fortes incertitudes (voir ci-dessous sur la notion de carbone biogénique).

Nous reprenons ici les données au format SECTEN²²⁰ de l'inventaire 2024²²¹ établi officiellement par le CITEPA²²², selon les nomenclatures et règles de comptabilisation internationales élaborées par le GIEC, dont les lignes directrices ont été révisées en 2019²²³.

a. Trois principaux postes d'émissions directes de GES en agriculture

Les émissions incluses dans le secteur « Agriculture » de l'inventaire sont réparties en trois sous-secteurs :

²²⁰ SECTeurs économiques et ENergie
²²¹ https://ressources.citepa.org/Comm_Divers/Secten/Citepa_Secten%202024.pdf
²²² Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique
²²³ <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/vol4.html>

- **Élevage** : émissions liées à la fermentation entérique des animaux d'élevage (CH₄) et à la gestion des déjections au bâtiment et au stockage (CH₄ et N₂O), émissions indirectes de N₂O (lessivage, redéposition) ;
- **Cultures** : émissions des sols cultivés liées à la fertilisation azotée minérale et organique²²⁴ – engrais minéraux, boues, composts, déjections animales, digestats – (N₂O), aux déjections déposées à la pâture (CH₄ et N₂O), à l'apport d'amendements basiques (calcaire, dolomie) et d'urée (CO₂), à la riziculture (CH₄) et au brûlage des résidus agricoles (CH₄ et N₂O) ;
- **Engins, moteurs et chaudières en agriculture et sylviculture**²²⁵ : émissions de CO₂ liées à la combustion dans les engins, moteurs et chaudières des secteurs agricoles et sylvicoles.

Il faut préciser que les émissions et les absorptions de carbone liées à l'usage des terres agricoles et au changement d'affectation des terres ne sont pas comptabilisées ici, mais dans le secteur UTCATF (Utilisation des Terres, Changements d'Affectation des Terres et de la Forêt). Nous détaillerons cette partie dans le paragraphe C suivant.

La méthode et les bases de données utilisées pour la quantification des différents postes d'émissions sont détaillées, pour chaque secteur, dans le rapport OMINEA²²⁶ qui en précise également les hypothèses et les incertitudes. Les sources scientifiques de référence y sont listées pour chaque poste d'émission. Concernant l'estimation des émissions liées à l'élevage, le CITEPA s'appuie sur un système de compilation de multiples sources de données, le système PACRETE (Programme Access pour le Calcul Régionalisé des Émissions Atmosphériques de l'Élevage), qui permet de rassembler des données régionales sur les effectifs animaux, l'alimentation, les types de bâtiments d'élevage, les pratiques d'épandage des effluents (y compris via la méthanisation), le temps passé au pâturage, etc. Il offre ainsi une vision représentative de la situation française.

De la même manière que pour le secteur UTCATF, sont comptabilisées dans d'autres secteurs :

- les émissions de production de l'électricité consommée par le secteur agricole, comptabilisées dans le secteur « Industrie de l'énergie »,
- les émissions de polluants par les feux de forêts et de végétation, comptabilisées dans le secteur « Naturel »,
- les émissions de l'industrie agroalimentaire, comptabilisées dans le secteur « Industrie manufacturière et construction »,
- les émissions des transports de récoltes, de bétail, d'alimentation animale, de produits alimentaires, etc., comptabilisées dans le secteur « Transport »,
- les émissions liées à l'incinération de carcasses animales, comptabilisées dans le secteur « Traitement centralisé des Déchets ».

b. Des spécificités du secteur agricole concernant la nature et les effets des GES

Hormis certaines émissions d'origine fossile (émissions de CO₂ liées à la combustion), **une grande partie des émissions de GES de l'agriculture est d'origine biogénique** (c'est-à-dire provenant de sources biologiques ou de matières organiques).

À la différence du carbone d'origine fossile (carbone stocké depuis des millions d'années dans le sous-sol), le carbone biogénique s'inscrit dans le « cycle court » considéré comme naturel du carbone (carbone stocké via le processus de photosynthèse - ou émis, par la biomasse, dans les dernières années). C'est en particulier le cas du CH₄ émis par les ruminants, issu d'un processus de dégradation

²²⁴ En lien avec les processus biologiques de nitrification / dénitrification par les microorganismes du sol

²²⁵ Les émissions liées à la combustion dans les engins, moteurs et chaudières de la sylviculture ne représentent qu'une très faible part du total (0.5 MtCO₂e environ sur 11 MtCO₂e).

²²⁶ Organisation et Méthodes des Inventaires Nationaux des Émissions Atmosphériques https://www.citepa.org/wp-content/uploads/publications/omineia/OMINEA_2023.pdf

anaérobie de la biomasse végétale, elle-même issue de la photosynthèse. D'un point de vue stoechiométrique, l'atome de carbone du méthane émis est ainsi directement issu de la molécule de CO₂ absorbée par la plante quelques jours ou semaines auparavant. Ainsi le CH₄ biogénique émis ne « rajoute » pas - après sa dégradation dans l'atmosphère, de molécule « additionnelle » de CO₂ puisque l'équivalent d'une molécule a déjà été captée via la photosynthèse (cela ajoute une molécule de CH₄ pendant 12 ans mais pas de molécule de CO₂ additionnelle au bout des 12 ans). C'est là la principale différence avec le CH₄ fossile qui, après sa dégradation dans l'atmosphère, va ajouter l'effet d'une molécule de CO₂ additionnelle puisque non captée par un processus récent. Ceci explique que le PRG du CH₄ biogénique soit légèrement moins élevé que celui du CH₄ fossile (voir encadré ci-dessous). **Néanmoins, si l'opération est neutre au premier ordre (stoechiométrique), elle ne l'est pas au second ordre, puisque la molécule de CH₄ (même biogénique) émise a un PRG d'environ 28 (voir encadré), contre un PRG de 1 pour une molécule de CO₂ qui serait émise.**

Comptabilité des gaz à effet de serre – Potentiel de Réchauffement Global

Afin de pouvoir additionner des émissions de GES de différentes natures dans les comptabilités nationales, le GIEC a mis au point un indice représentant l'apport d'énergie de chaque gaz dans l'atmosphère en comparaison de celui du CO₂, le Potentiel de Réchauffement Global ou PRG.

Le PRG du CO₂ est fixé par convention à 1. Les émissions des autres gaz sont converties en « équivalent CO₂ » (CO₂e) selon leur capacité, comparée à celle du CO₂, à participer au réchauffement global par le forçage radiatif, équilibre entre le rayonnement solaire entrant et les émissions de rayonnements infrarouges sortant de l'atmosphère, cumulé sur une période donnée.

La période de référence a été fixée à 100 ans dans le cadre de la CCNUCC²²⁷ et du Protocole de Kyoto. Les valeurs de PRG utilisées dans les inventaires CITEPA sont celles du 5^{ème} rapport du GIEC, conformément aux exigences de la CCNUCC et parce qu'il n'a pas encore été décidé au niveau international d'utiliser celles du 6^{ème} rapport du GIEC. Les valeurs de PRG100 retenues à ce stade sont donc de 28 pour le méthane et de 265 pour le protoxyde d'azote.

Le choix de la période de référence pour le PRG et donc de la métrique utilisée pour les calculs est source de débats nombreux entre spécialistes. En effet, les GES ayant des durées de vie variables dans l'atmosphère, la valeur du PRG différera fortement selon la période considérée. C'est le cas en particulier des gaz à courte durée de vie, comme le méthane, au fort pouvoir réchauffant à court terme, mais dont l'impact diminue rapidement après quelques décennies. En revanche, le CO₂, à plus longue durée de vie, exercera un impact plus durable sur le long terme. Les poids relatifs des effets de ces deux gaz sont donc très dépendants de l'horizon temporel retenu. Le protoxyde d'azote est entre les deux.

Le méthane étant un GES à courte durée de vie dans l'atmosphère, le PRG100 ne reflète pas exactement son effet réchauffant²²⁸. D'autres métriques récentes (PRG*, GGTP) sont proposées par certains climatologues pour mieux caractériser sa dynamique²²⁹.

Le PRG* a ainsi pour objectif de mesurer l'impact sur le réchauffement de la variation des émissions de méthane. Dans sa version améliorée, il repose sur une équation prenant en compte les variations d'émissions sur 20 ans calculées avec PRG100 ainsi qu'une partie « fixe » rendant compte des effets à plus long terme des émissions à un moment donné.

La figure ci-dessous indique la manière dont le PRG* représente les impacts des émissions de méthane sur la température, associés à sa courte durée de vie, par rapport au PRG100 :

²²⁷ Convention-Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique

²²⁸ Lynch et al., 2021

²²⁹ Cain et al., 2019; Smith et al., 2021

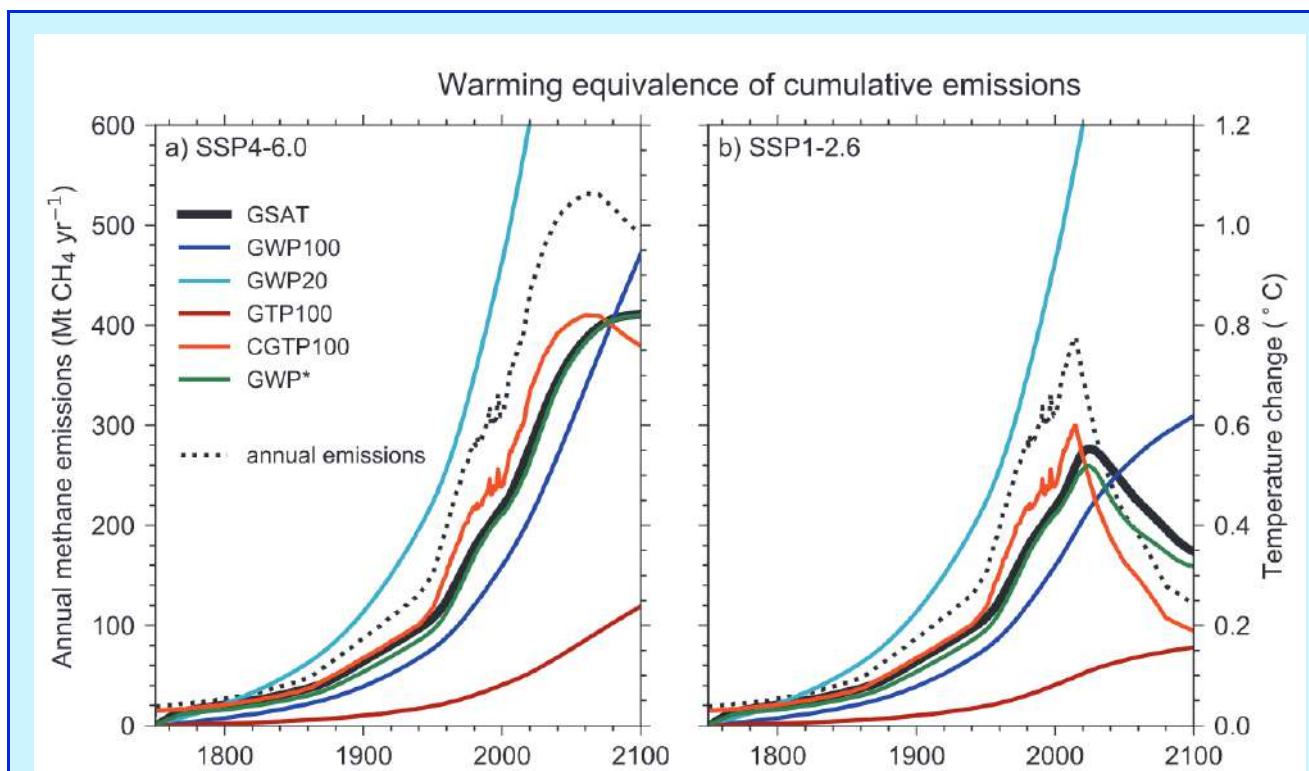


Figure 39 : comparaison des courbes d'impact passée et projetées des émissions de méthane, en référence à la modélisation GSAT en mobilisant différentes métriques, dont le PRG*, le PRG100 et le PRG20. La courbe de référence est celle en traits pleins noirs. GWP correspond à PRG.

Source : IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*

Le 6ème rapport du GIEC reconnaît l'existence des différentes métriques et en particulier le PRG*. Il ne recommande néanmoins l'usage d'aucune d'entre elles ce qui laisse à ce stade une prééminence à l'usage du PRG100. Il pointe que les métriques peuvent faciliter la comparaison des effets des émissions pour appuyer l'évaluation ou la mise en œuvre de politiques publiques, sans être à l'origine de la définition de leurs ambitions. Ne remettant pas en question l'impératif de baisse des émissions, chaque métrique a des spécificités qui distribuent différemment la compréhension des enjeux et des efforts à consentir par les différentes parties.

En synthèse, quelle que soit la métrique utilisée, le fait qu'une réduction des émissions de méthane aurait un impact rapide sur l'atténuation du réchauffement climatique global n'est pas remis en cause. Cet objectif est central et à bien articuler dans un agenda global de réduction des autres GES d'origine agricole. Un débat scientifique et politique entre spécialistes devrait être ouvert afin de mieux qualifier les avantages et inconvénients des différentes métriques et leurs implications.

c. Un secteur aux émissions directes de GES diverses : CH₄, N₂O et CO₂, en baisse tendancielle modérée

L'inventaire national 2024 rapportant les émissions françaises de GES de l'année 2022²³⁰ attribuée à l'agriculture 18,7 % de ses émissions, soit 74,2 Mt CO₂e, se répartissant ainsi :

- 56 % de méthane (CH₄), soit environ 41 Mt CO₂e,
- 29 % de protoxyde d'azote (N₂O), soit environ 21 Mt CO₂e,
- 14,2 % de CO₂, soit environ 10 Mt CO₂e.

Ces émissions se répartissent comme suit : 59,3 % pour l'élevage, 26,5 % pour les cultures et 14,2 % pour les engins, moteurs et chaudières.

²³⁰ Citepa, 2024. Rapport Secten – Émissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques 1990-2023.

En raison de l'utilisation de valeurs de PRG actualisées et d'un changement méthodologique important pour la comptabilité des émissions de N₂O des sols agricoles (le PRG100 du N₂O a été révisé à la baisse, de 298 à 265, dans le 5^{ème} rapport du GIEC actuellement utilisé par rapport au 4^{ème} rapport), la part relative de méthane et de protoxyde d'azote dans le total des GES d'origine agricole est modifiée de façon significative pour les deux derniers inventaires par rapport aux précédents. Ainsi, l'inventaire 2022²³¹ rapportant les émissions de l'année 2020 faisait état de 46 % d'émissions de CH₄, 40 % d'émissions de N₂O et d'environ 13 % d'émissions de CO₂.

Les émissions de N₂O par les sols cultivés sont le résultat de leur fonctionnement biologique et de l'itinéraire technique choisi par l'agriculteur, et sont directement liées aux quantités d'azote épandues pour leur fertilisation. Les calculs tiennent compte des apports de fertilisants minéraux (dont les émissions liées à la fabrication ne sont pas imputées au secteur agricole, voir plus loin partie II.3.B), des résidus de cultures, des déjections animales (y compris les imports de pays frontaliers), des boues de stations de traitement des eaux usées, des composts et des digestats de méthanisation. **Le secteur agricole constitue le principal contributeur aux émissions nationales de N₂O (à 86 %)**, qui provient par ailleurs d'autres sources anthropiques (quelques procédés industriels, véhicules équipés de pots catalytiques) et de sources naturelles (transformation de l'azote réactif par les microorganismes du sol).

Le secteur agricole est un contributeur majeur aux émissions nationales de CH₄, issu principalement de la fermentation entérique des ruminants, de la gestion des déjections animales et du brûlage des résidus agricoles, avec 71 % des émissions totales hors UTCATF. D'autres sources importantes de méthane proviennent des décharges et du traitement des déchets (21 % hors UTCATF), ainsi que du transport et de la distribution de gaz naturel. Il existe également d'autres sources de méthane, en particulier les rizières²³², et les zones naturelles humides comme les marais et tourbières.

Globalement, les émissions annuelles de CO₂e du secteur agricole ont baissé de 16 % depuis 1990, principalement du fait de la diminution (subie) des effectifs du cheptel bovin, et donc des émissions de méthane mais également de protoxyde d'azote (réduction de l'azote excréte à la pâture et de l'azote organique à épandre) et de la moindre utilisation de fertilisants azotés minéraux (pratiques d'optimisation) et donc des émissions de protoxyde d'azote. En revanche, les émissions annuelles directes de CO₂ restent relativement stables depuis 1990, autour de 10 à 12 MtCO₂.

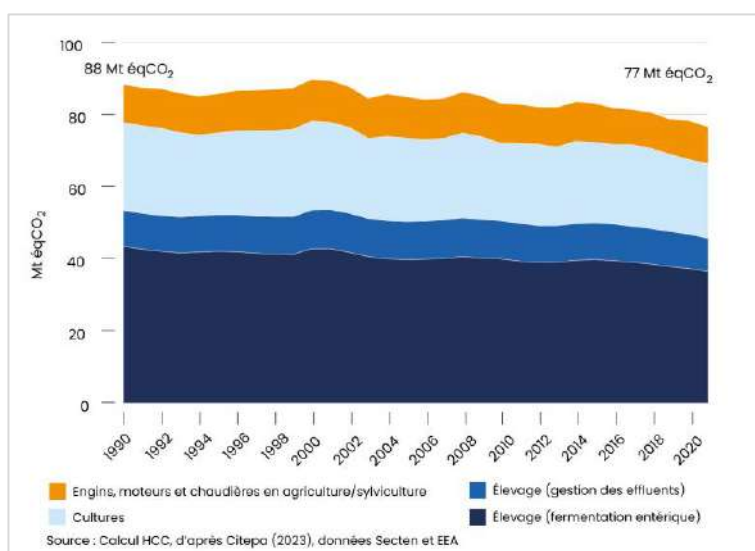


Figure 40 : Évolution des émissions de GES du secteur de l'agriculture en France entre 1990 et 2021

Source : HCC, 2024

²³¹ Citepa Rapport-Secten-2022 Rapport-complet v1.8

²³² Un facteur d'émission de 106 kg CH₄/ha/an a été calculé pour la Camargue – OMINEA, 2023, page 873

Sur les cinq dernières années (2017-2022), la baisse annuelle moyenne est de l'ordre de - 1.8 % par an, en phase avec les budgets de la Stratégie nationale bas-carbone (SNBC) 2 à horizon 2030, stratégie dont les budgets étaient cependant basés sur des modes de calcul des émissions de N₂O qui ont depuis été affinés²³³.

d. Des efforts à poursuivre pour atteindre les objectifs de réduction assignés au secteur agricole, mais adaptés à ses spécificités

Comme les autres secteurs économiques, l'agriculture est appelée à contribuer à l'effort général de réduction des émissions de GES. **La SNBC2 actuellement en vigueur vise une réduction de 18 % des émissions directes du secteur en 2030 par rapport à 2015, soit un objectif de 68 MtCO₂e, et de 46 % à l'horizon 2050 (hors UTCATF), soit un objectif total de 48 MtCO₂e alloué à l'agriculture en 2050. Il est à noter que cet objectif chiffré ne concerne que les émissions directes du secteur, aucun objectif quantitatif n'étant défini à ce stade pour les émissions indirectes, pourtant significatives (voir partie B).** Cela représente un effort de baisse de l'ordre de 1,5 % par an pendant 30 ans. À cette échéance, l'agriculture représenterait alors 60 % des émissions résiduelles nationales.

Concernant les émissions agricoles de N₂O, la définition d'une trajectoire annuelle de réduction est prévue par la loi Climat et Résilience²³⁴ avec **un objectif de - 15 % de N₂O en 2030 par rapport à 2015**. Les objectifs de réduction des émissions nationales s'inscrivent par ailleurs dans les engagements climatiques internationaux de la France.

Concernant le méthane, la France est signataire du « Global Methane Pledge »²³⁵ élaboré dans le cadre de la COP26 : avec plus de 150 autres pays, l'engagement a été pris de **réduire de plus de 30 % les émissions de méthane d'ici à 2030 par rapport au niveau de 2020**, toutes sources d'émissions confondues. Il s'agit d'un engagement collectif non contraignant pour chaque État signataire ni pour chaque secteur, mais qui peut donner lieu à des déclinaisons sur le plan national.

Un certain niveau d'émissions agricoles paraît cependant incompressible, même en agriculture biologique. L'apport d'engrais azoté sur les sols, qu'il soit d'origine organique ou minérale, s'accompagne inévitablement d'émissions de N₂O, même en optimisant les pratiques de fertilisation, et il semble difficilement concevable de s'en affranchir complètement, à moins d'une réduction drastique des productions agricoles, ce qui peut être difficilement compatible avec des impératifs de sécurité alimentaire²³⁶. Cette réduction pourrait entraîner paradoxalement dans le même temps une diminution de la captation de carbone via la photosynthèse (voir partie C ci-après). De même, les émissions de méthane par la rumination des animaux d'élevage ne peuvent, en l'état actuel des connaissances, être évitées totalement, sauf à renoncer à tout cheptel, ce qui semble difficilement envisageable.

Les objectifs de réduction des émissions agricoles à l'horizon 2050 de la SNBC2 (- 46 %) sont ainsi adaptés aux spécificités du secteur et sont moins importants que ceux assignés aux autres secteurs économiques : plus de 90 % pour les secteurs des transports, du bâtiment et de la production d'énergie, 81 % pour le secteur industriel et 66 % pour le secteur des déchets, toujours exprimés en réduction par rapport à 2015.

²³³ Les budgets carbone de la SNBC-2 étaient définis sur la base de PRG issus de l'AR4 du GIEC, alors que ce sont désormais les PRG de l'AR5 qui sont utilisés, depuis l'édition 2023, pour l'inventaire Secten du CITEPA. Cela a conduit à des recalculs importants des émissions historiques et à des budgets carbone pouvant se retrouver en décalage avec les émissions actuelles.

²³⁴ Loi n°2021-1104 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets - <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043956924>

²³⁵ <https://www.globalmethanepledge.org/>

²³⁶ A la nuance près que la sécurité alimentaire ne s'apprécie pas qu'au regard des rendements et de la biomasse alimentaire obtenus, mais également de l'évolution des régimes alimentaires et de la diversité des protéines produites.

Secteurs	Réduction des émissions par secteur du scénario AMS à l'horizon 2050	
	Par rapport à 2015	Par rapport au scénario tendanciel « avec mesures existantes » (AME) (2050)
Transports	-97%	-97%
Bâtiment	-95%	-92%
Agriculture/sylviculture (hors UTCATF)	-46%	-40%
Industrie	-81%	-78%
Production d'énergie	-95%	-97%
Déchets	-66%	-37%
Total (hors UTCATF)	-83%	-83%

Secteur	Facteur de réduction
Extraction, transformation et distribution d'énergie	36
Industrie manufacturière et construction	9
Traitement centralisé des déchets	3
Résidentiel, tertiaire, commercial, institutionnel	20
Agriculture	2
Transports	33

Sources : MTEs, SNBC 2 et projet de SNBC 2.

Figure 41 : Objectifs de réduction des émissions de la SNBC2 par secteur et facteur de réduction associé

Source : CITEPA (Secten 2024) p. 79

Si l'on se place dans une perspective historique²³⁷, les objectifs pour 2050 correspondent d'ailleurs au niveau d'émissions estimées pour le milieu du siècle dernier, qui étaient de l'ordre de 50 MtCO_{2e}, essentiellement constituées de méthane et protoxyde d'azote.

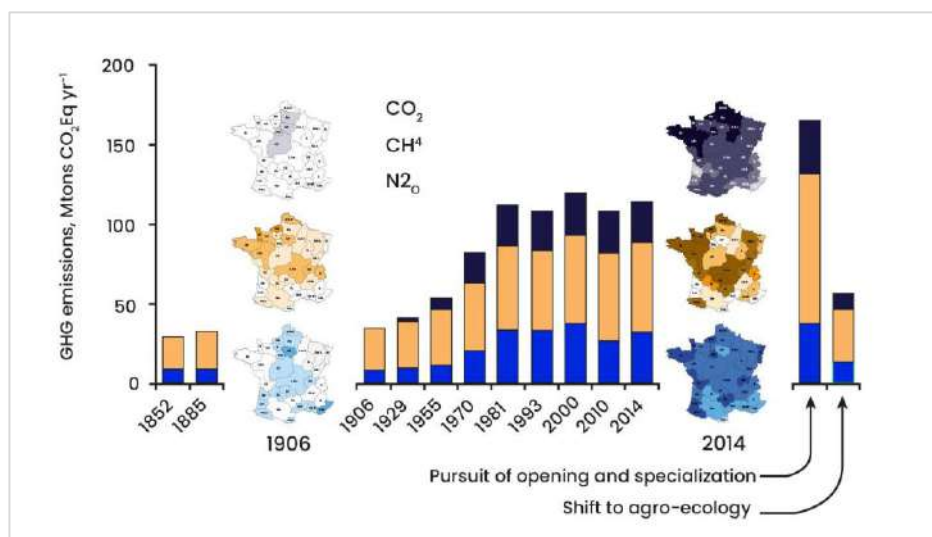


Figure 42 : Évolution historique des émissions de GES du secteur agricole en France (1852-2014)

Source : Garnier et al., 2019

²³⁷ <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969719300543>

B. Fabrication des engrais, transports, importations : des émissions indirectes du secteur agricole hexagonal essentielles à prendre en compte

Aux émissions directes des activités agricoles s'ajoutent des émissions indirectes pour lesquelles aucun objectif de réduction n'est à ce stade fixé par la SNBC2, parfois non comptabilisées dans le secteur agricole, qui sont essentiellement liées à la fabrication des fertilisants azotés et des autres intrants (autres engrais, produits phytosanitaires, fabrication du matériel, construction des bâtiments agricoles), à la fabrication des aliments pour animaux importés (émissions usuellement comptabilisées dans le pays producteur), au transport des marchandises et aux émissions du secteur énergétique induites par les consommations finales de l'agriculture (raffineries, etc.). Attention, certains périmètres n'étant pas exclusifs les uns des autres (par exemple, une partie du transport de l'alimentation animale est comptabilisée dans les importations d'alimentation animale, limitées ici au soja), il convient de ne pas sommer les ordres de grandeur de ces émissions indirectes proposées ci-dessous.

Fabrication des engrais azotés <i>Dont fabrication en France (Données 2019)</i>	10 Mt 2.6 Mt
Fabrication des autres intrants (autres fertilisants, produits phytosanitaires, matériel, bâtiments)	5 Mt
Production d'énergie	1 Mt
Alimentation animale / Déforestation importée (soja)	4 Mt
Transport de l'alimentation animale	4,2 Mt

Tableau 3 : Ordre de grandeur des émissions indirectes de l'agriculture française en 2021 (MtCO₂e)

Source : SGPE, CLIMAGRI®, ADEME, IDDRI

Par ailleurs, la transformation des produits agricoles via l'industrie agroalimentaire française (sucrieries, transformation des céréales, industries laitières, etc.) génère des émissions estimées à environ 8,4 Mt CO₂e en 2022²³⁸. Ces filières seront plus particulièrement étudiées dans le prochain projet consacré aux industries agro-alimentaires.

a. Les émissions liées à la fabrication des engrais azotés

La fabrication des engrais azotés de synthèse produit des émissions de CO₂ liées à la consommation de gaz fossile, à la fois comme matière première et comme combustible, ainsi que des émissions de N₂O. Elle constitue ainsi une part significative des émissions de GES de l'industrie de la chimie française, avec 14 % des émissions de la filière, en seconde place derrière la pétrochimie (27 %), pour un total de l'ordre de 2,6 MtCO₂e en 2019²³⁹. Soit, pour un volume de fabrication d'environ 0,8 Mt d'azote, environ 3,5 kg CO₂e par kg N. Des progrès importants ont pourtant été réalisés ces dernières années par les usines de production d'ammonitrate en France et en Europe, via un nouveau procédé de catalyse qui a permis de réduire de plus de 90 % les émissions de N₂O, et une réduction de moitié des émissions de GES des engrais fabriqués en Europe depuis le début des années 2000²⁴⁰.

Au total, en tenant compte également des importations d'engrais (75 % de la consommation), les émissions liées à la fabrication des engrais azotés utilisés par l'agriculture métropolitaine avoisinent les 10 MtCO₂e²⁴¹, émissions qui seraient en partie relocalisées si l'on voulait gagner en souveraineté sur ces intrants sans en décarboner la fabrication (voir partie III.1.B.) Par ailleurs, les émissions évitées par l'utilisation de fertilisants organiques à la place d'engrais de synthèse représenteraient 4,5 millions tonnes CO₂e²⁴².

²³⁸ CITEPA, 2023. Gaz à effet de serre et polluants atmosphériques. Bilan des émissions en France de 1990 à 2022. Rapport Secten éd. 2023

²³⁹ Secrétariat Général à la Planification Écologique, 2023a. La planification écologique dans l'agriculture - 9 juin 2023 – Point d'étape

²⁴⁰ <https://www.unifa.fr/sites/default/files/2021-11/dossier-de-presse-unifa-2021-vf.pdf>

²⁴¹ Secrétariat Général à la Planification Écologique, 2023a. La planification écologique dans l'agriculture - 9 juin 2023 – Point d'étape

²⁴² https://www.interbev.fr/wp-content/uploads/2023/09/l'essentiel-bovins-2023_web.pdf

Une réduction très ambitieuse de 9 MtCO_{2e} des émissions indirectes liées à l'azote est envisagée à l'échéance 2030²⁴³, via notamment la baisse des émissions de la production locale d'engrais.

b. Les émissions liées à la fabrication des aliments pour animaux importés

Concernant les graines et tourteaux de soja importés pour l'alimentation animale, **les émissions liées à la déforestation pour la culture du soja en Amérique du Sud sont estimées à 4 MtCO_{2e}**²⁴⁴. Selon les filières animales, la part de ces émissions dans le bilan global varie : elle est logiquement plus significative lorsque la part des aliments importés dans l'alimentation des animaux est plus importante (voir partie III.2.). Aujourd'hui, environ 4 MtMS de tourteaux, soja et grains sont importés pour répondre aux besoins protéiques du secteur agricole²⁴⁵, dont 2,7 Mt de tourteaux de soja²⁴⁶. Rappelons que le taux de dépendance aux importations est de 67 % en 2021²⁴⁷. La baisse de moitié des importations de soja pour l'alimentation animale envisagée par le SGPE d'ici à 2030 permettrait ainsi de réduire d'environ 2 MtCO_{2e} les émissions indirectes liées à l'élevage.

c. Les émissions liées au transport des productions et des intrants

La distribution des intrants, la collecte des productions dans les fermes, l'expédition des marchandises vers les sites de première transformation, génèrent des flux logistiques conséquents, variables selon les types de productions et leur massification possible, fonction des volumes, de la périssabilité, de la saisonnalité. Nous ne disposons pas à ce stade de données agrégées sur ces émissions, qu'il est difficile de calculer spécifiquement sur le secteur agricole strict considéré dans ce rapport.

Des travaux²⁴⁸ sur l'empreinte énergétique et carbone de l'alimentation en France montrent que le **transport des aliments pour animaux représenterait un tiers du trafic total**, en majorité pour des tourteaux, et presque un cinquième des émissions de CO₂ du secteur, c'est-à-dire **4,2 MtCO_{2e}**. En seconde position vient le transport des fruits et légumes (y compris transformés) représentant un quart du trafic total et la plus grosse part en tonnage, à l'origine d'un tiers des émissions liées au transport soit 6,8 MtCO_{2e}.

Si l'on considère toute la chaîne de la production à la distribution, les produits agricoles et agroalimentaires représentent presque un tiers des marchandises transportées²⁴⁹ en tonnes/kilomètres en 2019 pour un total de 22 MtCO_{2e}. L'analyse de l'impact de cette géographie logistique du système agroalimentaire sera approfondie lors du prochain projet dédié.

d. Les émissions liées à la fabrication des produits phytosanitaires

À partir de la base Ecoinvent²⁵⁰, seule base de facteurs d'émissions disponibles pour l'industrie phytosanitaire avec plus d'une centaine de substances actives étudiées, le guide GES'TIM+²⁵¹ fournit des valeurs moyennes d'émissions par poids de substance active, en prenant en compte la fabrication et le transport. **Les émissions liées à la fabrication des produits phytosanitaires sont néanmoins marginales par rapport aux autres sources d'émissions, de l'ordre de 8 kgCO_{2e} par kg de substance active**, soit de l'ordre de 0,5 MtCO_{2e} pour l'année 2022.

²⁴³ Secrétariat Général à la Planification Écologique, 2023a. La planification écologique dans l'agriculture - 9 juin 2023 - Point d'étape.

²⁴⁴ Ibid.

²⁴⁵ Ibid.

²⁴⁶ <https://www.franceagrimer.fr/fam/content/download/72952/document/MOL-0124.pdf?version=1>

²⁴⁷ https://www.franceagrimer.fr/content/download/70677/document/ETU-2023-SOUVERAINETE_ALIMENTAIRE.pdf

²⁴⁸ Barbier et al., 2019, L'empreinte énergétique et carbone de l'alimentation en France, Club Ingénierie Prospective Energie et Environnement, Paris, IDDRI

²⁴⁹ https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2021-02/datalab_82_bilan_transports_2019_decembre2020.pdf

²⁵⁰ <https://ecoinvent.org/>

²⁵¹ Guide GES'TIM+, Référentiel méthodologique d'estimation des impacts environnementaux des activités agricoles sur le changement climatique, la consommation d'énergie non renouvelable et la qualité de l'air, 2020 p. 391

L'inventaire Floréal du CITEPA : les émissions par type de production agricole

Parallèlement à la diffusion des résultats de comptabilité d'émissions au format SECTEN, le CITEPA propose un autre format de rapportage des émissions des secteurs Agriculture, Forêt et Usage des terres, l'inventaire Floréal. Celui-ci reprend les résultats d'émissions des inventaires nationaux et les répartit différemment en s'appuyant sur des facteurs d'allocation pour mieux cerner l'ensemble de l'activité agricole. Il intègre notamment les émissions liées à la production des intrants et à la fabrication des aliments du bétail, ainsi qu'à la transformation des produits agricoles. Ces allocations plus fines permettent de traiter avec plus d'attention l'interdépendance entre les filières animales et végétales.

En France métropolitaine, selon l'inventaire 2022²⁵², **les émissions de GES des sols agricoles se répartissent principalement entre les céréales (49 %), les prairies (18 %), les oléagineux (10 %) et les cultures industrielles (10 %)**. Les cultures permanentes (vignes, vergers, autres cultures permanentes) représentent environ 7 % des émissions, les cultures fourragères annuelles et les autres protéagineux 7 % également. Les céréales représentent des surfaces cultivées importantes et notablement fertilisées, alors que les prairies le sont globalement beaucoup moins.

Les émissions de GES des élevages français se répartissent entre les bovins laitiers (42 %), les bovins viande (40 %), les porcins (6 %), les volailles (5 %) et les autres élevages (8 %). Pour rappel, ces différents décomptes n'intègrent pas les émissions importées, et en l'occurrence celles de l'alimentation animale importée.

Concernant les élevages, des calculs complémentaires pourraient être menés qui tiennent compte d'allocations d'émissions les répartissant entre les différents produits issus des filières, distinguant viande, cuir, engrais organiques, etc. Un « biais alimentaire »²⁵³ restreint la fonction de l'élevage à la fourniture de denrées alimentaires alors qu'il remplit d'autres fonctions et contribue à des services écosystémiques.

Complément : estimation du solde import / export en termes d'émissions de GES

Une partie des émissions de GES attribuées à l'agriculture française correspond à des productions exportées, notamment des céréales, des bovins, du lait... Inversement, la France importe des produits agricoles tels que des fruits et légumes, des tourteaux de soja, de la viande, du poisson... Malgré les difficultés liées à la compilation de données internationales sur les empreintes carbone, **une estimation du bilan de ces échanges internationaux²⁵⁴ générerait un solde positif d'émissions de GES de 9,3 MtCO₂e au stade de la production agricole, soit un peu plus de 10 % des émissions agricoles françaises**. En d'autres termes, les émissions des produits exportés excèdent les émissions des produits importés.

C. Le stockage de carbone dans les sols, un puits vulnérable

Si le secteur agricole est émetteur de GES, il se pratique sur les sols qui, d'une part, constituent des stocks de carbone importants, d'autre part peuvent permettre le stockage additionnel de carbone atmosphérique via le processus biologique de la photosynthèse opéré par les végétaux chlorophylliens. Avec les espaces forestiers et les océans, les sols agricoles sont des puits de carbone naturels potentiels.

La comptabilité du secteur UTCATF (Utilisation des Terres, Changements d'Affectation des Terres et de la Forêt) permet de suivre, par unités géographiques (forêts, terres cultivées, prairies, zones humides, zones urbanisées, etc.), les flux d'émissions et d'absorption de carbone entre les sols et l'atmosphère, en tenant compte des différents compartiments de carbone (biomasse morte, biomasse vivante, sol). Contrairement aux inventaires des autres secteurs, les émissions du secteur UTCATF ne sont pas estimées sur la base des activités, mais sur la base des surfaces d'utilisation des terres. Elles sont donc basées sur une matrice de

²⁵² Citepa, 2022. Rapport d'inventaire Floréal – Edition 2022

²⁵³ Daviron B., 2019. Biomasse : une histoire de richesse et de puissance. Versailles, Éditions Quæ, 392 p. (coll. Synthèses)

²⁵⁴ Barbier et al., 2019, L'empreinte énergétique et carbone de l'alimentation en France, Club Ingénierie Prospective Energie et Environnement, Paris, IDDRI

changement d'affectation des sols (artificialisation, boisement de terres agricoles, conversion de prairies en terres cultivées, etc.) pour l'année considérée.

Le secteur des terres est aujourd'hui un puits net de carbone, estimé pour l'année 2023 à - 20,7 MtCO_{2e}, grâce à une croissance de la biomasse forestière et non forestière plus importante que les émissions du secteur qui sont liées à la mortalité des arbres, aux feux de forêt et à l'artificialisation des sols (dont retournement des prairies). Cela représente seulement 5,5 % du total des émissions nationales. Le puits de carbone des terres était encore estimé à environ - 40 MtCO_{2e} au début des années 2010 et constituait un élément central de la SNBC2, remise en cause notamment par l'effondrement du puits forestier ces dernières années, lié à la hausse de mortalité des arbres (sécheresses à répétition, crises sanitaires, incendies), au ralentissement de la croissance des peuplements et à la hausse des prélèvements.

Concernant les terres agricoles, **pour le dernier inventaire, seule la catégorie des « prairies » constitue globalement un puits de carbone (- 0,4 MtCO_{2e})**, alors que le secteur des terres cultivées est globalement émetteur de 9,9 MtCO_{2e}²⁵⁵, essentiellement du fait des variations du stock de carbone dans le sol en raison des pratiques agricoles (en particulier conversion de prairies en cultures) et de l'artificialisation. Agrégés dans la catégorie "terres cultivées", les vergers et toutes les plantations ligneuses sur parcelles agricoles ne sont pas distingués avec cette comptabilité, alors qu'ils constituent de fait des puits de carbone. Le stockage additionnel de carbone dans les prairies et les vergers ne compensent pas du tout les émissions globales du secteur des terres qui reste globalement émetteur de 9,5 MtCO_{2e}.

Remarque : les émissions liées au changement d'affectation des terres (CATF) sont allouées aux unités géographiques d'origine. Ainsi, les émissions de GES liées à l'artificialisation des sols agricoles sont comptabilisées dans le secteur agricole, alors qu'elles correspondent à l'arrêt de l'activité agricole sur ces surfaces. Si l'on tente de distinguer l'utilisation des terres (UT) et le changement d'affectation des terres (CATF) dans la présentation des chiffres, l'Inventaire Floréal 2022 (données 2020) fournit les données significatives suivantes :

- Bilan biomasse des prairies restées prairies = - 1,2 MtCO_{2e}
- Bilan biomasse des prairies devenues cultures = + 1,1 MtCO_{2e}
- Conversion de surfaces de prairies en cultures = + 13 MtCO_{2e}
- Conversion de surfaces de cultures en prairies = - 6 MtCO_{2e}
- Boisement des prairies = - 4 MtCO_{2e}

La conversion de cultures en prairies permet de stocker du carbone, alors que l'inverse en déstocke massivement.

Carbone, CO₂ et Matière Organique des sols

Les sols, mince couche superficielle générée à l'interface du sous-sol et de l'atmosphère, sont composés d'une fraction minérale issue de l'altération de la roche-mère (90 à 99 %), et d'une fraction organique (1 à 10 %). Cette Matière Organique (MO) provient de la décomposition et du métabolisme d'êtres vivants (végétaux, animaux ou microbiens), et donc directement ou indirectement de la fabrication photosynthétique de composés carbonés par les végétaux : elle est constituée, en moyenne, d'environ 50 % de carbone²⁵⁶, qui provient du CO₂ atmosphérique. Sous l'action des micro-organismes du sol, les MO peuvent ensuite être dégradées plus ou moins rapidement selon les conditions pédoclimatiques locales (texture du sol, température, humidité, oxygénation) et les pratiques agricoles, produisant du CO₂ émis en retour dans l'atmosphère : c'est la minéralisation. Ainsi le stock en carbone du sol est fonction de la balance²⁵⁷ entre les apports de MO (résidus de cultures ou apports exogènes tels que effluents d'élevage et composts) et la

²⁵⁵ CITEPA, 2023. Gaz à effet de serre et polluants atmosphériques. Bilan des émissions en France de 1990 à 2022. Rapport Secten éd. 2023

²⁵⁶ Les analyses de sol mesurent précisément la teneur en C organique, puis la multiplient par un coefficient fixe de 1.724 pour en estimer la teneur en MO.

²⁵⁷ Calculée pour les sols agricoles via le « bilan humique »

vitesse de minéralisation : les sols agricoles peuvent donc être des puits de carbone, des sources, ou se trouver à l'équilibre. Certains changements d'affectation des sols comme le déboisement ou le retournement de prairies au profit de cultures annuelles, accélérant la minéralisation, sont très émetteurs de carbone. À l'inverse, l'insertion de couverts végétaux d'interculture dans les rotations augmente les apports en MO et permet l'augmentation de la teneur en carbone du sol. De même, les cultures laissant plus de résidus au sol sont plus favorables à l'augmentation du taux de MO que celles en restituant peu.

La teneur en MO, dont l'optimum dépend de la texture des sols (notamment sa teneur en argiles), est un bon indicateur de qualité, gage de fertilité, d'un bon fonctionnement biologique et d'une bonne stabilité structurale, notamment face aux risques d'érosion. Il existe une teneur plafond en MO pour chaque type de sol.

Le stock de carbone organique dans les 30 premiers centimètres des sols français est estimé à 3 580 Mt de C, équivalent à 13 400 Mt de CO₂e²⁵⁸, hors surfaces artificialisées, dont 1 736 Mt de C, soit 48,5 % sous les sols agricoles (22 % sous prairies et 26,5 % sous terres arables) et 38 % sous les sols forestiers²⁵⁹. À l'hectare, ces stocks sont en moyenne plus importants, mais aussi plus variables, pour les prairies permanentes (84,6 tC/ha) et les sols forestiers (81 tC/ha) que pour les terres arables (51,6 tC/ha). Pour ces dernières, ce niveau moyen de stock correspond approximativement à une teneur de 1,3 % de C et de 2,3 % de MO (pour une densité apparente de 1,3).

À l'échelle planétaire, le stock de carbone organique dans les sols est estimé à 2 400 000 MtC (2400 GtC, Giga tonnes de C), soit le triple de la quantité de carbone contenue dans l'atmosphère sous forme de CO₂ (860 GtC). Sachant que les émissions anthropiques mondiales sont estimées à environ 10 GtC par an, un calcul simple suggère qu'une hausse annuelle de 0,4 %, soit 4 pour 1000, du stock de C dans les sols pourrait théoriquement les compenser : c'est la base de l'Initiative internationale 4p1000²⁶⁰ portée par la France à l'occasion de la COP21, qui vise à montrer que l'agriculture, et en particulier les sols agricoles, peut jouer un rôle essentiel en matière de changement climatique en tant que puits de carbone.

La cinétique de minéralisation de la MO et les échanges gazeux entre le sol et l'atmosphère induisent des variations du stock de carbone dans le sol, en particulier dans les 30 premiers centimètres où le carbone est labile. Le stockage pérenne du carbone, plus en profondeur dans le profil de sol, sera favorisé par l'utilisation de variétés ou d'espèces avec une importante masse racinaire²⁶¹ ou de végétaux à enracinement profond (arbres via l'agroforesterie). La mesure et le suivi du stock de carbone sont des enjeux majeurs pour tous les programmes de « carbon farming ».

Le stockage additionnel de C implique en outre de stocker de l'azote dans le même temps, puisque la MO du sol contient 5 % d'azote organique (rapport C/N de 10 environ), Si cet azote provient d'apports de fertilisants supplémentaires, il en résulte aussi des émissions additionnelles de N₂O et de CO₂ liées à la fabrication des engrais, ou de CH₄ liées à l'élevage. Et une augmentation de la teneur en MO du sol risque d'entraîner des pertes plus importantes de N₂O, par accroissement du flux d'azote minéralisé dans le sol.

La capture de carbone augmentée des plantes en C4 (maïs, sorgho, canne à sucre, etc.)

Certaines plantes d'origine tropicale dites « plantes en C4 » ont naturellement développé un rendement photosynthétique supérieur : à la différence de la majorité des plantes (« en C3 »), leur mode de fixation du CO₂ aboutit à la production de molécules constituées de 4 atomes de carbone (et non 3). Elles s'épanouissent en conditions chaudes et ensoleillées, et se contentent alors de moins d'eau par unité de biomasse produite que les plantes en C3. Des programmes de recherche agronomique européens²⁶² s'intéressent au sujet et étudient particulièrement le tournesol, qui offre naturellement des variétés en C3, en C4 et en C3-C4 intermédiaires, permettant d'étudier l'évolution spontanée du métabolisme de la photosynthèse.

²⁵⁸ 1t C = 44/12 t CO₂ = 3,67 t CO₂ et 1t CO₂ = 0,273 t C

²⁵⁹ <https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/4pM-Synth%C3%A8se-Novembre2020.pdf>

²⁶⁰ <https://4p1000.org/>

²⁶¹ http://apad.asso.fr/images/pdf/2021-LIVRE_BLANC-ACS-CARBONE.pdf

²⁶² <https://gain4crops.eu/>

D. Contribution de l'agriculture à la décarbonation des autres secteurs

En plus d'être un puits de carbone au potentiel significatif (voir partie IV.5.), le secteur agricole contribue à la décarbonation des autres secteurs économiques dont la propre transition repose sur le recours à la biomasse agricole, recours susceptible d'engendrer des conflits d'usage déjà évoqués (voir partie I.3.).

a. Contribution à la fourniture de bioénergies

Les émissions de GES évitées par les autres secteurs économiques par l'usage des biocarburants et de biogaz sont estimées à 7 MtCO₂e, soit un dixième environ des émissions directes du secteur agricole, correspondant à 40 TWh²⁶³. Les stratégies de décarbonation en cours visent un objectif additionnel de 3 MtCO₂e évitées grâce aux seuls biocarburants d'ici 2030.

Pour atteindre la neutralité carbone au niveau national, de grands espoirs sont portés sur les ressources agricoles qui deviendraient majoritaires par rapport aux ressources forestières dont le gisement est remis en question par l'effondrement du puits forestier (voir ci-dessus partie C.), alors que le potentiel agricole est massif. **Les axes identifiés sont la hausse des effluents d'élevage utilisés en méthanisation, le triplement des couverts intermédiaires, en particulier des CIVE, l'agroforesterie et les haies.** Les agriculteurs seraient aussi fortement incités à mobiliser des surfaces pour produire des cultures lignocellulosiques, comme le miscanthus, pour la fabrication de carburants de deuxième génération²⁶⁴. Un scénario de 15 % de biogaz, correspondant à 50 TWh, est envisagé par la Stratégie Française pour l'Énergie et le Climat²⁶⁵ en 2030. Ces différents leviers sont examinés plus en détail dans la réflexion sur des scénarios de transformation à échéance 2050 exposés plus loin (voir partie IV).

Les parcelles agricoles sont aussi un des lieux privilégiés de l'installation d'éoliennes. **Les autres formes de production d'énergie renouvelable à la ferme ou aux champs comme l'agrivoltaïsme sont par ailleurs en plein développement**, assurant des revenus parfois supérieurs aux revenus agricoles. L'emprise au sol de ces installations reste à considérer et fait l'objet de débats concernant le taux de couverture de sol acceptable.

Le développement de l'agrivoltaïsme en France

Il existe aujourd'hui peu de projets démonstrateurs combinant agriculture et production photovoltaïque en France, et globalement peu de références bibliographiques sur l'impact de ces installations sur la photosynthèse et la croissance des plantes (donc les phénomènes de concurrence pour la ressource solaire). Filière relativement récente, l'agrivoltaïsme est encore en phase de structuration.

Dans les bénéfices apportés par l'agrivoltaïsme, on note des résultats agronomiques sur des cultures indiquant une diminution de la température en période caniculaire (jusqu'à 5 °C), une augmentation de la température en période de gel (jusqu'à 2 °C), une diminution de l'évapotranspiration de 40 % et une diminution des besoins en irrigation de 30 %²⁶⁶. Les projets d'agrivoltaïsme fournissent également des zones d'ombrage aux animaux d'élevage, pouvant ainsi contribuer à l'amélioration du bien-être animal, des questions restant néanmoins invoquées concernant des risques de blessures pour les animaux. Plus globalement d'autres questions subsistent sur l'adaptation des structures à l'activité de l'agriculteur, qui plaident en faveur d'une réflexion à approfondir sur la meilleure combinaison des panneaux avec l'activité des producteurs afin d'éviter les conflits.

Il est à noter que ces résultats dépendent grandement des lieux où les expérimentations ont été réalisées. En effet, les résultats positifs de l'impact des panneaux solaires sur les cultures sont surtout observés dans

²⁶³ Secrétariat Général à la Planification Écologique, 2023a. La planification écologique dans l'agriculture - 9 juin 2023 – Point d'étape

²⁶⁴ Secrétariat Général à la Planification Écologique, 2023b. La planification écologique dans l'énergie - 12 juin 2023 – Document de travail
https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/23242_Strategie-energie-climat.pdf

²⁶⁶ <https://agrivoltaisme.fr/ressource/>

les régions soumises à la sécheresse, à de forts taux d'ensoleillement, et où l'on observe donc des stress hydriques importants. Dans ces régions, l'ombrage apporté par le parc photovoltaïque et la création d'un microclimat plus tempéré et humide vont apporter une véritable protection aux plantes.

Peu de travaux et de retours d'expérience portent sur les rotations majoritaires en France, et il est nécessaire d'intégrer les enjeux des climats futurs (à horizon 20 à 40 ans), qui sont décisifs dans l'évaluation des potentiels de synergie entre cultures et panneaux. En particulier pour des cultures spécialisées, en zone climatique chaude et sèche, les bénéfices pour les cultures comme la vigne, les fruitiers, le maraîchage pourraient être significatifs (moins de consommation d'eau, baisse des températures extrêmes, moins d'évapotranspiration).

De façon générale, il est difficile de conclure aujourd'hui sur l'intérêt mutuel de projets agrivoltaïques, chaque projet ayant ses spécificités.

Un des principaux points de débat concerne le GCR (Ground Coverage Ratio, rapport entre la surface des panneaux et la surface du terrain). Il ne devrait pas dépasser 25 %, en conditions « normales », sous peine de pénaliser le rendement agricole²⁶⁷ (certains producteurs d'énergie chercheraient aujourd'hui à atteindre des GCR de 45 %). Toutefois cette valeur prête à discussion, l'impact variant selon le projet (localisation, type de plante, mais aussi technologie de panneau, etc.). Le GCR ne devrait pas être imposé car il doit s'adapter au type de culture et au contexte pédoclimatique. Certains hauts GCR sont plus à même de rendre un service à la plante (région aride et plante aimant l'ombrage par exemple). Bien sûr, définir des GCR adaptés à tous les contextes et cas de figure relève d'une gageure. Le débat risque donc de perdurer encore pour arriver à une méthode consensuelle.

En effet, les solutions intégrant un pilotage par rapport aux besoins de la plante permettent un GCR plus élevé, combinant ainsi service de protection climatique et partage de la ressource lumineuse aux périodes clés de développement de la plante, tout en permettant une adaptation dynamique aux besoins de différentes cultures, variétés, et aux conditions climatiques de l'année.

La rémunération des agriculteurs et les relations contractuelles entre le développeur de projets agrivoltaïques et l'agriculteur posent également question, et ne font pour l'instant pas l'objet d'un cadre réglementaire, que ce soit en matière de loyer, de vente de l'électricité produite, de propriété de l'installation. Un encadrement juridique plus étoffé pourrait améliorer les conditions de déploiement de ces projets.

De manière générale, et selon la nature des projets, l'agrivoltaïsme, en diversifiant et en stabilisant les sources de revenus des exploitations agricoles, peut permettre d'améliorer la résilience des exploitations, mais aussi créer une concurrence en défaveur de la production agricole si la production d'électricité devient plus rentable. Ce risque est bien identifié par les agriculteurs : en supposant que ces pratiques soient rentables et qu'ils soient accompagnés techniquement, seuls 31 % d'entre eux souhaiteraient mettre en place l'agrivoltaïsme (Source : GCA).

b. Contribution à la fourniture de biomatériaux

Le secteur agricole est aussi appelé à contribuer à la transition et à la décarbonation d'autres secteurs économiques utilisant la biomasse agricole, notamment en textile et en construction.

Ainsi, les surfaces de plantes à fibre (lin et chanvre essentiellement, mais il existe aussi quelques surfaces-tests de coton) ont particulièrement progressé depuis 10 ans, atteignant des records en 2024²⁶⁸, tirées par une demande accrue et un savoir-faire français reconnu : la France est leader mondial de la production de lin teillé et leader européen pour le chanvre. Ces deux espèces présentent des atouts certains en matière de transition.

²⁶⁷ Dupraz C. 2023, Assessment of the ground coverage ratio of agrivoltaic systems as a proxy for potential crop productivity, <https://link.springer.com/article/10.1007/s10457-023-00906-3>

²⁶⁸ https://www.interchanvre.org/la_culture#les_chiffres_cles
<https://allianceflaxlinenhemp.eu/fr/tout-savoir-lin-europeen>

Les différents usages de la laine de mouton (fil, feutre, paillage, isolant, etc.) font aussi l'objet d'une nouvelle dynamique, portée notamment par le collectif Tricolor²⁶⁹ rassemblant l'ensemble des acteurs des filières lainières françaises afin d'augmenter la quantité de laine valorisée localement. Une Feuille de route nationale pour la Structuration des Filières Laines Françaises²⁷⁰ a été présentée en mai 2024 et met en évidence notamment les freins liés au manque d'outils industriels spécifiques pour certaines étapes-clés (lavage des toisons).

La fourniture de matériaux tels que le chanvre (voir ci-dessous) ou la paille²⁷¹ pour la construction se développe également. Certains territoires disposant de ressources abondantes en biomatériaux d'origine agricole tels que les régions Ile-de-France et Normandie mènent déjà des projets²⁷² visant à massifier leur usage dans une optique de décarbonation. Les arbres des paysages agricoles (haies ou agroforesterie) peuvent aussi fournir à terme du bois destiné à l'ameublement, à la construction ou tout autre usage durable, contribuant à la séquestration du carbone qu'il contient (voir partie III.5.).

Le chanvre, culture d'intérêt pour la transition écologique

Compte-tenu de ses multiples applications industrielles et de ses bénéfices environnementaux, le chanvre connaît depuis vingt ans une croissance continue dans la sole française et européenne. Il peut en effet être valorisé, selon ses différentes composantes (graine, chènevotte, fibre), dans une large palette de secteurs, qu'il s'agisse du secteur agroalimentaire, textile, cosmétique, de la construction, de la plasturgie, de la papèterie ou encore de la literie. Il est cultivé sans produit phytosanitaire, sans irrigation, tout en captant du carbone (entre 9 et 15 t/ha/an). Le carbone est alors séquestré dans les matériaux tels que le béton de chanvre.

Les surfaces françaises de chanvre ont triplé en 10 ans, passant de 6 200 ha à 22 000 ha entre 2011 et 2022. Cette croissance fait de la France le leader européen avec 23 400 ha en 2024 et la place sur le podium mondial, en deuxième position derrière la Chine et devant le Canada. La dynamique devrait se prolonger puisque l'interprofession du chanvre (Interchanvre) projette un doublement des surfaces cultivées d'ici cinq ans, couplé à un enrichissement du tissu industriel (deux chanvrières doublent leurs capacités et de nombreux projets de nouvelles chanvrières sont en cours).

Le chanvre présente des bénéfices documentés en matière de décarbonation et de sobriété énergétique. Dans le secteur de la construction, l'utilisation des bétons de chanvre offre par exemple des bénéfices en matière de performance énergétique (jusqu'à 70 % d'économie de chauffage et besoin en climatisation fortement réduit), de qualité sanitaire (absence de composés organo-volatils) de gestion de l'humidité, de confort phonique et de résistance au feu. Le chanvre alimentaire, sous forme de chènevis ou d'huile, est plébiscité pour sa très haute valeur nutritionnelle (absence de facteurs antinutritionnels, richesse en protéines végétales, rapport idéal entre oméga 3 et oméga 6, etc.). De même que le textile est aujourd'hui prisé pour sa naturalité et pour son très faible impact environnemental comparé aux fibres conventionnelles.

Pour soutenir le développement de la filière, InterChanvre a lancé une offre de Paiement pour Services Environnementaux (PSE) Chanvre à destination des acteurs privés pour accompagner les agriculteurs dans leur transition en valorisant les atouts du chanvre et en fournissant des indicateurs sur trois axes : carbone, eau et biodiversité. Ainsi les multiples co-bénéfices énergétiques et environnementaux associés aux usages variés du chanvre pourraient faciliter à l'avenir la montée en puissance et l'ancrage de cette culture dans le paysage agricole et industriel hexagonal.

Sources : Interchanvre, Terres Inovia

²⁶⁹ <https://www.collectiftricolor.org/>

²⁷⁰ <https://www.collectiftricolor.org/feuille-de-route-nationale>

²⁷¹ Réseau Français de la Construction Paille https://www.rfcp.fr/?doing_wp_cron=1730275617.1970260143280029296875

²⁷² <https://arpenormandie.org/ami-cpier-maillons/>

4. Des impacts sur les différents compartiments des écosystèmes

Avec la modernisation des pratiques et notamment le recours à des molécules de synthèse, les activités agricoles sont devenues la source d'impacts environnementaux significatifs dans les différents compartiments des écosystèmes. S'exerçant en milieu ouvert, elles peuvent être la source de pollutions diffuses moins facilement maîtrisables que des pollutions localisées, ces contaminations différant selon la sensibilité du milieu et le degré d'intensification des pratiques. **Ce rapport n'a pas vocation à proposer une présentation détaillée de ces problématiques, mais souhaite en tenir compte dans ses analyses et propositions.**

L'inscription du système agricole dans les limites planétaires

Neuf limites planétaires (ou plutôt frontières planétaires, « planetary boundaries ») ont été identifiées²⁷³ et donnent à voir le haut niveau d'interdépendance entre des déséquilibres physiques déjà constatés ou anticipés pour les futures décennies.

Le système agricole est impliqué dans six des neuf limites planétaires : le changement climatique, l'intégrité de la biosphère (érosion de la biodiversité), le cycle de l'eau douce, la perturbation des cycles biogéochimiques de l'azote et du phosphore, le changement d'usage des sols et l'introduction de nouvelles entités dans la biosphère (parmi lesquelles les produits phytosanitaires).

²⁷³ Travail réalisé par le Stockholm Resilience Center (SRC)

Les 9 limites planétaires

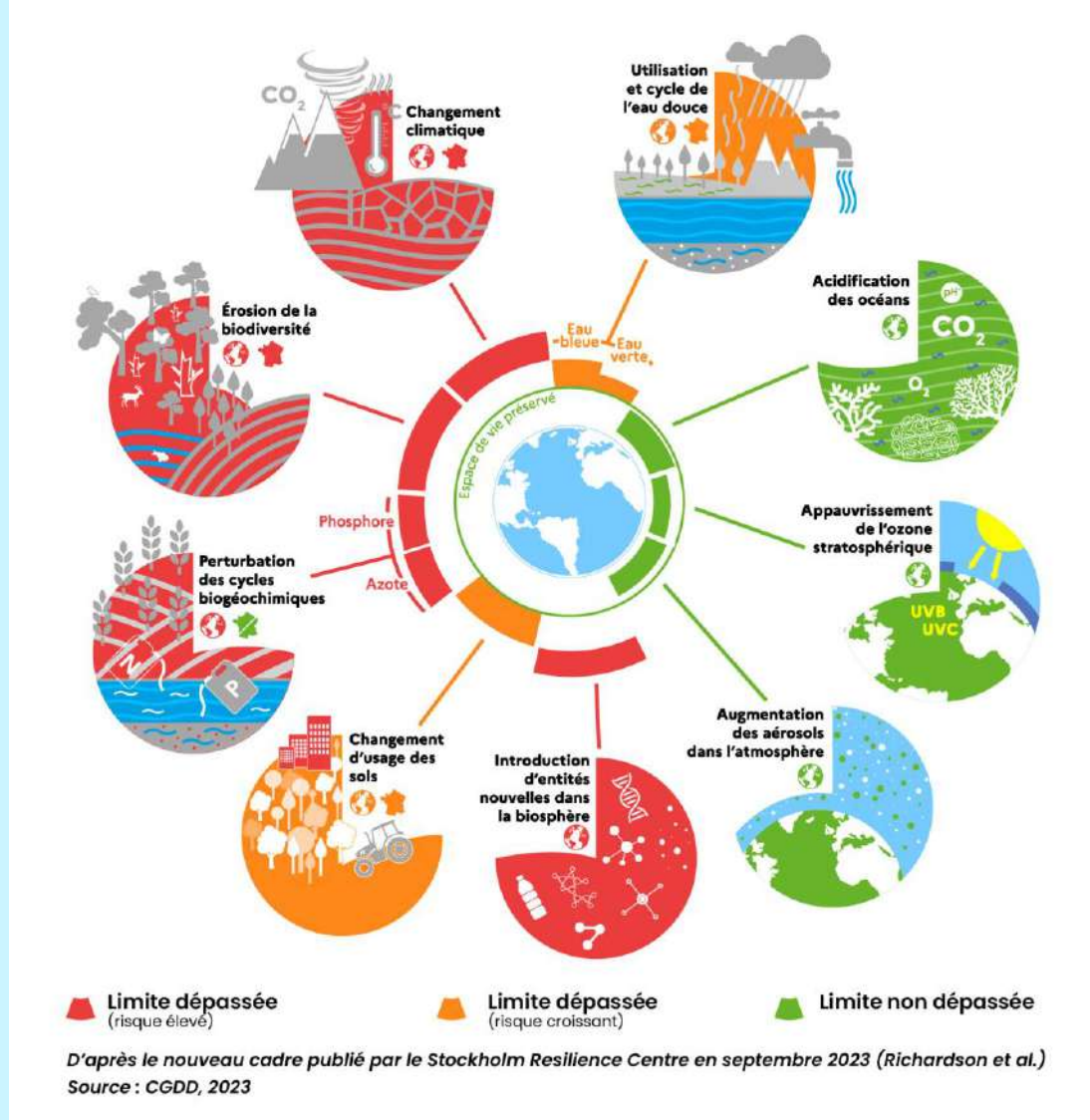


Figure 43 : Limites planétaires (tirées des travaux du Stockholm Resilience Center)

Source : CGDD - Ministère de la Transition Écologique

Les six limites planétaires affectées par les activités agricoles sont celles que les scientifiques considèrent comme ayant été déjà franchies²⁷⁴. Cela souligne le niveau d'urgence à agir sur les déséquilibres concernés, en prenant en compte les effets d'interdépendance, afin de prévenir des effets en cascade sur les écosystèmes.

A. Impacts sur la biodiversité

Les systèmes agricoles ont façonné les paysages français, source d'une grande diversité d'agroécosystèmes et de biodiversité associée, mais les techniques agricoles modernes ont conduit à l'altération des équilibres biologiques des milieux.

Les agriculteurs sont conscients de cet enjeu qu'est le maintien de la biodiversité : ainsi 62 % d'entre eux identifient le déclin de la biodiversité comme un risque pour la viabilité de leur ferme (Source : GCA).

²⁷⁴ <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/la-france-face-aux-neuf-limites-planetaires/livre>

Les principales sources d'impacts de l'agriculture sur la biodiversité sont liées :

- à l'utilisation de produits phytosanitaires, avec des effets différents selon les molécules et les usages,
- à l'utilisation d'engrais préjudiciable selon les milieux et les territoires (effets sur la flore des prairies, sur les milieux aquatiques, etc.),
- aux effets des systèmes agricoles sur la diversité des paysages agricoles (diversité des assolements, taille des parcelles, présence d'infrastructures agroécologiques - haies, arbres, bandes fleuries, etc.),
- au changement d'usage des terres (prairies permanentes et espaces bocagers étant des habitats particulièrement favorables à la biodiversité, malgré des évolutions de pratiques d'élevage parfois inscrites dans une tendance à la simplification).

La biodiversité comprend aussi la diversité cultivée, évoquée ci-dessus (voir II.1.D).

La mesure des impacts des activités humaines sur la biodiversité nécessite des indicateurs²⁷⁵ qu'il n'est pas facile de définir face à la complexité du vivant, à ses différentes échelles et composantes, du gène au paysage, comme des acteurs auxquels ils s'adressent. Différents types d'indicateurs sont ainsi définis pour rendre compte, soit de l'état de la biodiversité (diversité taxonomique, phylogénétique, fonctionnelle, etc.), soit des impacts spécifiques de certaines activités.

Biodiversité, facteur de résilience et de productivité pour les agroécosystèmes

Depuis quelques années, un nouveau front de recherche et d'expérimentation tend à se dessiner en matière de biodiversité. Celle-ci n'est plus seulement envisagée comme une somme de taxons (espèces ou sous-espèces) mis en péril par des activités agricoles en expansion et souvent en quête d'intensification, mais plutôt comme un levier majeur de stabilité et de productivité pour les agroécosystèmes. De nombreuses études récentes^{276,277,278,279,280} établissent en effet la nécessité de préserver et de stimuler la biodiversité agricole, à différentes échelles (parcelle, ferme, paysage) et sous différentes formes (génétique, interspécifique), pour maintenir un haut niveau de productivité et de résilience des systèmes agricoles, faisant face à de nombreuses perturbations d'ordre biotique (ex. pathogène) et abiotique (ex. pressions climatiques).

Ces publications appellent ainsi à une vigilance accrue en ce qui concerne l'état et la dynamique de la biodiversité au sein même des systèmes agricoles, et pas seulement en dehors. Cela fait lien avec la controverse *land sparing vs land sharing* opposant les défenseurs de réservoirs de biodiversité aménagés à l'extérieur des systèmes agricoles, rendus alors plus intensifs, et ceux encourageant à stimuler la biodiversité au sein des agroécosystèmes²⁸¹. Par-delà ces clivages, la littérature a établi aujourd'hui que la richesse spécifique et l'abondance des organismes vivants conditionnent la propension des systèmes agricoles à assurer des services écosystémiques, dont la contribution à la sécurité alimentaire²⁸². En cela, la biodiversité constitue une clé d'entrée, et pas uniquement de sortie, pour apprécier la productivité et la résilience d'un modèle agricole.

Pour aider à penser la biodiversité comme un facteur de production, les chercheurs mettent en avant des données chiffrées pointant l'influence de l'état de la biodiversité sur les rendements agricoles. En France, plusieurs travaux corrélaient ainsi la stagnation de la productivité en grandes cultures à une baisse de la fertilité des sols, liée certes à des carences en nutriments (azote minéral, phosphore), mais également à une moindre diversité de communautés microbiennes du sol, des réseaux de champignons mycorhiziens ainsi que des populations d'insectes et de mammifères. L'érosion subie par ces différents taxons affecte très sensiblement le potentiel productif des sols français²⁸³. Par ailleurs, d'autres modalités d'intensification

²⁷⁵ https://www.fondationbiodiversite.fr/wp-content/uploads/2024/09/FRB_Depliant_Indicateurs_.pdf

²⁷⁶ Ceballos et al., 2015, Accelerated modern human-induced species losses : Entering the sixth mass extinction. *Science Advances*, 1 (5).

²⁷⁷ Newbold et al., 2016a, Has land use pushed terrestrial biodiversity beyond the planetary boundary? A global assessment. *Science*, 353(6296), pp.288-291.

²⁷⁸ Beckmann et al., 2019, Conventional land-use intensification reduces species richness and increases production: A global meta-analysis. *Global Change Biology*, 25(6), pp.1941-1956.

²⁷⁹ Sánchez-Bayo et al., 2019, Worldwide decline of the entomofauna: A review of its drivers. *Biological Conservation*, 232, pp.8-27.

²⁸⁰ Diego Garcia-Vega, 2024, Should we value biodiversity in agriculture? The case for biodiversity as a production factor. *Sciences Po*.

²⁸¹ Ibid

²⁸² Cardinale et al., 2012, Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature*, 486(7401), pp.59-67.

²⁸³ Mueller et al., 2012, Closing yield gaps through nutrient and water management. *Nature*, 490(7419), pp.254-257.

de l'agriculture, telles que le recours accru aux phytosanitaires, auraient un impact néfaste sur l'entomofaune (populations d'insectes), dont la richesse spécifique aurait chuté de 44 % sur le siècle passé²⁸⁴.

L'influence des vers de terre sur la productivité globale d'un système agricole a été étudiée. En cas de pratiques favorables à ces organismes ingénieurs du sol, les rendements pourraient être rehaussés de 25 % et la production de biomasse souterraine de près de 23 %, principalement grâce au recyclage des nutriments et de la matière organique²⁸⁵. Dans cette optique, le non-labour et les techniques culturales simplifiées sont intéressantes pour dynamiser l'activité biologique des sols et améliorer sensiblement leur santé (teneur en matière organique, stabilité structurale...). À l'inverse, certaines pratiques courantes (application de phytosanitaires, travail du sol...) peuvent nuire à ces organismes du sol pourtant non ciblés, ayant pour conséquence une contraction des populations de vers de terre et de champignons mycorhiziens ; ces derniers étant utiles pour la solubilisation du phosphore souterrain²⁸⁶.

Sur le front de la résilience est établie une corrélation positive entre la diversité des communautés microbiennes du sol et la fourniture de services de régulation visant à contrer les pathogènes du sol (*soil-borne pathogens*) à l'image du *Fusarium*, du *Rhizoctonia* ou du *Pythium* s'attaquant aux céréales²⁸⁷. De même, la diversité génétique des espèces végétales cultivées et la variabilité des traits agissent comme un puissant frein à la circulation des bioagresseurs²⁸⁸.

D'autre part, la biodiversité à l'échelle des paysages est également vectrice de protections, de régulations biologiques et de résilience face au réchauffement climatique. À cet égard, de nombreuses publications appellent à accroître la diversité des espèces cultivées, et notamment d'inclure des dispositifs agroforestiers dans les rotations afin d'atteindre un haut degré de complexité structurale et écologique, contribuant à mitiger l'impact des variations climatiques comme à améliorer la résilience des productions agricoles²⁸⁹.

B. Impacts sur la qualité de l'eau : contamination des eaux souterraines et superficielles par des polluants d'origine agricole

Les activités agricoles sont la source de pollutions dites diffuses, car dispersées dans l'espace et le temps, des milieux aquatiques par des substances indésirables : nitrates dérivés des fertilisants azotés ou suite au retournement de prairies et molécules dérivées des produits phytosanitaires. Ces contaminants posent des problèmes de santé publique et d'altération écologique des milieux naturels.

a. La pollution des eaux souterraines par les nitrates, dérivés des engrais azotés (mais aussi issus du retournement de prairies)

La pollution par les nitrates est la première cause de déclassement des masses d'eau souterraines françaises²⁹⁰, qui doivent respecter le seuil de concentration maximum de 50 mg/l pour l'alimentation en eau potable. Si l'amélioration des pratiques agricoles a permis une augmentation progressive de l'efficacité de la fertilisation azotée, il est difficile de réduire à zéro les pertes dans le milieu. D'autant qu'il peut exister une forte vulnérabilité intrinsèque du milieu au transfert d'azote dans les eaux souterraines²⁹¹.

²⁸⁴ Sánchez-Bayo & Wyckhuys, 2019, Worldwide decline of the entomofauna: A review of its drivers. *Biological Conservation*, 232, pp.8-27.

²⁸⁵ Van Groenigen et al., 2014, Earthworms increase plant production: a meta-analysis. *Scientific Reports*, 4(1).

²⁸⁶ Mueller et al., 2012, Closing yield gaps through nutrient and water management. *Nature*, 490(7419), pp.254-257.

²⁸⁷ Schlatter et al., 2017, Disease Suppressing Soils: New Insights from the Soil Microbiome. *Phytopathology*, 107(11), pp.1284-1297.

²⁸⁸ Wetzel et al., 2016, Variability in plant nutrients reduces insect herbivore performance. *Nature*, 539(7629), pp.425-427.

²⁸⁹ Lin et al., 2011, Resilience in agriculture through crop diversification: adaptive Management for Environmental Change. *Bioscience* 61, pp. 183–193.

²⁹⁰ https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2021-02/datalab_80_chiffres_cles_eau_edition_2020_decembre2020v2.pdf

²⁹¹ <https://hal.inrae.fr/POLITIQUES-PUBLIQUES/hal-04352869v1>

Sur la dernière décennie, les actions engagées dans le cadre de la Directive Nitrates ont permis d'améliorer globalement la situation²⁹², mais une part de l'azote épandu reste perdu sous forme de nitrates par lixiviation²⁹³ vers les eaux souterraines s'il n'est pas consommé par les cultures ou piégé par les couverts d'interculture (voir aussi partie III.1.). De plus, une concentration excessive combinée de phosphates et nitrates déséquilibre les milieux aquatiques, entraînant un phénomène d'eutrophisation (explosion des algues vertes).

b. La pollution des eaux par les résidus de produits phytosanitaires

De nombreuses molécules restent détectées dans les eaux superficielles et souterraines. Leur présence a baissé d'environ 20 % depuis 2008, principalement du fait de la baisse du recours aux herbicides, dont certains ont été interdits. Concernant les eaux souterraines, en 2018, 35 % des points de mesure des réseaux de surveillance montrent une concentration totale dépassant la norme de 0,5 µg/l pour le total des substances, contre 14 % en 2010. Les substances les plus fréquemment quantifiées, présentes dans 55 % des stations de mesure, sont les métabolites d'atrazine et de diméthachlore. Du fait de la persistance de certaines molécules, ou du temps de transfert entre la surface et les eaux souterraines, certaines pollutions peuvent être la conséquence d'usages passés : on retrouve toujours certaines substances malgré leur interdiction de mise sur le marché depuis deux décennies (atrazine, simazine).

L'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES) mène régulièrement des campagnes de recherche de polluants émergents²⁹⁴ : le métabolite ayant été le plus fréquemment retrouvé lors de la dernière campagne est celui du chlorothalonil, fongicide interdit en France depuis 2020.

C. Impacts quantitatifs sur les « ressources » en eau

En raison de son cycle naturel, l'eau est, à la différence des ressources minérales, en grande partie renouvelable, et retourne pour partie dans le milieu après utilisation. Pour en mesurer les principales utilisations par les activités humaines, **on distingue la comptabilité des prélèvements de celle des consommations, représentant la part qui ne revient pas au cycle continental de l'eau douce.**

L'agriculture ne représente que 9 % des prélèvements annuels d'eau douce dans les eaux souterraines ou de surface, estimés au total à environ 33 milliards de m³ (hors hydroélectricité), après le refroidissement des centrales électriques (51 %), les canaux de navigation (16 %), la production d'eau potable (16 %) et avant les autres activités dont l'industrie (8 %)²⁹⁵.

Mais une partie de l'eau prélevée étant évaporée ou incorporée dans le sol, les plantes ou les productions, les usages agricoles représentent **58 % des consommations (principalement en période estivale, où la ressource est plus rare)**, estimées au total à 4,1 milliards de m³ par an, soit 12 % des prélèvements, devant l'approvisionnement en eau potable (26 %), le refroidissement des centrales (12 %), les usages industriels et autres (4 %).

Le recours à l'irrigation, qui ne concerne aujourd'hui que 7 % des surfaces agricoles (voir I.A.3), varie selon les régions et les années, mais semble devoir augmenter avec l'évolution du volume annuel de précipitations, l'évolution attendue de leur saisonnalité (déficits de pluie en été, excédents en période froide) et l'évolution des températures et donc de l'évapotranspiration des plantes. Si l'augmentation de la teneur en CO₂ de l'atmosphère peut avoir, dans une certaine mesure, un effet « antitranspirant »²⁹⁶ pour les plantes, la « méditerranéisation »²⁹⁷ attendue du climat hexagonal soulève la question de la viabilité de certaines productions agricoles dans la moitié Sud de la France sans sécurisation, si cela est compatible avec les autres

²⁹² . https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2021-02/datafab_80_chiffres_cles_eau_edition_2020_decembre2020v2.pdf

²⁹³ Lixiviation ou lessivage : perte d'éléments hydrosolubles du sol, dissous et entraînés par les eaux d'infiltration.

²⁹⁴ <https://www.anses.fr/fr/content/polluants-emergents-dans-leau-potable-le-point-sur-les-principaux-resultats-de-la-derniere-2>

²⁹⁵ <https://www.notre-environnement.gouv.fr/actualites/breves/article/prelevee-ou-consommee-comment-compter-sur-l-eau?>

²⁹⁶ <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/14557864/>

²⁹⁷ <https://www.drias-climat.fr/accompagnement/displayMenu/192?secondLevel=300>

usages de l'eau locaux, par des systèmes d'irrigation. La question se pose tout particulièrement pour la production de végétaux très riches en eau tels que fruits et légumes frais. L'irrigation permet aussi parfois de se prémunir contre le gel tardif de printemps sur des cultures en avance de végétation (arboriculture, viticulture).

D. Impacts sur la qualité de l'air : ammoniac et particules en suspension, résidus de phytosanitaires

L'agriculture est le principal secteur contribuant aux émissions d'ammoniac (NH₃) dans l'air, avec 94 % des émissions²⁹⁸. L'ammoniac est à l'origine de l'acidification des sols, mais aussi de particules en suspension dégradant la qualité de l'air, nocives pour la santé respiratoire et cardiovasculaire. La volatilisation de l'ammoniac survient essentiellement au moment de l'épandage des engrais azotés organiques et minéraux et lors de la gestion des déjections animales. **Les émissions agricoles ont baissé de 20 % entre 1990 et 2021 et devraient poursuivre cette trajectoire avec l'adoption de meilleures pratiques** d'élevage²⁹⁹ et de pratiques culturales et d'un plan d'action visant à supprimer l'utilisation des matériels d'épandage les plus émissifs en 2025.

Concernant les niveaux de concentration de résidus de phytosanitaires dans l'air ambiant, un premier état des lieux harmonisé³⁰⁰ a montré que, sur les 75 substances recherchées en 50 points du territoire (dont 5 dans les DROM) représentant la diversité des situations agricoles, la quasi-totalité des substances recherchées ont été retrouvées avec des fréquences de quantification inférieures à 10 %, mais 9 substances³⁰¹ ont été retrouvées avec des fréquences supérieures à 20 %, dont des substances interdites depuis plusieurs années (lindane, perméthrine).

Les concentrations moyennes annuelles les plus élevées sur le territoire hexagonal sont associées au prosulfocarbe (2,61 ng/m³³⁰²) et au folpel (1,03 ng/m³). Le lindane (0,06 ng/m³) et le glyphosate (0,04 ng/m³) présentent les concentrations moyennes les plus faibles. Parmi les substances les plus quantifiées selon les différents profils agricoles se distinguent le prosulfocarbe sur les sites « grandes cultures », le folpel sur les sites « viticulture » et le S-métolachlore sur les sites « arboriculture ».

²⁹⁸ CITEPA, 2023. Gaz à effet de serre et polluants atmosphériques. Bilan des émissions en France de 1990 à 2022. Rapport Secten éd. 2023

²⁹⁹ <https://www.web-agri.fr/previsions-meteo/article/859595/les-solutions-pour-limiter-les-emissions-d-ammoniac-en-elevage>

³⁰⁰ Mené par le Laboratoire Central de Surveillance de la qualité de l'Air entre 2018 et 2019 (Campagne nationale exploratoire de mesure des résidus de pesticides dans l'air ambiant)

<https://www.lcsqa.org/fr/rapport/resultats-de-la-campagne-nationale-exploratoire-de-mesure-des-residus-de-pesticides-dans>

³⁰¹ Chlorothalonil, chlorpyrifos méthyl, folpel, glyphosate, lindane, pendiméthaline, S-métolachlore, prosulfocarbe et triallate

³⁰² Nanogramme par mètre cube

Externalités de l'Agriculture Biologique sur les différentes dimensions des écosystèmes : biodiversité, sols, eaux, climat

Le cahier des charges de l'agriculture biologique interdit le recours aux engrais azotés minéraux et aux produits phytosanitaires de synthèse. Une revue de littérature récente³⁰³ met en évidence les quantifications d'externalités suivantes.

Sur la biodiversité

- Les indicateurs de la biologie des sols sont améliorés dans 70 % des cas par rapport à l'agriculture conventionnelle (en abondance, diversité ou concernant les fonctions assurées par les organismes vivants, de façon nette pour les micro-organismes), malgré le travail du sol, avec des effets positifs nets en grandes cultures et vergers, mais, de façon logique, non significatifs pour les prairies permanentes.
- Les parcelles conduites en AB ont en moyenne une abondance (32 %) et une richesse spécifique (23 %) supérieures, toutes cultures et taxons confondus.
- La fertilisation organique a un effet positif sur la biodiversité du sol.
- Les rotations généralement plus longues et plus diversifiées ont un effet positif sur la biodiversité associée pour les cultures en rotation.

Sur les sols et les masses d'eaux

- Puisqu'elle limite l'usage des phytosanitaires de synthèse, l'agriculture biologique conduit globalement à abaisser les teneurs en matières actives dans les sols cultivés (moins de résidus de pesticides, - 30 % à - 55 %, et teneurs moindres – somme des teneurs réduites de 70 % à 90 %) et contribue *de facto* beaucoup moins à la pollution de l'eau.
- Cependant, autorisant l'usage du cuivre pour ses effets fongicides, elle peut conduire à son accumulation dans les sols en cas de dosage trop élevé et participe, avec l'agriculture conventionnelle, à la dégradation des 13 % des masses d'eaux superficielles concernées par des teneurs excessives en cuivre, spécialement dans les zones viticoles.
- Du fait d'apports azotés globalement moindres, les pertes en nitrates en grandes cultures sont diminuées de 30 à 60 % par rapport à l'agriculture conventionnelle, avec un risque ponctuel de lixiviation des nitrates parfois accru, notamment au moment des retournements de luzernières.

Sur le climat

Les émissions de GES par hectare sont très généralement inférieures en AB, mais les conclusions varient pour les émissions par unité produite, du fait des rendements plus faibles en AB : en production végétale, les émissions sont généralement inférieures en AB quelle que soit l'unité fonctionnelle retenue ; en production animales, les émissions sont légèrement meilleures en bovin viande, équivalentes dans le cas du bovin lait, moins bonnes en élevage de monogastriques.

E. Impacts sur la santé des sols

Un travail du sol trop intensif en altère les qualités physiques, pouvant entraîner des phénomènes d'érosion hydrique ou éolienne (voir II.2.A). Les surfaces maintenues toujours en herbe, les itinéraires maximisant la couverture des sols et réduisant le nombre de passages d'outils mécaniques permettent en revanche de lutter contre ce risque.

En agriculture conventionnelle, pour la préparation du sol pour le semis ou la plantation comme pour la maîtrise de l'enherbement des parcelles, les agriculteurs sont confrontés au choix entre solutions mécaniques (travail du sol avec des outils) et solutions chimiques (utilisation de molécules herbicides). Les unes comme les autres présentent des inconvénients : **le travail mécanique contribue à l'érosion des sols, impacte la faune du sol, consomme plus de carburant ; le recours à la chimie présente des risques de toxicité, pour l'utilisateur et la biodiversité, et de contamination des milieux et des produits agricoles.**

L'agriculture de conservation des sols (voir ci-après) réduit le travail mécanique du sol au strict minimum, mais ne s'interdit pas l'utilisation de la chimie si besoin, en particulier celle du glyphosate qui

³⁰³ <https://itab.bio/thematique-en-details/quantification-des-externalites-de-lagriculture-biologique>
https://itab.bio/sites/default/files/medias/fichier/2024/06/Quantification_Externalites_AB_Note_4p_0.pdf

permet un désherbage total en remplacement de toutes les façons culturales successives de préparation du sol. **L'agriculture biologique s'interdit l'utilisation d'herbicides de synthèse et ne peut compter que sur le travail mécanique**³⁰⁴ pour la préparation des parcelles pour le semis, la plantation ou le désherbage.

Dans tous les systèmes de production, **la quête du compromis que pourrait être l'Agriculture Biologique de Conservation (ABC) anime les réseaux d'agriculteurs pionniers, mais reste très difficile à mettre en œuvre.** C'est d'autant plus le cas en conditions climatiques incertaines (imprévisibilité de la réussite des semis, de la vitesse de croissance de la végétation, de la possibilité de gel pour destruction naturelle des couverts végétaux...), et demande de pouvoir bénéficier d'une certaine souplesse dans le débouché des productions.

D'autres itinéraires techniques innovants sont également actuellement testés pour maintenir une couverture permanente du sol tout en essayant d'esquiver les périodes climatiques qui seraient non propices à certains semis : **le relay cropping**³⁰⁵ (ou culture relais) consiste à semer une deuxième culture, généralement de printemps (par exemple du soja) dans une culture déjà implantée, généralement une céréale d'hiver (orge ou blé), plusieurs mois avant sa récolte. La deuxième culture bénéficie alors d'une période de croissance plus longue par rapport à un semis après la moisson de la précédente (traditionnel semis en dérobé), favorisant ainsi le développement de la biomasse et le rendement. Là encore, des défis techniques, notamment en machinisme, restent à relever.

³⁰⁴ Ou éventuellement le paillage sur petites surfaces

³⁰⁵ <http://sylvain-delzon.com/relay-cropping/>

L'Agriculture de Conservation des Sols

Les pratiques de l'Agriculture de Conservation des Sols (ACS) favorisent une perturbation mécanique minimale des sols. Définie par la FAO³⁰⁶, l'ACS est identifiée comme un système garantissant la durabilité de l'usage des sols agricoles. Elle repose sur trois grands principes appliqués simultanément, dont la combinaison vise à stopper la dégradation des sols et à améliorer leur fertilité, en utilisant intensivement les processus biologiques et écologiques de l'écosystème sol en remplacement de certains intrants. Ces trois principes sont :

- **le non travail du sol**, c'est-à-dire l'absence de bouleversement mécanique ou de préparation de sol avant un semis : le seul outil en contact avec le sol est l'élément semeur du semoir (semoir de semis direct) qui dépose les grains en ne remuant pas ou très peu les agrégats de surface ; l'aération du sol est assurée par la structure, les racines laissées en place et la vie du sol ;
- **la couverture permanente des sols**, par des résidus de culture ou des cultures principales ou intermédiaires ;
- **la diversification des espèces cultivées**, en rotation et dans les couverts, favorisant la biodiversité et la fourniture de ressources alimentaires variées pour la faune et la microfaune du sol, la culture de légumineuses dans les rotations ou les couverts permettant également d'introduire de l'azote dans le système.

Maintenant des niveaux de production équivalent à ceux de l'agriculture conventionnelle, l'ACS offre des bénéfices environnementaux certains : des couverts végétaux diversifiés et productifs, permettent d'augmenter les taux de matière organique des sols, facteur de résilience sur le long terme, et fournissant des habitats favorables à la biodiversité, y compris dans les sols, une couverture permanente des sols le protégeant physiquement et limitant les chocs de température potentiels, un frein au développement de certaines adventices (*projet SOLiflore*³⁰⁷). Elle permet de diminuer de moitié la consommation de carburant et l'usure du matériel. Elle diminue par ailleurs le temps de travail des agriculteurs et libère du temps pour d'autres activités à la ferme ou en dehors.

L'ACS semble pouvoir se mettre en place sur tout type de sol et dans tout type de systèmes de grandes cultures, incluant ou non de l'élevage, mais son développement est limité par des freins techniques (nécessité d'un matériel adapté, gestion des ravageurs comme les limaces et mulots, gestion de l'enherbement) et psychologiques (remise en question globale des pratiques). Elle reste aussi dépendante au glyphosate, un herbicide critiqué, qui est aujourd'hui indispensable à l'implantation des cultures et donc au maintien des rendements dans ce système.

Initialement conçue en réponse à de graves problèmes d'érosion éolienne et hydrique aux États-Unis et au Brésil, l'ACS occupe de vastes surfaces dans certains pays d'Océanie et d'Amérique Latine, mais n'est pratiquée que par quelques % des agriculteurs français³⁰⁸. Elle s'est développée en France depuis les années 1990 à la faveur de collectifs d'agriculteurs pionniers ayant permis la production de références techniques fiables, mais souffre encore d'un manque de données scientifiques pour asseoir ses résultats et massifier ses bonnes pratiques. *Source : APAD, INRAE*

³⁰⁶ <https://www.fao.org/conservation-agriculture/fr>

³⁰⁷ https://apad.asso.fr/index.php?option=com_content&view=article&id=482

³⁰⁸ <https://hal.science/hal-02496282/document>



Leviers de transformation du système agricole

III. Leviers de transformation du système agricole

Pour répondre aux multiples défis qu'ils doivent affronter simultanément (et notamment de continuer à produire), **les systèmes de production agricoles disposent de différents leviers de transformation qui visent à réduire leur dépendance aux énergies fossiles, atténuer leurs émissions de GES, les adapter aux nouvelles conditions climatiques et contribuer à la préservation de la biodiversité et au stockage de carbone.** Nous les présentons ici de façon thématique, sachant que certains leviers combinent à la fois des effets d'atténuation, d'adaptation et de résilience.

Certains leviers, reposant sur un ensemble de solutions techniques en productions végétales comme animales, sont actionnables à l'échelle des fermes, de même que des leviers de résilience et d'adaptation ou des pratiques stockantes. D'autres nécessitent d'agir à une échelle plus large, à un échelon territorial ou national. Dans le cadre de nos travaux, nous avons ensuite traduit ces leviers en hypothèses dans des projections de transformation du secteur, en fonction de différentes visions de l'agriculture à horizon 2050.

Le tableau ci-dessous présente de façon synthétique la liste des leviers de transformation étudiés dans cette partie, qualifiés par :

- leur(s) effet(s) : atténuation et/ou adaptation et/ou résilience,
- leur(s) échelle(s) de mise en œuvre : échelle des fermes et/ou territoriale et/ou nationale.

Dans la suite de cette partie, certains leviers sont plus approfondis que d'autres, en particulier du fait de différentiels dans la disponibilité des données (par exemple sur les potentiels d'atténuation) auprès des acteurs sollicités et dans la littérature. Nous avons également particulièrement détaillé les leviers relatifs à l'élevage, sujet d'une grande complexité, et secteur faisant face à des objectifs de décarbonation ambitieux. Enfin tous les leviers technologiques sont quant à eux plus spécifiquement étudiés dans le rapport « Quelles technologies pour une agriculture bas carbone, résiliente et prospère »³⁰⁹ publié conjointement.

³⁰⁹ Rapport « Quelles technologies pour une agriculture bas carbone, résiliente et prospère », The Shift Project, Novembre 2024

Leviers de transformation étudiés	Effet			Échelle		
	Atténuation	Adaptation	Résilience	Ferme	Territoriale	Nationale
Fertilisation sobre et durable						
Optimisation de la fertilisation azotée	X		X	X	X	
Décarbonation de la fabrication des engrais azotés minéraux	X		X			X
Optimisation de la fertilisation phosphatée	X		X	X	X	
Élevages durables et résilients						
Optimisation de l'alimentation animale	X	X	X	X	X	
Amélioration de la conduite des troupeaux	X			X		
Amélioration de la gestion des effluents	X		X			
Génétique	X			X		X
Gestion des bâtiments (air)	X			X		
Sobriété énergétique des bâtiments	X		X	X	X	X
Réduction de la demande énergétique et décarbonation de l'énergie directe						
Décarbonation du parc de matériel et engins	X		X	X	X	X
Réduction de la demande (efficacité)	X		X	X	X	X
Production d'énergies	X		X	X	X	X
Résilience et adaptation						
Sélection génétique		X	X	X	X	X
Pratiques en faveur de la biodiversité	(X)	X	X	X	X	X
Adaptation par la gestion de l'eau	(X)	X	X	X	X	X
Leviers de résilience socio-économique	X	X	X	X	X	X
Pratiques stockantes						
Maintien des stocks de carbone existants	X	X	X	X	X	X
Augmentation du puits de carbone agricole	X	X	X	X	X	X
Circularité des flux						
Recyclage des minéraux et matières organiques	X		X		X	X
Relocalisation de l'alimentation animale	X		X	(X)	X	X
Reconnexion des productions végétales et animales	X		X	(X)	X	X
Flux logistiques plus résilients	X		X		X	X

Tableau 4 : Liste des leviers de transformation du système agricole et échelle(s) de mise en œuvre

1. Fertilisation sobre et durable

A. Optimisation de la fertilisation azotée

Optimiser la fertilisation azotée contribue à réduire les émissions de N₂O et à limiter les pertes d'azote dans les milieux. Une partie de l'azote apporté sur les sols agricoles via la fertilisation, qu'elle soit organique ou minérale, est en effet perdue par volatilisation de l'ammoniac dans l'air et par lixiviation³¹⁰ sous forme de nitrates vers les eaux souterraines, avec une efficacité de l'utilisation de l'azote estimée à une échelle globale de l'ordre de 50 % à 70 % environ selon les sources³¹¹.

Des marges de manœuvre existent pour réduire et optimiser cette fertilisation azotée³¹² et donc les émissions de N₂O, malgré la difficulté d'un pilotage précis en conditions réelles, à rendements constants :

- optimisation de l'utilisation des engrais azotés (juste adaptation des doses, utilisation des formes d'engrais les moins émettrices de GES*, fractionnement des apports, modulation intra-parcellaire, OAD³¹³, meilleure précision du matériel d'épandage, enfouissement rapide des apports) ;
- utilisation de variétés moins exigeantes en azote par unité de production³¹⁴ ;
- augmentation des couverts végétaux de type CIPAN (cultures intermédiaires pièges à nitrates) ;
- augmentation de la surface en légumineuses dans la rotation (pois, féverole, soja, luzerne, etc.), en culture principale, dans les couverts végétaux ou en plantes associées ;
- augmentation de la surface en cultures à bas niveau d'intrants dans la rotation (chanvre, tournesol, etc.) ;
- optimisation de la gestion des prairies (allongement de la durée de pâturage, accroissement de la durée de vie des prairies temporaires, réduction de la fertilisation des prairies permanentes et temporaires les plus intensives) – ces leviers contribuant également à la baisse des émissions de CO₂.

** Certaines formes d'engrais azoté minéral sont globalement moins émettrices de GES³¹⁵ rapportées à l'unité d'azote : si les émissions lors de la fabrication des engrais sont sensiblement équivalentes, on constate à l'épandage un facteur de l'ordre de 40 % entre émissions de l'ammonitrate 27 (5,18 kgCO₂e/kgN) et celles de l'urée 46 (7,62 kgCO₂e/kgN), la solution azotée présentant une valeur intermédiaire (6,86 kgCO₂e/kgN).*

S'ils peuvent être massifiés, ces leviers sont déjà pour partie en action. **Globalement, la consommation d'engrais azotés minéraux a tendance à stagner, voire à baisser** (voir II.1.A). **La pratique des couverts végétaux, d'abord rendus obligatoires par l'obligation de couverture des sols en zone vulnérable (Directive Nitrates), fait l'objet d'un déploiement notable, notamment dans une grande moitié Nord de la France³¹⁶.** Le potentiel de déploiement est encore très important, cependant la pratique n'est pas généralisable à toutes les rotations et trouve ses limites techniques dans la capacité à semer à bon escient selon les conditions météorologiques estivales. Les externalités positives des couverts (limitation de la fertilisation minérale, de l'érosion, amélioration de l'état structural des sols et de la dynamique de stockage) sont également fortement dépendantes du facteur-clé qu'est le niveau de production de biomasse (densité et hauteur du couvert).

L'extension des cultures de légumineuses (voir ci-dessous) est en revanche aujourd'hui limitée par leur faible rentabilité en culture pure (prix insuffisamment attractifs, débouchés limités) face à des rendements très aléatoires, ainsi que par des difficultés techniques ou agronomiques pour les cultiver en tant que plantes compagnes.

³¹⁰ Lixiviation ou lessivage : perte d'éléments hydrosolubles du sol, dissous et entraînés par les eaux d'infiltration.

³¹¹ Jarvis S., Hutchings N. et al., 2011. Nitrogen flows in farming systems across Europe. In Sutton M.A., Howard C.M. et al. (ed.), The European Nitrogen Assessment, Cambridge University Press, 211-227. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511976988.013>

³¹² <https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/Hypoth%C3%A8ses%20AMS%20SNBC3%20INRAE%20Avril%202023.pdf>

³¹³ Outil d'Aide à la Décision, voir le rapport du Shift Project sur la place des Technologies dans la transition agricole

³¹⁴ Voir également le rapport du Shift Project sur la place des Technologies dans la transition agricole

³¹⁵ <https://fertilisation-edu.fr/enjeux-de-la-fertilisation/changement-climatique.html#attenuation>

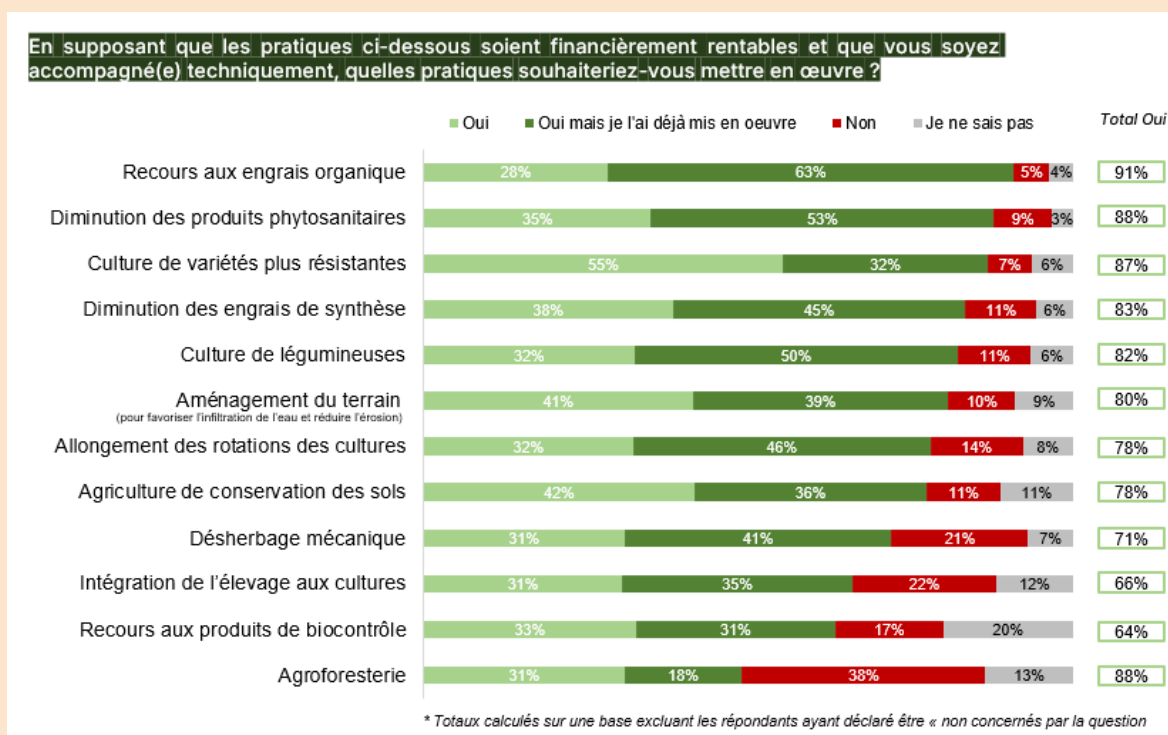
³¹⁶ <https://agronomie.asso.fr/aes-12-1-3>

a. Potentiel de développement des légumineuses

Le potentiel de fixation symbiotique diffère selon le type de légumineuses, en lien avec leur productivité en biomasse : entre 50 et 130 kg d'azote réactif par ha et par an pour les légumineuses à graines, entre 150 et 200 kgN/ha/an pour les légumineuses à vocation fourragère³¹⁷.

Concernant les légumineuses à graines, le potentiel de croissance est restreint par les délais de retour des cultures légumineuses (6 ans) et l'évitement de sols caillouteux, source de difficultés à la récolte (la végétation reste basse et nécessite d'abaisser la barre de coupe de la moissonneuse-batteuse au niveau du sol). Ce potentiel de croissance est estimé à hauteur de 1,5 Mha³¹⁸, avec une forte variabilité selon les possibilités en cultures associées. Il n'y a pas de réels facteurs bloquants. En revanche, pour les légumineuses prairiales³¹⁹, le potentiel le plus clair se dessine en prairies temporaires (2 Mha sur lesquelles les cultures de luzerne pourraient fortement croître), mais existe également en prairies permanentes (dont la flore est extrêmement diversifiée et dans lesquelles certaines légumineuses d'intérêt comme les trèfles, le lotier, le sainfoin pourraient être favorisées), qui représentent une sole très conséquente (7,9 Mha en 2023³²⁰).

Selon la GCA³²¹, **82 % des agriculteurs* souhaiteraient mettre en œuvre de la culture de légumineuses** (ou l'ont déjà fait), si ces pratiques étaient rentables et s'ils étaient accompagnés techniquement. Mais les problèmes sont multiples, comme en témoigne cet agriculteur : « *Rémunération insuffisante voire nulle, débouchés ? structuration des filières ? itinéraire complexe en bio (luttés contre l'enherbement, les ravageurs...)* »



* Pourcentage calculé sur la base de la totalité des répondants hormis ceux ayant déclaré n'être pas concernés par ces pratiques.

³¹⁷ Fustec et al., 2010, Contribution potentielles du lotier corniculé et du trèfle hybride à la productivité de prairies multispécifiques en sols limoneux. Fourrages, vol. 204, p. 247-253.

³¹⁸ Pellerin S. et al., 2013, Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? Potentiel d'atténuation et coût de dix actions techniques. Synthèse du rapport d'étude, INRA (France), 92 p. + <https://idele.fr/detail-article/lelevage-peut-il-se-passer-du-soja-importe>

³¹⁹ Ibid.

³²⁰ https://idele.fr/?eID=cmis_download&oID=workspace%3A%2F%2FSpacesStore%2F7ee4dd2b-278a-4490-a462-70da75ead88b&cHash=d0f97c0946b2a30777ab2634cf024751

³²¹ Résultats de la Grande Consultation des Agriculteurs 2024, <https://theshiftproject.org/article/resultats-grande-consultation-des-agriculteurs/>

Le déploiement de légumineuses à graines en cultures associées : des débouchés insuffisants ?

Couvrant moins de 4 % de la SAU française, la production actuelle de légumineuses ne représente pas une composante importante des filières de protéines végétales, davantage dominées par le colza, voire par les céréales³²². **Un consensus se dégage néanmoins autour de la nécessité de faire croître les cultures de légumineuses** pour répondre aux enjeux physiques de transition de l'agriculture (moins recours aux engrais minéraux) et à l'évolution potentielle des régimes alimentaires vers des options moins carnées. Malgré leur grand intérêt, la réimplantation de légumineuses à graines se heurte en effet à des verrous techniques, infrastructurels et organisationnels relatifs à la structuration des filières.

Déclinaisons pratiques et difficultés observées

Prenons l'exemple de producteurs de blé, qui décident de pratiquer des **cultures associées avec des lentilles ou du pois**. Cette stratégie permet à la fois de diversifier les débouchés, de réduire les besoins en fertilisation, mais également de produire un blé enrichi en protéines (jusqu'à 15-16 %³²³). Cependant, il y a un **besoin de haute précision dans le tri** afin de s'assurer que le blé tendre et les légumineuses compagnes ne se mélangent pas. Cette exigence est posée par les transformateurs en aval (meuneries), ne souhaitant pas commercialiser une farine porteuse de résidus de légumineuses. Or, comme l'essentiel des associations blé tendre – légumineuses sont conduites dans des systèmes AB et à bas niveaux d'intrants, les agroéquipements adaptés pour un tri suffisamment précis (trieur optique) ne sont pas toujours présents³²⁴. Ainsi, la perspective de récoltes insuffisamment discriminées et de pertes potentielles de débouchés commerciaux constitue un facteur de découragement pour les agriculteurs engagés dans ces démarches.

Besoins prioritaires en termes de planification

Plusieurs priorités sont mises en avant par les spécialistes consultés. Si la question de silos adaptés à la conservation des légumineuses se pose (propriétés physiologiques distinctes des céréales), **le principal facteur limitant réside dans la sécurisation des débouchés et la mobilisation de la restauration collective (publique et privée)**³²⁵. Cette dimension apparaît décisive pour une croissance des légumineuses et des cultures associées. Il y a en effet dès l'amont un besoin de recherche et une **réassurance à apporter aux généticiens et semenciers** dans la mesure où les investissements et les délais de sélection sont conséquents, sans garantie sur le niveau de demande. Parmi les acteurs stratégiques, les représentants des semenciers, l'interprofession et l'institut technique des légumineuses à graines (respectivement Semae, Terres Univia et Terres Inovia), de même que les grandes coopératives et les acteurs de la grande distribution pourraient être appelés à jouer un rôle majeur sur ce sujet, d'une part dans la sécurisation de débouchés importants, d'autre part pour structurer les chaînes de valeur globales de la production de semences à celle du produit fini. Les collectivités et territoires pourraient aussi jouer un rôle de soutien aux filières locales via l'action des Projets Alimentaires Territoriaux.

b. Recyclage de l'azote : un potentiel important

Les couverts végétaux ont fixé environ 150 ktN en 2024, sur environ 3,5 Mha. Une expansion de ces pratiques avec une part accrue de légumineuses, pourrait porter ce potentiel à 270-510 ktN pour les seuls couverts végétaux avec légumineuses³²⁶ d'ici 2050. Mais d'autres solutions de recyclage de l'azote peuvent être aussi envisagées et/ou développées, non sans poser des questions d'ordre matériel, mais aussi réglementaire et sanitaire.

- **Recyclage des déjections animales** : les systèmes de polyculture-élevage permettaient historiquement de boucler le cycle de l'azote, aujourd'hui limité par la spécialisation agricole régionale. Les animaux d'élevage en France recyclent entre 1,5 et 2 millions de tonnes d'azote par an³²⁷, dont 1,1

³²² Cultures céréalières relativement moins riches en protéines végétales (autour de 10 %) mais portées par des surfaces et des rendements plus élevés

³²³ Schneider et Huyghues, 2015, *Les légumineuses pour des systèmes agricoles et alimentaires durables*. Editions Quae, 512p, Synthèses (Quae)

³²⁴ Jeuffroy M-H. et al., 2018, *Construction et évaluation de scénarios territoriaux d'insertion de légumineuses*.

³²⁵ *Ibid.*

³²⁶ Simulations Shift

³²⁷ Calculs Shift avec GRAFS d'après Agreste, CORPEN, MEEM, CITEPA

à 1,6 million atteint les terres agricoles, avec environ 0,35 million de tonnes perdues par volatilisation³²⁸. Reconnecter cultures et élevage, et donc rééquilibrer les activités agricoles sur le territoire, pourrait améliorer l'utilisation de cette ressource.

- **Recyclage des excréta humains** : les excréta humains, notamment l'urine, représentent une source d'azote sous-exploitée³²⁹. Le système actuel de traitement des eaux usées ne permet de récupérer qu'environ 30 ktN par an, alors qu'une amélioration des infrastructures pourrait porter ce chiffre à 180 ktN³³⁰ par an, nécessitant cependant d'importants investissements dans les infrastructures, et posant la question de l'acceptabilité sociale.
- **Recyclage via la méthanisation** : la méthanisation génère un digestat riche en azote (3 à 7 kg par tonne de matière traitée). En 2024, on estime à 22 millions de tonnes le volume de matière organique méthanisée, représentant un potentiel de 66 à 154 ktN. D'ici 2050, la capacité de méthanisation pourrait être accrue avec un potentiel de récupération pouvant dépasser 1000 ktN par an, selon les hypothèses de déploiement de ces infrastructures. (Voir parties I.3 et III.3 sur le sujet de la méthanisation).

B. Décarbonation de la fabrication des engrais azotés minéraux

Si la priorité reste un objectif de sobriété dans leur utilisation et s'il semble possible d'en réduire fortement la consommation d'ici 2050 (voir IV.4.B.), il paraît ambitieux d'imaginer pouvoir s'en passer complètement.

Avec environ 10 MtCO₂e en 2021, la fabrication des engrais azotés minéraux, et notamment l'étape préalable de production de l'ammoniac (voir partie II.1.A.), représente aujourd'hui une part essentielle des émissions indirectes de GES du système agricole. Les industriels envisagent cependant de nouveaux procédés³³¹ qui permettraient de décarboner cette production, soit en produisant l'ammoniac par électrolyse de l'eau et énergies renouvelables (ammoniac dit « vert »), soit en capturant le CO₂ émis lors de la fabrication (ammoniac dit « bleu »). **Une réduction de 90 % de l'empreinte carbone de fabrication des engrais de type ammonitrate est ainsi espérée par l'industrie³³². Cependant les coûts actuels de production de ces engrais décarbonés seraient aujourd'hui inaccessibles aux agriculteurs.**

En France, un projet d'implantation d'une usine de production d'engrais azotés décarbonés a été annoncé dans la Somme³³³, qui viserait à produire 500 000 tonnes d'ammonitrate 27 par an à horizon 2030. Alors que leurs émissions de GES sont globalement à l'équilibre aujourd'hui par rapport à leurs allocations, les fabricants d'engrais vont en effet perdre progressivement leurs quotas gratuits d'émissions à partir de 2026 pour une fin prévue en 2034, dans le cadre de l'application du Mécanisme d'Ajustement Carbone aux Frontières (MACF)³³⁴.

C. Optimisation de la fertilisation phosphatée

À l'image du raisonnement de la fertilisation azotée, des marges de manoeuvre existent en faveur d'une gestion plus durable de la ressource en phosphore :

- pilotage plus précis et raisonné, évitement de la surfertilisation par excès de fertilisants organiques (cas de territoires sans surface d'épandage suffisante par rapport à la concentration des élevages),
- limitation des pertes de phosphore au cours du cycle par une plus grande couverture des sols,
- amélioration de la biodisponibilité du phosphore déjà contenu dans les sols cultivés (via des cultures associées incluant des légumineuses, des dispositifs agroforestiers ayant une bonne aptitude à

³²⁸ J. Le Noë, G. Billen, F. Esculier, J. Garnier, Long-term socioecological trajectories of agro-food systems revealed by N and P flows in French regions from 1852 to 2014, *Agriculture, Ecosystems & Environment*

³²⁹ <https://www.leesu.fr/ocapi/>

³³⁰ Calculs GRAFS

³³¹ https://bibliothèque.ademe.fr/cadic/8111/PTS_Ammoniac_synthese.pdf

³³² <https://www.yara.fr/fertilisation/blog/les-engrais-mineraux-azotes-decarbones-en-6-questions/>

³³³ <https://www.usinenouvelle.com/article/les-quatre-raisons-du-choix-de-la-france-pour-la-premiere-usine-d-engrais-bas-carbone-de-fertighy.N2212826>

³³⁴ <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/mecanisme-dajustement-carbone-aux-frontieres-macf>

mobiliser le phosphore situé dans des horizons profonds, ou encore des espèces telles que le lupin blanc ou le sarrasin³³⁵),

- préférence accordée aux engrais phosphatés à plus faible teneur en cadmium.

Le recyclage du phosphore constitue également un potentiel insuffisamment exploité : pour une gestion durable de la ressource, le **recyclage plus efficace des matières fertilisantes d'origine résiduaire (MAFOR), telles que les effluents d'élevage et les boues de station d'épuration, est une piste majeure à travailler**³³⁶.

Les quantités de phosphore présentes dans les MAFOR pourraient en effet couvrir l'ensemble des prélèvements annuels de phosphore par la production agricole et permettre de s'affranchir du recours aux engrais phosphatés minéraux³³⁷. Selon de récents travaux, on ne recyclerait actuellement que 40 % du phosphore³³⁸.

³³⁵ Demay J., Ringeval B., Pellerin S et al. (2023). Half of global agricultural soil phosphorus fertility derived from anthropogenic sources. Nature Geoscience. 5 January 2023

³³⁶ <https://agriculture.gouv.fr/prospective-des-matieres-fertilisantes-dorigine-residuaire-mafor-lhorizon-2035-analyse-ndeq-176>

³³⁷ <https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/mafor-synthese-vf-oct2014.pdf>

³³⁸ Esculier F., 2018, Le système alimentation/excrétion des territoires urbains: régimes et transitions socio-écologiques. Ingénierie de l'environnement. Université Paris-Est.

2. Élevages durables : réduire les émissions de GES et accroître la résilience des systèmes

A. Répartition des émissions de GES des systèmes d'élevages français : des priorités distinctes

Le calcul de la répartition des émissions de GES des systèmes d'élevage est présenté en annexe 8.

Elevages	Émissions directes amont agricole ³³⁹		Émissions directes agricoles ³⁴⁰		Estimation des émissions indirectes liées au soja importé		Total des émissions ³⁴¹			
	MtCO ₂ e	% des émissions de l'élevage	MtCO ₂ e	% des émissions de l'élevage	MtCO ₂ e	% des volumes de soja importé	MtCO ₂ e	% des émissions de l'élevage		
Bovins lait	1,9	32 %	23,4	42 %	1,3	36 %	26,6	40 %		
Bovins viande	1,6	26 %	23,9	43 %	0,3	8 %	25,8	39 %		
Porcins	0,8	14 %	2,6	5 %	0,2	6 %	3,7	5 %		
Volailles	1,1	19 %	1,7	3 %	0,2	44 %	4,4	7 %		
Ovins et caprins	0,3	5 %	3,9	7 %		6 %			5,2	8 %
Autres	0,2	4 %	0,7	1 %						
Total	5,9	100 %	56,1	100 %	3,7	100 %	65,7	100 %		

Tableau 5 : Ordre de grandeur des émissions des élevages français en 2020 (MtCO₂e)

Sources : CITEPA³⁴², Cordier et al.³⁴³

Au global, en considérant un périmètre élargi (émissions de l'inventaire CITEPA hors aval + ordre de grandeur des émissions liées à l'alimentation animale importée), des priorités d'action distinctes apparaissent pour les différentes filières d'élevage :

- La quasi-totalité (95 %) des émissions des élevages de ruminants est constituée des émissions directes, d'où un enjeu majeur sur la réduction des émissions de méthane.
- Les émissions des élevages de monogastriques, en particulier de volailles, sont constituées à plus de 36 % d'émissions indirectes, faisant apparaître un enjeu majeur de dépendance énergétique liée à l'alimentation animale importée.

B. Une approche multicritères et de compromis

La diminution des effectifs des différents cheptels ruminants peut permettre de manière mécanique de réduire les émissions de méthane. Elle doit cependant se réfléchir dans une prise en compte globale des services écosystémiques rendus par certaines formes d'élevage, en particulier en matière de protection des sols et des eaux souterraines, de stockage de carbone, de contribution au transfert de

³³⁹ Émissions directes amont agricole : émissions du périmètre « amont (France) » de l'inventaire CITEPA (fabrication d'aliments à destination des animaux français et Fertilisation (hors déjections animales) des céréales, cultures fourragères et prairies à destination des animaux).

³⁴⁰ Émissions directes agricoles : émissions du périmètre « à la ferme (France) » de l'inventaire CITEPA (consommations énergétiques, bâtiment/stockage/épandage, fermentation entérique, parcours)

³⁴¹ Total des émissions : émissions directes et indirectes de l'amont agricole et de l'agriculture, hors « aval France » de l'inventaire CITEPA (transformation IAA de produits français et transformation IAA de produits importés)

³⁴² CITEPA, 2022. Rapport d'inventaire Floréal – Edition 2022

³⁴³ <https://hal.inrae.fr/hal-03128009v1>

fertilisation par les effluents, de biodiversité et plus largement d'entretien des paysages, de valorisation de coproduits ou sous-produits agricoles et agroalimentaires, et de surfaces non arables.

Elle doit également se réfléchir en prenant en compte les échanges commerciaux puisque la diminution du cheptel national (tendance en cours, de manière subie), sans action sur la demande, pourrait entraîner une hausse des importations, donc n'avoir pas d'impact positif sur les émissions de GES globales tout en affaiblissant l'élevage français. L'élevage est de plus un moyen de transférer des nutriments sous forme de fertilisants organiques indispensables en agriculture biologique et, plus globalement, substituables aux engrais azotés minéraux eux-mêmes générateurs de GES, tout en étant potentiellement produits à la ferme ou dans les territoires avoisinants.

Un compromis est donc à trouver, pour les systèmes d'élevage présentant le plus d'externalités positives, entre la baisse du nombre d'animaux (sans que celle-ci soit compensée par des importations), la préservation de ces externalités positives et la limitation des émissions importées, ce que les pouvoirs publics visent en particulier avec les règles de préservation des prairies permanentes (BCAE³⁴⁴ 1 et 9 de la PAC) et via le soutien à l'agriculture biologique dont la productivité repose exclusivement sur les engrais organiques. Par ailleurs, la SNBC2 actuellement en vigueur ne vise que le périmètre des émissions générées sur le territoire national (inventaire CITEPA), mais ce périmètre devrait être élargi avec la SNBC3 afin d'intégrer des objectifs quantitatifs de réduction des émissions importées.

Polyculture-élevage, fertilisation et bilan azoté

Les effectifs du cheptel de ruminants français ainsi que les surfaces de pâturage sont deux facteurs déterminants de la quantité de fertilisants organiques disponibles pour le reste du système agricole français. Une diminution des effectifs doit alors se réfléchir dans la recherche d'un point d'équilibre, en particulier sur la question du bilan azoté, en prenant en compte l'ensemble des impacts entraînés :

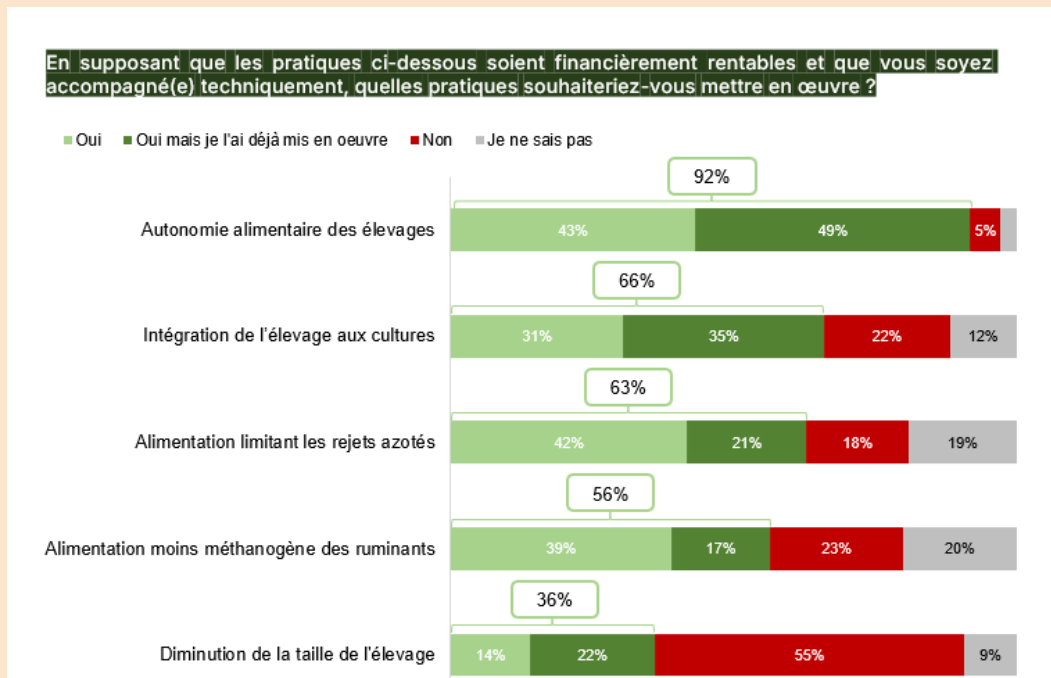
- une réduction de la disponibilité en fertilisants organiques, qui pourraient alors se retrouver « mécaniquement » remplacés par des engrais azotés minéraux d'autant d'unités ;
- une réduction des surfaces en prairies permanentes, qui entraînerait non seulement un déstockage du carbone des sols, mais dont l'utilisation serait aussi alors en jeu ; si ces surfaces venaient à être utilisées pour des grandes cultures (non en agriculture biologique), le besoin en engrais azotés minéraux serait accru par rapport à une utilisation en prairies permanentes (ordre de grandeur de + 100 kgN/ha) ;
- mais également une réduction des surfaces de cultures nécessaires à l'alimentation animale (impact à la baisse sur le besoin en engrais azoté minéral pour la production des fourrages et concentrés).

Des calculs réalisés pour Interbev par Ceresco³⁴⁵ sur l'impact d'une baisse tendancielle du cheptel de vaches mères de - 19,1 % entre 2022 et 2030 ont conclu à un bilan global de la fertilisation négatif avec un besoin supplémentaire en fertilisation minérale de 18 kt d'azote. Selon les scénarios étudiés, ce besoin supplémentaire varie de - 4kt à + 55 kt, ce qui montre un impact quantitatif limité mais qui remet en avant d'une part l'intérêt des systèmes de polyculture-élevage pour valoriser directement la fertilisation organique dans les zones de production végétales, et d'autre part le devenir des surfaces en prairies, dont la conversion en grandes cultures pourrait engendrer un besoin supplémentaire significatif en azote minéral. Une utilisation de ces surfaces pour la culture de légumineuses pourrait permettre de limiter ce surplus tout en améliorant la disponibilité en ressources fertilisantes (cf. annexe 3).

³⁴⁴ Bonnes Conditions Agricoles et Environnementales, <https://agriculture.gouv.fr/la-conditionnalite-des-aides-pac>

³⁴⁵ Evaluation des impacts de la décapitalisation bovine en France, note de synthèse Ceresco pour Interbev, 2024

La Grande Consultation des Agriculteurs³⁴⁶ révèle que les agriculteurs sont également convaincus par ce type de modèles, à condition qu'ils soient rentables et associés à un accompagnement technique :



- 92 %* autonomie alimentaire des élevages
- 66 %* intégration de l'élevage aux cultures

Plus globalement, **91 %* souhaitent recourir aux engrais organiques** et **83 %* diminuer le recours aux engrais de synthèse**.

Certains soulignent également la nécessité d'une politique de l'emploi :

« Avoir une politique sur l'emploi agricole dans les fermes pour nous réarmer, en termes de bras, car sans cette option la transition semble impossible à réaliser, surtout dans les régions de polycultures-élevage où elle demandera une énergie trop importante aux agriculteurs pour passer ce cap, la transition ne se fera pas sans moyen humain ».

*Pourcentages calculés sur la base de la totalité des répondants hormis ceux ayant déclaré n'être pas concernés par ces pratiques

a. Des limites à la prise en compte du critère GES seul

La réduction des émissions de méthane, qui représentent une part majoritaire des GES agricoles, concerne les cheptels ruminants, sur lesquels se focalisent donc l'attention et les objectifs de réduction d'émissions. Néanmoins, **ces objectifs doivent être nuancés selon le mode d'élevage concerné, le critère « émissions de GES » pris isolément étant trop restrictif pour juger de la performance environnementale globale d'un système, de sa résilience et des externalités positives associées**. La comptabilité carbone stricte est ainsi plus favorable aux modes de production intensifs (en émissions de CO₂e/kg de viande ou de lait produit), mais ne tient pas compte d'autres paramètres tels que la sécurité alimentaire, l'empreinte énergétique, la possibilité de stockage de carbone dans les parcelles, la biodiversité spécifique des prairies, ou encore la préservation physique des sols.

À titre d'exemple, un calcul des empreintes carbone du lait issu de systèmes contrastés³⁴⁷ montre que **les systèmes laitiers herbagers, légèrement moins bien placés en émissions brutes (0,89 kg CO₂e/kg de lait)**

³⁴⁶ Résultats de la Grande Consultation des Agriculteurs 2024, <https://theshiftproject.org/article/resultats-grande-consultation-des-agriculteurs/>

³⁴⁷ https://idele.fr/fileadmin/medias/Documents/IE_Elevage_ruminants_et_changement_climatique_juin_2015_BD.pdf

que les systèmes à base de maïs (0,86 kg CO₂e/kg de lait) sont en revanche significativement plus intéressants en émissions nettes c'est-à-dire intégrant le stockage de carbone lié aux prairies (0,53 kg CO₂e/kg de lait contre 0,76 kg CO₂e/kg de lait).

En élevage de monogastriques (volailles et porcs), la notation environnementale classique via des analyses de cycle de vie (ACV) avantage également les élevages les plus intensifs (en kg CO₂e par kg produit), sans tenir compte pour autant de certaines externalités négatives de ces modes de production et de la capacité des écosystèmes à les supporter. À effectifs constants, privilégier les modèles ainsi avantagés aurait pour conséquences de réduire le recours aux ressources alimentaires (amélioration de l'indice de consommation) et d'optimiser la productivité, mais aussi de recourir aux économies d'échelle et donc souvent à la densification (à l'échelle de l'exploitation, de la région, du maillon dans la filière). Or, une baisse d'impact par quantité de produit ne s'accompagne pas d'une baisse à une échelle plus globale si la production augmente. De plus, l'efficacité avec laquelle les animaux convertissent la biomasse a des limites, du fait des caractéristiques biologiques même des animaux. Ainsi, il n'est pas possible de réduire indéfiniment la consommation d'aliment des porcs ou les rejets en azote et phosphore des poules pondeuses. De même, en stimulant la productivité par kg de produit, les ACV peuvent pousser à la compétition entre alimentation pour l'homme et pour l'animal³⁴⁸, tout particulièrement pour les monogastriques, grands consommateurs de céréales (voir ci-dessous l'approche d'efficacité nette de conversion qui permet de quantifier plus précisément ce risque). À titre d'exemple sur les élevages de poules pondeuses, les codes 3 (cage aménagée), 2 (au sol), 1 (plein air) et 0 (biologique) émettent respectivement 1,66, 1,55, 3,34 et 2,57 kgCO₂e/kg d'œufs. Ainsi une réorientation à effectif constant des élevages de code 3 vers des codes 1 et 0 serait en défaveur d'une diminution des émissions de GES (et l'inverse pour une reconversion vers un code 2).

³⁴⁸ <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652619303622>

VERS DES ÉLEVAGES BAS CARBONE & RÉSILIENTS

L'ÉLEVAGE, CONTRIBUTEUR MAJEUR AUX ÉMISSIONS DE GES



59,3% des émissions de l'agriculture française en 2022

DES SERVICES RENDUS PAR L'ÉLEVAGE SOUS CERTAINES CONDITIONS

- Stockage carbone
- Valorisation surfaces & ressources
- Biodiversité
- Transfert de fertilité



MULTI-CRITÈRES

La transition des systèmes d'élevages ne peut donc s'étudier uniquement sous l'angle des émissions de GES

GES

GES directs, indirects, stockage de C



Énergie



Biodiversité, sols, eaux



Résilience

MULTI-ÉCHELLES

Différentes échelles à prendre en compte sur ces enjeux

Echelle ferme

Echelle territoire

Echelles nationale & internationale

Considérer ce critère isolément à l'échelle ferme favoriserait des élevages plus "intensifs" (moins d'émissions par kg de viande ou de litre de lait)

BILAN

Un nécessaire compromis entre

Préservation des élevages vertueux et de leurs externalités positives

Diminution des effectifs

Limitation des émissions importées

DES PRIORITÉS ET LEVIERS SPÉCIFIQUES SELON LES ÉLEVAGES



Ruminants

Des émissions de GES directes significatives, un enjeu majeur d'atténuation à relever tout en préservant les services environnementaux liés aux prairies

- Diminuer les émissions de méthane
- Améliorer l'autonomie fourragère et protéique
- Favoriser les élevages herbagers, préserver les prairies permantes
- Diminuer, de manière limitée, les cheptels (sans report sur des importations)



Monogastriques

Des émissions de GES directes faibles, des enjeux majeurs de dépendance à l'alimentation animale importée et de répartition territoriale

- Diminuer la dépendance à l'alimentation animale importée
- Ré-équilibrer les élevages en fonction des potentiels et des capacités territoriales
- Limiter la concurrence entre alimentation humaine et animale et favoriser les coproduits

b. Considérer l'efficacité énergétique et protéique nette des élevages pour mesurer la concurrence entre alimentation humaine et alimentation animale des différents systèmes d'élevage

Deux approches peuvent permettre de mesurer l'efficacité d'un système d'élevage. L'efficacité brute de conversion (des protéines, de l'énergie) prend en compte toutes les protéines ou l'énergie ingérées et produites. **L'efficacité nette, plus proche des flux physiques, ne considère que la part des protéines (ou de l'énergie brute) consommée et produite par l'élevage qui est valorisable en alimentation humaine.** Si cette efficacité est supérieure à 1, le système d'élevage a produit davantage de protéines animales (ou d'énergie) consommables par l'Homme qu'il n'a consommé de protéines végétales consommables par l'Homme. On peut alors le dire « contributeur net » à la production de protéines (ou d'énergie) pour l'alimentation humaine. Si l'indicateur est inférieur à 1, le système est consommateur net (de protéines ou d'énergie).

L'utilisation de cet indicateur d'efficacité nette permet d'éclairer le débat sur la contribution de l'élevage à l'alimentation humaine et sur la concurrence d'utilisation des ressources végétales. **L'élevage apparaît moins en compétition avec l'alimentation humaine que lorsque calculé sur la base de l'efficacité brute.** En effet, l'efficacité protéique nette des systèmes d'élevage est très supérieure à l'efficacité brute, mettant en avant clairement le rôle de recycleur de biomasse des animaux.

En France, certains systèmes d'élevage de ruminants comme de monogastriques présentent une capacité à contribuer de manière positive à la production de protéines pour l'alimentation humaine, sous réserve qu'ils consomment beaucoup de végétaux non valorisables en alimentation humaine (fourrages, coproduits). C'est la raison pour laquelle les ruminants ne sont pas nécessairement moins efficaces que les monogastriques³⁴⁹.

Des compléments sur l'approche de l'efficacité nette sont disponibles en annexe 8, notamment concernant les élevages de ruminants et de monogastriques.

Si elle permet de nuancer la concurrence d'usage sur la biomasse consommée, cette approche dépend néanmoins des hypothèses retenues concernant la part de protéines valorisable par l'Homme. Par ailleurs, elle ne permet pas de traiter complètement de la concurrence d'usage sur les surfaces associées (et de la possibilité de cultiver d'autres productions, ou des productions présentant des parts valorisables par l'Homme plus élevées sur ces surfaces).

c. La nécessité de prendre en compte la dépendance énergétique pour définir les leviers de résilience des élevages

Certaines formes d'élevage de ruminants ont développé des systèmes de production autonomes en intrants³⁵⁰, offrant à la fois une meilleure résilience économique et des performances sociales et écologiques élevées. Fondés sur le pâturage de prairies temporaires associant graminées et légumineuses, ils nécessitent une gestion fine des prairies et de la conduite du troupeau au pâturage, et garantissent une meilleure valeur ajoutée que les systèmes plus intensifs en intrants et achats extérieurs. Outre le bilan des émissions GES, ces élevages sont généralement moins dépendants des énergies fossiles, et plus économes en énergie de façon globale.

Les risques de contraction énergétique peuvent également peser plus fortement sur les formes d'élevage les plus dépendantes de procédés énergivores (du transport des matières premières à leur transformation sous forme d'aliment et au transport des animaux). C'est en particulier le cas des élevages de monogastriques, fortement dépendants des achats d'aliment. L'élevage de porcs est particulièrement sensible aux variations du coût de l'énergie, celui-ci représentant 50 % de la consommation d'énergie totale. C'est également le cas des élevages de ruminants qui, du fait de besoins énergétiques par mégajoule de produit 6 à

³⁴⁹ <https://productions-animales.org/article/view/2355>

³⁵⁰ <https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/Ana126/analyse1261808.pdf>

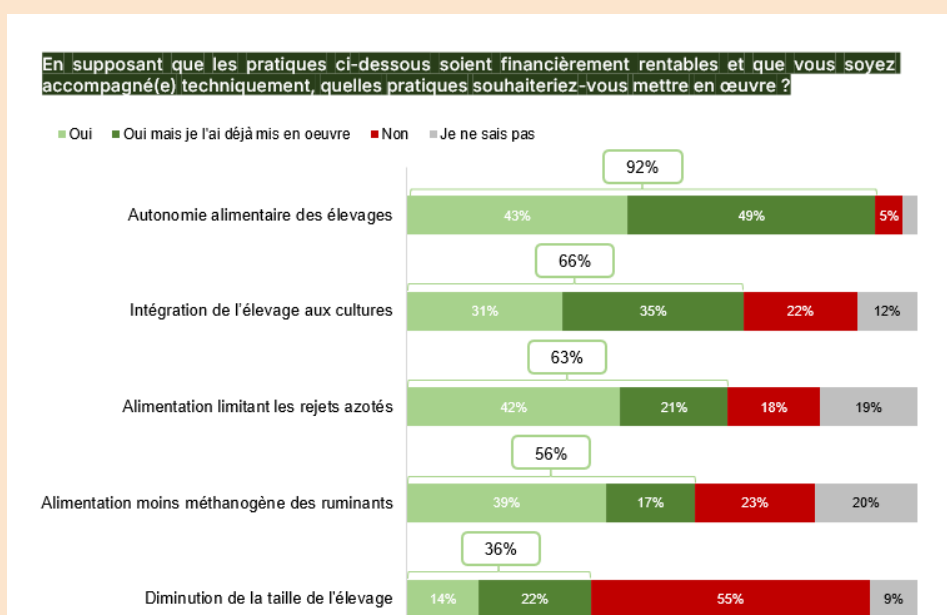
12 fois supérieurs à ceux des systèmes de grandes cultures, seraient affectés d'autant par une augmentation des coûts énergétiques. La dépendance énergétique des élevages de ruminants est elle aussi fortement liée à l'alimentation : 75 % de l'énergie totale serait utilisée pour l'alimentation animale (se répartissant ainsi : 23,5 % pour les carburants, 23 % pour l'alimentation animale achetée, 15 % pour les engrais, 10 % pour le machinisme et 3,5 % pour divers usages ; les carburants et le machinisme étant mobilisés à des fins de production de fourrage)³⁵¹. Ce niveau de dépendance élevé est cependant à mettre en regard du fait que l'alimentation animale des ruminants présente une moindre concurrence *a priori* avec l'alimentation humaine que celle des monogastriques.³⁵²

Au global, les systèmes d'élevage présentent ainsi une plus forte vulnérabilité aux risques de contraction énergétique que les systèmes de grandes cultures³⁵³. Dans ce contexte, une baisse de la quantité de terres cultivables utilisées pour l'élevage, les libérant donc pour d'autres valorisations, et la mise en place d'une alimentation animale basée sur des produits à faible valeur économique tels que les coproduits permettraient une meilleure résilience de ces systèmes.

La résilience énergétique des systèmes d'élevage doit donc être analysée à la fois au prisme de la dépendance énergétique, et à celui de la concurrence sur l'énergie (ou les protéines) consommées. Sur le premier critère, les élevages de ruminants comme de monogastriques affichent une dépendance élevée (à l'exception de certains élevages de ruminants autonomes en intrants), sur le deuxième critère, le résultat dépend du taux d'incorporation de produits non valorisables par l'Homme et notamment de coproduits dans l'alimentation animale.

C. Des leviers de transition avec des priorités spécifiques à chaque système d'élevage

Les actions visant à diminuer les émissions directes et à alimenter la résilience des élevages suscitent un grand intérêt des éleveurs, qui seraient pour une grande majorité prêts à les mettre en œuvre si celles-ci étaient financièrement rentables et s'ils étaient accompagnés techniquement³⁵⁴.



³⁵¹ Benoît, M., Mottet, A., Energy scarcity and rising cost: towards a paradigm shift for livestock, 2022

³⁵² <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2211912416300013>

³⁵³ Benoît, M., Mottet, A., Energy scarcity and rising cost: towards a paradigm shift for livestock, 2022

³⁵⁴ Résultats de la Grande Consultation des Agriculteurs 2024, <https://theshiftproject.org/article/resultats-grande-consultation-des-agriculteurs/>

a. Élevages de ruminants : diminuer les émissions directes et améliorer la résilience

Sur le périmètre d'inventaire des émissions, l'essentiel des émissions de GES des élevages bovins est lié à la fermentation entérique, puis dans une moindre mesure à la gestion des effluents. Sur le périmètre élargi, d'autres leviers d'action sont également à considérer pour réduire les émissions indirectes liées à l'alimentation animale importée.

Au-delà de la diminution des effectifs évoquée plus haut existent aussi différents leviers techniques³⁵⁵ permettant de réduire les émissions de méthane des élevages ruminants, à production constante :

- **alimentation animale :**
 - **amélioration de l'autonomie fourragère et protéique** : augmentation de la part d'herbe et de légumineuses dans la ration, allongement de la durée de pâturage (dont pâturage tournant dynamique), augmentation de la part de céréales autoconsommée, substitution du maïs par de l'herbe et des céréales, diminution de la part de tourteaux. L'impact du changement climatique à ce sujet (réduction de la pousse d'herbe en été et augmentation sur la période hivernale) doit être intégré de manière à sécuriser les stocks fourragers non plus seulement sur l'hiver mais également sur la période estivale.
 - **adaptation de l'alimentation des ruminants diminuant la fermentation entérique** : incorporation de graines de lin extrudées (solution mature), ou d'autres compléments alimentaires (lipides, nitrates, espèces végétales riches en tanins, amidon, algues, inhibiteurs enzymatiques) dont à ce stade la diffusion n'est pas envisageable à grande échelle et pourrait être limitée dans certains cahiers des charges.
- **optimisation de la conduite des troupeaux :**
 - atténuation de la fermentation entérique par des **leviers d'optimisation** : diminution des périodes improductives via la baisse de l'âge au premier vêlage (systématisation des vêlages à 24 et 30 mois respectivement pour les génisses de races laitières et allaitantes) et la diminution de la mortalité, allongement des carrières des animaux (augmentation du nombre de lactations par vache) ; ce levier reste à mettre en œuvre car, jusqu'alors les émissions du cheptel n'ont pas baissé dans les mêmes proportions que les effectifs, la baisse du cheptel ayant été compensée par un troupeau de plus en plus productif, émettant en moyenne plus de CH₄ par tête au fil du temps. Ainsi, les émissions de CH₄ de la fermentation entérique des vaches laitières ont baissé d'environ 3,2 MtCO₂e soit - 22 % sur la période 1990-2022 alors que le cheptel a diminué de 39 % (- 2,1 millions de vaches laitières)³⁵⁶. La mise en œuvre de ces leviers de productivité doit néanmoins prendre en compte les impacts potentiels sur les pratiques d'élevage et sur le bien-être animal.
 - concernant le troupeau allaitant, en plus des leviers d'optimisation ci-dessus, des **gains d'efficacité peuvent être obtenus par des effets de synergie avec le cheptel laitier** (l'allongement des carrières de vaches laitières permettant de libérer le besoin en génisses de renouvellement, ce qui permettrait soit de diminuer les effectifs, soit de favoriser certains types d'élevage (par exemple engraissement à l'herbe à partir du troupeau laitier). **L'évolution du type d'animaux produits est également un levier d'action pour le troupeau allaitant**, notamment avec la relocalisation de l'engraissement permettant un rééquilibrage des flux (substitution de places de vaches allaitantes par des places pour l'engraissement de veaux, de préférence à l'herbe).
 - **amélioration de l'état de santé des animaux** en luttant contre les principales pathologies infectieuses et parasitaires (vaccination, vermifugation). Une réduction des émissions de méthane peut en effet être obtenue car les maladies impactent directement les émissions de GES en affectant la morbidité, la mortalité (il s'agit alors d'émissions de CH₄ « improductives »)

³⁵⁵ <https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/Hypoth%C3%A8ses%20AMS%20SNBC3%20INRAE%20Avril%202023.pdf>

³⁵⁶ https://ressources.citepa.org/Comm_Divers/Secten/Citepa_Secten%202024.pdf

ainsi que la productivité (temps de production inutilement allongé, augmentation de l'empreinte carbone brute en CO₂e/kg lait ou eq CO₂e/kg viande, abattage prématuré...).

- **gestion des effluents** : amélioration de la gestion des effluents d'élevage (couverture des fosses et torchères, développement de la méthanisation des effluents). La valorisation énergétique du méthane émis permet en effet de réduire les émissions imputées au secteur agricole et constitue un levier significatif pour baisser les émissions de CH₄.
- **génétique : adaptation du format des animaux et sélection génétique « bas méthane »** des troupeaux laitiers et allaitants. La génétique a une part non négligeable dans la variabilité des émissions de méthane des animaux (de l'ordre de 15 %). Des animaux moins lourds permettraient des gains importants sur les émissions (un format de 100 kg de moins correspondrait à 5 % de diminution des émissions de méthane), qui serait à compenser pour les élevages allaitants par une précocité accrue pour ne pas pénaliser la production de viande. Les croisements pourraient également être des leviers permettant d'accroître la précocité des races allaitantes. Un programme de sélection génétique bas méthane pourrait enfin apporter des voies de progrès significatives, mais dans un horizon de temps plus lointain (à partir de 2030) avec des gains difficiles à anticiper. Certains chercheurs annoncent ainsi des gains potentiels de 1 %/an et de 10 % en 10 ans³⁵⁷.

Les leviers d'optimisation de la conduite des troupeaux et de leur génétique décrits ci-dessus visent donc, au travers d'une meilleure gestion de la productivité et des carrières des animaux, des « gains d'efficacité » qui permettraient de moindres émissions de méthane par vache, par L de lait ou par kg de viande. Ils sont présentés comme des solutions permettant potentiellement de maintenir les niveaux de production à effectif légèrement réduit (par exemple, l'augmentation du nombre de lactations par vache permet un moindre besoin en génisses de renouvellement), ce qui réduit d'autant le besoin en fourrages et concentrés.

La faisabilité et l'échéance de leur mise en œuvre doivent cependant être envisagées avec prudence puisqu'elles dépendent particulièrement d'avancées génétiques (non matures à ce stade) et de modes de conduite des troupeaux dont l'applicabilité ne concerne pas nécessairement tous les types d'élevage (besoins d'investissements, de gestion accrue des troupeaux, etc.) et qu'il convient de mettre en perspective avec les besoins d'adaptation aux effets du changement climatique (possible diminution de la qualité des fourrages, nouvelles maladies, etc.).

³⁵⁷ <https://www.inrae.fr/dossiers/lelevage-face-aux-defis-du-changement-climatique/au-sommaire-ce-dossier>

L'impact de la santé animale sur les émissions liées à la fermentation entérique des ruminants

Chez le ruminant, le CH₄ est formé naturellement pendant le processus de fermentation microbienne des aliments par les Archées méthanogènes du rumen et est rejeté dans l'atmosphère principalement au cours d'éruclations (95 %). La formation de CH₄ est une voie métabolique essentielle pour l'élimination du H₂ ruminal, ce qui conditionne les stratégies de réduction de la méthanogénèse^{358;359}. Responsable d'une perte en énergie sous forme gazeuse estimée à environ 6-10 % de l'énergie brute ingérée³⁶⁰, la production de méthane entérique dépend de nombreux facteurs liés à l'animal, à son stade physiologique, à son alimentation et au schéma d'élevage. Depuis une vingtaine d'années, de nombreuses études mettent en relief l'impact de la santé sur les émissions de méthane entérique.

Dans une enquête publiée en 2015 par l'ADAS UK³⁶¹, une dizaine de maladies endémiques des ruminants ont été évaluées. Chez les vaches laitières malades, l'augmentation des émissions de GES par unité de lait allait jusqu'à 25 % pour la paratuberculose, suivie de près par la salmonellose, la BVD (diarrhée virale bovine) et l'infertilité. Chez les bovins à viande malades, l'augmentation des émissions de GES pouvait atteindre jusqu'à 130 % pour la BVD, 40 % pour la paratuberculose, 20 % pour l'infertilité à Salmonella et l'IBR (rhinotrachéite infectieuse bovine). La douve du foie augmente les GES de 10 % par unité de production³⁶².

En 2022, la FAO³⁶³ a également établi que l'état de santé des animaux impacte de façon importante les émissions de GES en affectant la mortalité, la morbidité ainsi que la productivité, et que des interventions sanitaires et vétérinaires permettent de réduire ces émissions de façon significative. À titre d'exemples, sont documentés comment des pathologies de la vache laitière augmentent les émissions de GES au travers d'une baisse de production laitière, de pertes de lait ou encore d'une augmentation de l'intervalle entre vêlages et abattage prématuré^{364;365}. Il en va de même pour la BVD et la salmonellose responsables d'une augmentation de la mortalité. Le parasitisme altère également la santé des bovins et leur productivité : en affectant l'efficacité alimentaire, il peut augmenter le taux de CH₄ par kg de matière sèche (MS) de 33 %³⁶⁶. Chez l'agneau, le parasitisme peut augmenter les émissions par kg de gain de poids de 11 % pour le CH₄ entérique³⁶⁷.

En 2022, l'institut de recherche britannique Moredun suggère qu'une réduction de 10 % des GES issus de l'élevage bovin et ovin est atteignable rien que par l'amélioration de l'état de santé des animaux³⁶⁸.

Leviers de résilience pour les élevages de ruminants

Un grand nombre des leviers de décarbonation présentés ci-dessus sont également des leviers de résilience pour les élevages et en particulier :

- l'amélioration de l'autonomie fourragère et protéique permet une moindre dépendance aux importations d'alimentation animale ;
- le caractère herbager de l'élevage présente des externalités positives sur le stockage de carbone par les prairies et la préservation de la biodiversité ainsi qu'une moindre concurrence avec des surfaces valorisables pour l'alimentation humaine ;

³⁵⁸ Martin et al., 2006, Comment réduire la production de méthane chez les ruminants. Fourrages, 187, pp.283-300..

³⁵⁹ Huws et al., 2018, Addressing global ruminant agricultural challenges through understanding rumen microbiome : Past, Present and Future. Front., Microbiol, vol 9.

³⁶⁰ *Ibid.*

³⁶¹ ADAS, 2012, Study to model the impact of controlling endemic cattle diseases and conditions on national cattle productivity, agricultural performance and greenhouse gas emissions.

³⁶² *Ibid.*

³⁶³ Özkan et al., 2022, The role of animal health in national climate commitments. FAO : <https://doi.org/10.4060/cc0431en>.

³⁶⁴ Mostert et al., 2019, Estimating the impact of clinical mastitis in dairy cows on greenhouse gas emissions using a dynamic stochastic simulation model: a case study. Cambridge University Press.

³⁶⁵ Özkan et al., 2018, How do farm models compare when estimating greenhouse gas emissions from dairy cattle production?. Animal, pp 2171-2180.

³⁶⁶ Fox et al., 2018, Ubiquitous parasites drive a 33 % increase in methane yield from livestock. International Journal for Parasitology, Volume 48, Issue 13, pp. 1017-1021.

³⁶⁷ Houdijk et al., 2017, Animal health and greenhouse gas intensity: the paradox of periparturient parasitism, International Journal for Parasitology, Volume 47, Issues 10–11, pp. 633-641.

³⁶⁸ Skuce et al., 2022, Acting on methane: opportunities for the UK cattle and sheep sectors. Moredun Research Institute.

- les dispositifs de valorisation des effluents peuvent permettre une meilleure autonomie énergétique (pour l'agriculteur ou pour d'autres secteurs).

Les systèmes à dominante herbagère et les systèmes en polyculture-élevage sont ainsi à ce titre des systèmes d'élevage de ruminants dont la résilience est plus élevée, le pâturage permettant une valorisation sobre en énergie de la biomasse (récolte de l'herbe par l'animal) et de la fertilisation (restitution directement au champ des déjections), avec des co-bénéfices forts sur la biodiversité et l'entretien des paysages. Ces systèmes ne sont néanmoins pas exempts d'exposition aux risques, notamment climatiques, puisque les épisodes de sécheresse peuvent affecter de manière significative la production de fourrages et sa disponibilité pour la période hivernale. Une répartition à l'échelle multi-territoriale des productions (notamment fourragères) pourrait alors permettre de répartir géographiquement et ainsi limiter le risque.

La partie III. 4. D. présente plus précisément les leviers de résilience socio-économiques associés à certains systèmes d'élevage dits « autonomes et économes en intrants ».

b. Élevages de monogastriques : réduire les émissions indirectes et équilibrer leur répartition sur le territoire

Élevages de volailles

Sur le périmètre d'inventaire, les émissions de GES des élevages de volailles **se répartissent principalement entre la fertilisation des cultures destinées à l'alimentation animale**, la gestion des déjections (bâtiment, stockage et épandage) et les consommations énergétiques hors électricité³⁶⁹.

Cependant les émissions liées à **l'alimentation animale notamment importée génèrent un montant significatif d'émissions** (ordre de grandeur de 1,6 MtCO_{2e} par rapport à un total de 2,8 MtCO_{2e} sur le périmètre de l'inventaire ci-dessus³⁷⁰). Selon l'ITAVI, l'alimentation animale représenterait entre 86 et 95 % des émissions de GES sur le périmètre empreinte pour les poules pondeuses. L'alimentation des volailles de chair représente quant à elles entre 75 et 87 % de l'empreinte GES. Des réductions d'impacts conséquentes peuvent être espérées (et mécaniquement mieux financées), mais demeurent délicates puisqu'au-delà d'aspects techniques (nouvelle formulation, disponibilité des matières premières, implication du fabricant d'aliment), l'aliment représente à lui seul entre 40 % (pour les pondeuses)³⁷¹, et 50 à 60 % du coût de production pour les volailles de chair³⁷². Les leviers de décarbonation les plus significatifs se situent donc sur ce périmètre amont, nécessitant une action coordonnée des filières.

- **Alimentation animale et gestion des animaux :**
 - **Substitution de la part d'alimentation animale importée issue de déforestation** (soja en particulier) par de l'alimentation animale non déforestante (soja local, protéines locales sans soja, écoformulation, etc.). La charte Duralim³⁷³ vise notamment à déployer la mise en œuvre du premier levier, au travers de l'engagement à atteindre « 100 % d'approvisionnements durables en alimentation animale avec, pour les matières premières végétales, un objectif de non-déforestation et de non-conversion. » Les données disponibles faisant état d'un impact climatique de l'ordre de 2,8 fois plus élevé pour le tourteau de soja associé à la déforestation au Brésil par rapport à du soja non associé à la déforestation³⁷⁴, l'impact de cet engagement est potentiellement significatif.
 - Amélioration de l'indice de consommation (quantité d'aliments ingérée par kg de poids vif ou d'œufs produit) : équilibre nutritionnel de la ration, digestibilité des ingrédients, bien-être des animaux.

³⁶⁹ Citepa, 2022. Rapport d'inventaire Floréal – Edition 2022

³⁷⁰ Citepa, 2022. Rapport d'inventaire Floréal – Edition 2022

³⁷¹ ITAVI Les élevages de volaille de chair français face à la décarbonation : état des lieux et défis (2024)

³⁷² ITAVI Elevages de poules pondeuses et décarbonation : quels leviers et quel potentiel ?

³⁷³ La charte d'engagements Duralim s'adresse à tous les opérateurs souhaitant contribuer à une amélioration de la durabilité de l'alimentation animale. Elle a pour objectif de valoriser les actions déjà mises en place par les structures ainsi que celles reposant sur une dynamique de progrès. - https://www.duralim.org/wp-content/uploads/Charte_engagements_2021.pdf

³⁷⁴ ECO-ALIM 2015

- **Gestion des effluents** : amélioration de la gestion et de l'exportation des déjections (émissions par lessivage et volatilisation), pré-séchage en bâtiment, tunnel de séchage extérieur. Ce levier concerne particulièrement les élevages sur lisiers, et partiellement les élevages sur fumiers via le compostage des déjections. À une échelle plus large, la répartition des élevages monogastriques sur les territoires est également un levier de meilleur équilibre entre capacité du milieu à gérer les effluents, besoins de fertilisation locaux (et production plus proche de l'alimentation animale, notamment céréalière).
- **Gestion de l'air du bâtiment** : lavage d'air et brumisation (limitation des émissions de NH₃, à l'origine d'émissions indirectes de N₂O).
- **Énergie** : réduction des consommations énergétiques du bâtiment (compteurs d'énergie, éclairage LED...) voire décarbonation des sources énergétiques.

Les montants et profils d'émissions pour les élevages de poules pondeuses et pour les élevages de volailles de chair sont détaillés en annexe 10.

Élevages porcins

Sur le périmètre d'inventaire, les émissions de GES des élevages porcins **sont principalement liées au bâtiment et à la gestion des déjections**³⁷⁵.

Par ailleurs, on peut estimer pour rappel à environ 0,2 MtCO₂e les émissions liées (uniquement) au soja importé pour l'alimentation animale des élevages porcins, ce qui constitue une part non négligeable des émissions totales.

Les leviers de décarbonation des élevages porcins, intégrés dans la méthode Label Bas Carbone actuellement en cours de validation, sont les suivants³⁷⁶ :

- **Gestion des effluents**
 - Traitement des effluents par méthanisation ou méthanisation passive (couverte et brûlage)
 - Augmentation de la fréquence d'évacuation des effluents
 - Mise en place d'une lisiothermie
 - Pré-traitement des lisiers : lisier flottant (préfosse), acidification des lisiers
- **Gestion de l'air du bâtiment** : lavage d'air et brumisation (limitation des émissions de NH₃, à l'origine d'émissions indirectes de N₂O)
- **Alimentation animale**
 - Utilisation de matières premières moins carbonées pour l'alimentation animale (co-produits, matières premières plus locales, non déforestantes)
 - Adaptation de l'alimentation et amélioration de la digestibilité des aliments pour réduire la quantité d'azote excrétée (et diminuer ainsi les émissions de N₂O et de NH₃) : alimentation multiphase, augmentation de l'usage d'acides aminés dans l'alimentation biphasé, alimentation de précision, utilisation de matières premières extrudées dans la formulation
- **Gestion des animaux** : amélioration de l'indice de consommation, de la productivité par truie, limitation de la mortalité entre la naissance et le sevrage
- **Diminution de la consommation d'énergie et valorisation d'énergie sur l'exploitation** : dispositifs économes en énergie, valorisation de la chaleur, production d'énergie renouvelable

Leviers de résilience pour les élevages de monogastriques

Au-delà des leviers de décarbonation présentés ci-dessus, les leviers permettant une meilleure résilience des élevages de monogastriques (volailles et porcins) concernent principalement :

³⁷⁵ Citepa, 2022. Rapport d'inventaire Floréal – Edition 2022

³⁷⁶ <https://ifip.asso.fr/documentations/43610-decarbonation-au-maillon-elevage-politique-nationale-bas-carbone-focus-sur-la-construction-de-la-methode-label-bas-carbone-porc/>

- l'amélioration de l'autonomie en alimentation animale et l'utilisation de matières premières non déforestantes et non importées ; cela passe par une meilleure complémentarité polyculture-élevage, à l'échelle de la ferme et/ou du territoire.
- la gestion et la valorisation des effluents d'élevage (pour une valorisation énergétique par l'agriculteur ou pour d'autres secteurs) permettant ainsi une moindre dépendance énergétique globale

Sans que ceux-ci ne présentent les meilleurs résultats en émissions de GES par kg de produit, les systèmes ayant un lien au sol (surfaces de parcours, voire de prairies pour certains élevages plein air, de cultures pour l'alimentation animale) peuvent néanmoins permettre de développer des surfaces ayant d'autres externalités environnementales positives (stockage de carbone, préservation de la biodiversité, relocalisation de la production d'alimentation animale).

Le paramètre-clé de résilience des élevages de monogastriques concerne particulièrement l'échelle territoriale, puisqu'il s'agit d'organiser et répartir les élevages en tenant compte à la fois de la disponibilité des surfaces pour l'alimentation animale et de la capacité des écosystèmes à gérer les effluents générés.

D. Stratégies de transition proposées par les acteurs des filières : des potentiels significatifs mais focalisés sur l'atténuation

Les objectifs de décarbonation du secteur de l'élevage dans le SNBC2 et le bilan 2024 présenté par le SGPE sont détaillés en annexe 9.

a. Des stratégies de décarbonation des élevages de ruminants à assez court terme, fondées sur des leviers d'optimisation

Avec l'appui technique de l'Idèle, les interprofessions des élevages de ruminants ont défini leurs feuilles de route de décarbonation à horizon 2030 (présentées en annexe 11). Leur objectif principal est de répondre à l'ambition de planification sur les émissions directes liées à la fermentation entérique du secteur de l'élevage, c'est-à-dire une réduction de **5 MtCO₂e pour la ferme bovine France**. Elles précisent ainsi la stratégie, les leviers actionnés (leur potentiel d'atténuation et les hypothèses de déploiement associées) pour y répondre.

Ces feuilles de route s'intéressent donc principalement à la réduction des émissions de méthane, en mobilisant la mise en œuvre des leviers d'optimisation à l'échelle des fermes, mais s'intéressent moins aux émissions indirectes ni aux leviers d'action sur les effectifs de cheptel. Ainsi, les hypothèses définies sur les cheptels sont les suivantes :

- Cheptel laitier : - 12 % de vaches laitières entre 2020 et 2030 et maintien du volume de lait produit ;
- Cheptel viande : stabilisation du nombre de vaches allaitantes à partir de 2024 ; maintien ou développement des volumes avec augmentation de l'engraissement.

Deux scénarios ont été étudiés, avec des hypothèses distinctes et majeures sur l'évolution des modèles de production. Un scénario « Productif » correspondant à une augmentation du chargement (charge animale, généralement exprimée en UGB³⁷⁷, par unité de surface), une fertilisation maintenue et une augmentation de l'engraissement, et un scénario « Transition » correspondant à une diminution du chargement, de la fertilisation et une évolution des types d'animaux produits, ont ainsi été analysés. Les leviers mobilisés de façon commune aux deux scénarios correspondent aux leviers d'optimisation de la productivité et de conduite du troupeau, les leviers liés à l'alimentation différant significativement entre les scénarios.

Ces seuls leviers techniques ne permettant pas d'atteindre l'objectif de - 5 MtCO₂e fixé sur le méthane (**- 3,61 et - 4,25 MtCO₂e respectivement selon les scénarios**), **il est possible d'activer des leviers techniques additionnels** tels que l'ajout d'additifs dans la ration (- 20 % sur la fermentation entérique des animaux à l'auge), la couverture des fosses et la méthanisation (non comptabilisées dans les réductions), la réduction de la

³⁷⁷ Unité Gros Bovin (à titre d'exemple, un bovin de plus de deux ans correspond à 1 UGB, une génisse de moins de 2 ans à 0,6 UGB)

consommation d'énergie (- 5 % de consommation de GNR), la substitution ammonitrate/urée, l'insertion de CIPAN et la réimplantation de 100 000 km linéaires de haies).

Sur la base de ces hypothèses fortes (notamment celles liées aux modifications des pratiques d'alimentation), l'objectif sur le méthane (- 5 MtCO₂e) serait alors atteint. En fonction du scénario retenu (« productif » ou « transition »), les réductions attendues seraient au total comprises entre 6,3 et 6,5 MtCO₂e de réduction d'émissions directes, et 0,5 à 2,6 MtCO₂e de réduction des émissions indirectes. Le stockage/déstockage lié à une conservation des surfaces en prairies ou au contraire une perte de surfaces en prairies vers des cultures est également intégré aux projections. Au global, les réductions permises par ces scénarios (émissions directes, indirectes et stockage/déstockage) seraient comprises entre 7,9 et 8,5 MtCO₂e à horizon 2030³⁷⁸.

Les proratas de la filière en termes d'émissions directes de N₂O, d'émissions de CO₂ et d'émissions indirectes ne sont cependant pas atteints. En particulier, même le scénario « Transition » dont les hypothèses intègrent une diminution du chargement, de la fertilisation et une évolution du type d'animaux produits, ne permet pas suffisamment de réduction des émissions de N₂O pour répondre à l'ambition de réduction « attribuée » à la Ferme bovine française. Il est donc nécessaire d'activer d'autres leviers ou des hypothèses plus ambitieuses sur les leviers déjà identifiés.

b. Des stratégies de décarbonation des élevages de monogastriques aux potentiels d'atténuation faibles

Élevages de volailles

Sur le périmètre de l'inventaire France restreint à la ferme, l'aviculture serait responsable de 1,42 MtCO₂e soit 0,34 % des émissions agricoles nationales, réparties comme suit :

- Élevages de poules pondeuses : 0,67 MtCO₂e soit 0,16 % des émissions³⁷⁹
- Élevages de volailles de chair : 0,75 MtCO₂e soit 0,18 % des émissions³⁸⁰

Sur ce périmètre, l'atteinte des objectifs de réduction de la SNBC (- 46 % en 2050 par rapport à 2015) est considérée comme techniquement faisable moyennant des changements significatifs et diversifiés des pratiques, avec une attention particulière à ce qu'une baisse des émissions ne soit pas liée à une réduction des effectifs nationaux qui pourrait entraîner une augmentation des produits et donc des émissions importées. L'atteinte de ces objectifs sera également dépendante de la décarbonation des autres secteurs.

Dans le détail :

- Concernant les élevages de poules pondeuses, les productions en code 2 et 3³⁸¹ disposent d'un fort potentiel de réduction (environ - 50 %). Des décotes plus faibles sont atteignables pour les codes 1 et 0 (- 14 à - 21 %) pour lesquels l'enjeu sera la valorisation du stockage de carbone des parcours (entre - 7 et - 20 %).
- Concernant les volailles de chair, les productions sur lisiers disposent d'un fort potentiel de réduction (entre - 25 et - 50 %) liés à une meilleure gestion et l'exportation de leurs effluents. Pour les productions sur fumiers, le compostage peut permettre d'atteindre des réductions d'émissions de GES comprises entre - 6 et - 14 %. La décarbonation des sources d'approvisionnement énergétiques peut également permettre de générer des décotes complémentaires comprises entre - 1 et - 20 %.

La feuille de route proposée par l'ITAVI ne considère que le périmètre de l'inventaire national (restreint à la ferme), c'est-à-dire un montant d'émissions de la filière avicole de 1,42 MtCO₂e en 2021. Étant donné que les émissions des élevages de volailles ont été réduites de 9,3 % des émissions entre 2015 et 2021 et que l'atteinte de l'objectif de - 46 % est considérée comme techniquement faisable, le montant d'émissions sur ce périmètre

³⁷⁸ Idele - Evaluation des émissions de GES de stratégie de décarbonation de la filière bovine française - 09/10/2023

³⁷⁹ ITAVI Elevages de poules pondeuses et décarbonation : quels leviers et quel potentiel ?

³⁸⁰ ITAVI Les élevages de volaille de chair français face à la décarbonation : état des lieux et défis (2024)

³⁸¹ Code 3 : cage aménagée, code 2 : au sol, code 1 : plein air, code 0 : biologique

restreint serait alors, à effectif constant, de 0,85 MtCO_{2e} en 2050, soit un **potentiel d'atténuation de 0,58 MtCO_{2e}**. La base des émissions étant peu élevée, les quantités d'émissions de GES ainsi évitées resteront donc en absolue faibles. Il convient donc de mobiliser des leviers d'action sur le périmètre de l'alimentation animale, c'est notamment l'objet de la charte Duralim.

Élevages porcins

Les gains attendus (réduction des émissions de GES par kg de poids vif) grâce aux différents leviers d'atténuation étudiés par l'IFIP sont les suivants :

- Méthanisation et augmentation de la fréquence d'évacuation des effluents : entre 16 % et 24 % de réduction
- Alimentation : 4 % à 7 % de réduction respectivement avec l'utilisation de soja non déforestant et avec l'utilisation d'une alternative au soja ; 3 % de réduction avec l'amélioration de l'indice de consommation de 0,1 point
- Consommations d'énergie : 0,8 % de réduction grâce à des dispositifs économes en énergie

La méthode LBC élaborée par l'IFIP n'étant pas encore validée, et une présentation de scénarios de décarbonation pour la filière porcine au niveau France est prévue lors des Journées de la Recherche Porcine 2025, une quantification officielle des potentiels d'atténuation pour les élevages porcins n'est pas encore disponible. Cependant l'objectif de l'interprofession porcine (INAPORC) est de réduire de 25 % les émissions de GES à horizon 2035, grâce aux engagements suivants : 100 % des nouveaux bâtiments incluent un des leviers de décarbonation dans leur conception, 0 % de soja conversion / déforestation (engagement dans la démarche Duralim) et la construction d'un indicateur de suivi de la consommation d'énergie nette de la filière³⁸².

L'ordre de grandeur de réduction des émissions de GES des élevages porcins à horizon 2035 serait donc d'environ (avec une hypothèse d'effectifs constants), d'émissions résiduelles de 2,78 MtCO_{2e} correspondant à un **potentiel d'atténuation de 0,93 MtCO_{2e}**.

E. Synthèse des stratégies des acteurs de filières : aller plus loin pour atténuer les émissions et améliorer la résilience des élevages à horizon 2050

a. Un besoin de définir une ambition au-delà de l'atténuation et à horizon 2050

L'activation des feuilles de route des filières animales ayant précisé leurs objectifs à 2030 ou 2035 permettrait donc d'atteindre les résultats suivants :

- un **potentiel d'atténuation global d'environ 8,3 à 10,6 MtCO_{2e}**
- un **total d'émissions résiduelles d'environ 49,9 à 52,2 MtCO_{2e}**.

³⁸² ITAVI Elevages de poules pondeuses et décarbonation : quels leviers et quel potentiel ?

en MtCO _{2e}	Émissions 2020				Potentiel d'atténuation envisagé par les filières à 2030 ou 2035			Émissions résiduelles à 2030 ou 2035
	Émissions amont France (inventaire CITEPA)	Ordre de grandeur émissions amont importées (soja)	Emissions ferme (inventaire CITEPA)	Total	Sur périmètre amont (ou indirect)	Sur périmètre ferme (ou direct)	Total	Total
Bovins	3,4	1,6	47,3	52,4	0,5* 2,6**	6,3* 6,5**	6,8* 9,1**	43,3 à 45,6 à
Volailles	1,1	1,6	1,7	4,4	-	0,58	0,58	3,82
Porcins	0,8	0,2	2,6	3,7			0,93	2,78
Autres	0,5	0,2	4,5	5,2	-	-	-	-
Total	5,9	3,7	56,1	65,7			8,3 à 10,6	49,9 à 52,2

Tableau 6 : Estimation des potentiels d'atténuation des différentes filières d'élevage françaises à horizon 2030 en MtCO_{2e}

Sources CITEPA, Cordier et al. 2016, CNIEL, Idele, Interbev, ITAVI
*Scénario "productif" **Scénario "transition" ; hors stockage/déstockage

Ces résultats mettent en avant l'effort à consentir par le secteur de l'élevage sur les deux horizons de temps envisagés dans la SNBC2 :

- **à horizon 2030** : l'ambition de réduction étant fixée à 11 MtCO_{2e} pour le secteur de l'élevage, l'ensemble des leviers techniques précisés ci-dessus doivent être massivement déployés ;
- **à horizon 2050** : l'ambition de la SNBC2 étant de 48 MtCO_{2e} pour l'ensemble du secteur agricole (ce qui n'intègre que les émissions directes, les émissions indirectes restant à réduire significativement), l'effort restant à consentir par l'élevage entre 2030 et 2050 reste important et nécessiterait la définition d'une feuille de route à horizon 2050 avec l'activation de leviers plus ambitieux pour accélérer les réductions d'émissions de CH₄ et de N₂O.

Par ailleurs, il est à noter que les stratégies des acteurs présentées ici ne portent que sur l'atténuation des émissions directes et n'intègrent pas d'objectifs spécifiques sur l'adaptation des systèmes d'élevage, leur résilience ou encore la préservation de la biodiversité.

b. Mobiliser des leviers de transition plus ambitieux pour améliorer la résilience des élevages à 2050

Parmi les pistes à explorer à horizon 2050 pour atténuer plus fortement encore les émissions des élevages, en particulier celles de CH₄ et de N₂O, et améliorer la résilience des systèmes d'élevage, peuvent être ainsi envisagées :

- **Une réduction plus ambitieuse des émissions de méthane**, dont le pouvoir réchauffant est supérieur à celui du CO₂ et donc sur lequel une action rapide serait bénéfique, **en mobilisant la combinaison de plusieurs leviers** :
 - **améliorer la conduite des troupeaux** pour diminuer les émissions par animal sans déstabiliser de façon majeure les niveaux de production, permettant par là même de diminuer légèrement les effectifs (ce levier ne concernant pas tous les systèmes d'élevage) ;
 - **accompagner une diminution mesurée et planifiée des cheptels**, à un rythme moins soutenu que le rythme actuel, associée à une nécessaire baisse de la demande dans les mêmes proportions afin d'éviter des émissions importées. L'enjeu autour de la réduction des

cheptels est que celle-ci ne se traduise pas mécaniquement par une diminution proportionnée du nombre d'exploitations et d'éleveurs, ce qui nécessite une planification. Une dynamique de déspecialisation, territoriale et/ou à l'échelle de la ferme, et de préservation des élevages les plus résilients et décarbonés doit être encouragée, tout en maintenant les seuils nécessaires au maintien des emplois et des compétences nécessaires dans le reste de la filière (abattoirs, industries de transformation, vétérinaires, etc.). **À noter, une prolongation tendancielle du rythme actuel (2019-2024) de diminution des effectifs du cheptel bovin, qui est d'environ - 2,6 % /an (bovins allaitants) et de - 1,9 %/an (bovins lait)³⁸³, conduirait à horizon 2030 à - 41 % d'effectifs allaitants et - 32 % d'effectifs laitiers, et à horizon 2050 à - 50 % d'effectifs allaitants et - 39 % d'effectifs laitiers ; un ralentissement de ce rythme peut être une hypothèse compatible avec les objectifs de décarbonation de la SNBC2. Ces objectifs présupposent néanmoins d'accepter un niveau important d'émissions résiduelles qu'il faudra « compenser » par ailleurs, sans garantie réelle sur la maximisation des potentiels des puits de carbone (agricoles et autres).**

- **Un maintien et une transition vers des systèmes d'élevages de ruminants plus économes en intrants (donc en énergie) et plus résilients :**
 - **Maintenir un maximum de surfaces en prairies**, tout en réduisant autant que possible le taux de chargement. Les éventuels surplus d'herbe pourraient alimenter des filières de méthanisation.
 - **Augmenter la part d'élevages pâturants ou en polyculture-élevage et la durée de pâturage** (diminution des émissions de protoxyde d'azote liées à la fertilisation des cultures, augmentation du stockage de carbone), associée à une augmentation plus significative des surfaces en légumineuses pour compenser les effets de reports vers de la fertilisation minérale liés à une moindre disponibilité de la fertilisation organique. Cela nécessite de prendre en compte une dynamique actuellement autre (notamment pour les élevages laitiers) où l'objectif d'intensification de la production et les contraintes liées aux conditions de travail et à la disponibilité des fourrages se traduisent par un développement conséquent des robots de traite.
- **Plus globalement, un rééquilibrage territorial des élevages**, notamment de monogastriques, prenant en compte d'une part les potentiels de production d'alimentation animale et d'autre part les capacités des milieux à gérer les effluents.
- **Un développement de la recherche en matière de sélection et de génétique**, pour sécuriser les gains attendus en termes d'atténuation de la fermentation entérique (format des animaux, croisements de races, sélection bas méthane).
- **Le développement à grande échelle de la méthanisation et de la couverture des fosses à lisier avec capture du méthane et brûlage** pour les effluents de bovins (pour les systèmes concernés), de volaille et porcins permettant de limiter drastiquement les émissions de méthane, et potentiellement d'améliorer l'autonomie énergétique des élevages.
- **La réduction des cheptels de monogastriques** (avec une nécessaire baisse de la consommation dans des proportions plus importantes au vu du niveau de souveraineté alimentaire actuel sur les filières de volaille de chair et de porcins notamment) permettant de réduire les émissions de N₂O associées à la fertilisation des cultures destinées à l'alimentation animale, et plus largement de réduire la concurrence alimentaire. De la même manière, la réduction des cheptels de monogastriques doit être planifiée afin d'éviter les tensions sociales liées à une déstabilisation du secteur du même ordre dans les élevages et le reste de la filière.
- **Le recours à des filières de matières premières moins carbonées pour l'alimentation animale, en particulier des monogastriques et des bovins lait** (soja local, alternatives au soja, etc.). Pour les volailles en particulier, les ordres de grandeur des émissions étant similaires entre l'alimentation animale importée (1,6 MtCO₂e) et les émissions générées sur le périmètre de la ferme (1,7 MtCO₂e), des leviers d'action sur l'amont devraient être mobilisés au-delà des leviers d'action sur la production.
- **La maximisation du recours aux coproduits agricoles et agroalimentaires**, en particulier pour les élevages de monogastriques, afin de maximiser l'efficacité protéique nette et de réduire la concurrence alimentaire.

³⁸³Idele - Evaluation des émissions de GES de stratégie de décarbonation de la filière bovine française - 09/10/2023

3. Réduction de la demande énergétique et décarbonation de l'énergie utilisée

Réduire les émissions de CO₂ du secteur agricole repose sur la combinaison de mesures d'économie d'énergie et de substitution des énergies fossiles par des énergies décarbonées, pour les consommations de combustibles comme de carburants.

Des travaux³⁸⁴ ont estimé à 15 % les économies d'énergie possibles par rapport à la consommation actuelle d'une part, et le remplacement de la totalité des usages énergies fossiles par des énergies décarbonées à l'horizon 2050 d'autre part. **Il est plausible en effet d'imaginer tendre vers une forme d'autonomie énergétique des fermes à partir d'énergies renouvelables** (photovoltaïsme et agrivoltaïsme, biomasse méthanisée, biocarburants), garantissant dans le même temps une moindre exposition aux variations du prix de l'énergie et une amélioration potentielle du revenu agricole tout en décarbonant l'activité. **Cependant, il importe de tenir compte des conflits d'usages qui se posent sur les ressources énergétiques renouvelables, convoitées par de nombreux autres secteurs pour la décarbonation de leurs propres activités, et de la nécessité d'une capacité d'investissement importante de la part du secteur agricole, de même que sur les conflits d'usage de la biomasse déjà évoqués plus haut** (voir partie I.3 et I.4).

L'énergie, un souci de préoccupation et une quête de solutions pour les agriculteurs

71 % des répondants de la GCA³⁸⁵ se déclarent préoccupés par la dépendance de leur ferme aux énergies fossiles pour la viabilité de leur ferme et 81 %* intéressés par les solutions de photovoltaïques sur les toits.

Mais ils sont également inquiets et vigilants à l'égard du risque de conflits d'usage et d'accaparement des terres, en particulier à l'égard de solutions telles que l'agrivoltaïsme et la méthanisation, comme l'illustre ce témoignage d'un agriculteur : « *Les subventions sont importantes pour ces méthaniseurs, donc les agriculteurs utilisent du foncier agricole pour faire pousser des cultures à mettre dedans ! Pour nous le méthaniseur c'est comme une grosse vache, il faut le nourrir, ça devient plus rentable de faire pousser de l'énergie que de produire de la nourriture* ».

À la question « En supposant que la méthanisation soit financièrement rentable et que vous soyez accompagné(e) techniquement », seuls **25 %* des agriculteurs déclarent souhaiter mettre en œuvre (ou avoir mis en œuvre) ce type de pratique**. En effet, pour la très grande majorité, la méthanisation présente de nombreux risques et inconvénients. Ainsi, comme l'expriment ces agriculteurs : « *Les grosses stations [de méthanisation] artificialisent les sols, augmentent les transports, détournent les cultures.* »

Le frein financier peut également être un obstacle : « *On a souhaité développer un projet de micro-méthanisation, la dalle a été coulée, mais le temps qu'Enedis a pris pour le raccordement, le devis avait pris 120 000 € en plus ! Donc on a laissé tomber.* »

À noter toutefois : les petites unités ou la « micro méthanisation » paraît pour certains plus pertinente, perçue comme (i) requérant moins d'investissement, (ii) moins de risque d'accaparement des terres, et (iii) plus d'intérêt en termes d'autonomie ou de diversification pour les fermes : « *D'une manière générale, [je suis] assez opposé aux gros projets qui, du fait, des capitaux importants à investir et d'une grosse complexité de mise en œuvre, ne peuvent être portés que par de grosses firmes de l'agro-industrie et dont la maîtrise échappe aux agriculteurs.* » Ou encore : « *Je suis plus favorable à des petites unités de méthanisation qui permettent de valoriser les effluents d'une ou plusieurs exploitations (mettre en place un cercle vertueux à l'échelle des exploitations agricoles).* »

*Pourcentage calculé sur la base de la totalité des répondants hormis ceux ayant déclaré n'être pas concernés par ce type de pratiques.

³⁸⁴ <https://agriculture.gouv.fr/decarbonation-de-lenergie-utilisee-en-agriculture-lhorizon-2050>

³⁸⁵ Résultats de la Grande Consultation des Agriculteurs 2024, <https://theshiftproject.org/article/resultats-grande-consultation-des-agriculteurs/>

Par ailleurs, concernant les besoins en électricité, cette autonomie locale n'est pas forcément idéale car elle est sous-optimale pour le mix électrique (effet de foisonnement et mutualisation des moyens de production et de stockage de l'énergie permis par un réseau national interconnecté).

Pour le chauffage des bâtiments et des serres, la réduction de la demande énergétique est possible via une meilleure isolation des installations, et du biogaz peut être utilisé. Pour le séchage des productions, des systèmes d'installations thermovoltaïques sont désormais disponibles, permettant d'améliorer la qualité des grains et fourrages, mais avec des coûts d'installation qui restent conséquents. Pour les moteurs des engins agricoles, trois possibilités sont envisagées : électrification, notamment pour des engins de faible puissance, biocarburants liquides, et bioGNV. Nous détaillons les spécificités de cette question ci-dessous.

Méthanisation : un potentiel de production de biogaz à la ferme à associer à la transition agroécologique

Il paraît pertinent de chercher à valoriser des gisements de matières organiques existants (déchets, sous-produits des industries agroalimentaires) par une méthanisation territoriale à laquelle le secteur agricole peut contribuer. Cependant, au-delà des questions d'acceptabilité sociale des installations relatives aux nuisances potentielles et de la multiplication des oppositions locales aux nouveaux projets, **le développement de la méthanisation fait l'objet de controverses sur ses impacts agroenvironnementaux autant que sur le potentiel de production de biométhane**³⁸⁶.

Dans les zones sans élevage, le développement d'unités de méthanisation basées sur le recours à des CIVE intégrées à la rotation soulève en effet des interrogations quant à la performance agronomique et environnementale globale du système. Certains travaux³⁸⁷ ont montré que l'insertion dans les rotations de CIVE potentiellement fertilisées pour produire le maximum de biomasse pouvait bien constituer un levier d'atténuation (en plus de substituer du gaz fossile par du biométhane, elles stockent plus de carbone dans les sols que les couverts végétaux classiques grâce à leur biomasse plus importante), mais pouvait parfois entraîner un besoin accru en fertilisation et en ressources en eau à l'échelle de la rotation. Une étude menée en région Ile-de-France³⁸⁸ montre aussi des effets contrastés, tendant à l'augmentation de la couverture des sols et du stockage de carbone, mais une diminution potentielle de la recharge en eau et une augmentation de la volatilisation ammoniacale.

Plus largement, le rôle de la méthanisation dans la transition agroécologique est sujet à débat³⁸⁹ : si la méthanisation (à l'origine en cogénération) a émergé en réponse à la nécessité d'une meilleure maîtrise des pollutions par les nitrates, notamment dans l'Ouest de la France, les enjeux agroécologiques semblent tenir désormais une place minoritaire dans la construction des politiques publiques encadrant la méthanisation, comparativement aux enjeux énergétiques. Ainsi, **la méthanisation, s'adossant aux systèmes agricoles et les modifiant, peut parfois améliorer, parfois dégrader la durabilité de ces systèmes, sans être une voie systématique vers l'agroécologie**. En d'autres termes, la méthanisation peut assurer une soutenabilité partielle (réduction des émissions de GES de l'élevage, stockage de carbone dans les sols grâce aux CIVE) mais n'engage pas nécessairement les acteurs agricoles dans une transition systémique, n'ayant pas à elle-seule le pouvoir de faire basculer un système vers l'agroécologie³⁹⁰. **La définition d'une méthanisation réellement agroécologique comprendrait la transition vers l'autonomie en fertilisants et une moindre consommation de produits phytosanitaires, le maintien des cultures pérennes, l'attention portée à la biodiversité, le développement de CIVE multi-espèces ayant d'autres objectifs que la seule production d'énergie, et la recherche de sobriété et d'autonomie énergétique**³⁹¹.

Un nouvel axe de développement est actuellement étudié par la recherche³⁹², concernant l'intérêt de la méthanisation de légumineuses fourragères (luzerne et trèfle), qui permettrait d'utiliser la fixation symbiotique pour produire, dans le même temps que du biogaz, un fertilisant azoté via le digestat (projet Legumetha).

³⁸⁶ <https://www.iddri.org/sites/default/files/PDF/Publications/Catalogue%20Iddri/D%C3%A9cryptage/202404-IB0224FR-biomethane.pdf>

³⁸⁷ <https://pastel.hal.science/tel-04207003>

³⁸⁸ <https://agriculture.gouv.fr/performances-agronomiques-et-environnementales-de-la-methanisation-agricole-sans-elevage-analyse>

³⁸⁹ https://pastel.hal.science/tel-04190138v1/preview/118091_CADIYOU_2023_archivage.pdf#page=2

³⁹⁰ <https://revue-sesame-inrae.fr/la-methanisation-agricole-en-france-entre-opportunite-energetique-et-transition-agroecologique-1-2/>

³⁹¹ <https://revue-sesame-inrae.fr/la-methanisation-agricole-en-france-entre-opportunite-energetique-et-transition-agroecologique-2-2/>

³⁹² <https://www.maelia-iam.fr/applications-et-projets/projets>

Spécificités de la décarbonation du machinisme agricole

La demande en carburant représente actuellement environ 70 % des besoins énergétiques de l'agriculture française, sous forme de carburant, principalement du gasoil non routier (GNR), un gasoil à la fiscalité avantageuse, commun aux secteurs agricoles et au BTP notamment, utilisé dans les tracteurs. Cela représente une demande de l'ordre de **2 millions de tonnes équivalent pétrole**³⁹³.

Le parc de machines agricoles français représente environ 1,5 millions de tracteurs et autres outils motorisés (automoteurs, machines de récolte, etc.), dont une partie ne sert qu'occasionnellement (anciens tracteurs, utilisés pour des petits travaux ponctuels dans le corps de la ferme, par exemple). La longue durée de vie d'un tracteur en France (certains acteurs économiques estiment cette durée à 28 ans) incite à considérer le retrofit comme un levier majeur de transition vers des motorisations décarbonées, en premier lieu les tracteurs électriques rétrofités dès lors que leur autonomie et solution de recharge permettent de répondre aux cas d'usages.

a. Des vecteurs énergétiques différents pour des cas d'usages différents

Si des solutions décarbonées sont déjà disponibles sur le marché dans certains secteurs de l'économie (pour la mobilité par exemple : électrification des voitures, biogaz pour le transport urbain, etc.), **la décarbonation des machines du secteur agricole est beaucoup plus lente, avec seulement quelques démonstrateurs et très peu de modèles commerciaux.**

Cela est lié pour partie à la densité énergétique du pétrole qu'il est difficile de substituer pour des machines agricoles ayant, dans certaines situations, des besoins de forte puissance et d'autonomie au champ, paramètre plus ou moins important selon les engins et les travaux pour lesquels on les emploie.

Ces « cas d'usage » déterminent également les possibilités de substitution par des vecteurs énergétiques décarbonés aux propriétés différentes. On en distingue trois principaux pouvant être utilisés pour l'agriculture :

- **Électricité** : solution reposant sur l'utilisation de batteries et un accès au réseau électrique pour pouvoir assurer la recharge, avec des contraintes de taille, de poids et de densité énergétique (pour les technologies actuellement disponibles). Il convient de noter que les moteurs électriques peuvent être les vecteurs d'une économie d'énergie importante, le rendement d'un moteur électrique étant en effet nettement supérieur – de l'ordre de 70 à 90 % – à celui d'un moteur thermique, dont le rendement maximal en conditions optimales est seulement de l'ordre de 35 %.
- **Biogaz** : pouvant être produit directement sur la ferme, ou à proximité, à partir de matières produites sur la ferme, et n'entrant pas forcément en concurrence directe avec l'alimentation (couverts intermédiaires, déjections animales, résidus de cultures, etc.). Il nécessite des infrastructures spécifiques pour pouvoir être utilisé comme carburant pour les tracteurs (stations de compression) et ne permet pour l'instant qu'une autonomie modérée (de l'ordre de la demi-journée de travail avant recharge).
- **Biocarburants liquides** (biodiesel, etc.) : pouvant se substituer entièrement aux carburants liquides actuels moyennant quelques modifications et réglages des moteurs thermiques actuels, mais nécessitant des infrastructures de production plus importantes, plus distantes des fermes.

Il s'agit donc d'identifier les conditions et cas d'usages auxquels ces différents vecteurs peuvent répondre : s'il semble plus facile d'équiper une mélangeuse à aliments pour animaux avec une batterie, entendu qu'elle ne sert que quelques heures par jour, dans l'enceinte du corps de ferme, et donc à proximité d'un point de recharge en permanence, cela semble plus difficile de l'imaginer pour une moissonneuse-batteuse, qui demande beaucoup de puissance et doit pouvoir fonctionner de nombreuses heures consécutives dans les champs, sans interruption, afin d'effectuer les travaux de récoltes quand les productions sont à maturité, dans des fenêtres météorologiques contraintes. Le tableau ci-dessous propose une illustration des critères déterminants permettant ensuite de qualifier la demande énergétique, et caractériser le type de vecteur adapté aux usages.

³⁹³ <https://bibliothèque.ademe.fr/qed/915/synthese-agriculture-efficacite-energetique-2019.pdf> page 10

Intensité (I)	0 : très faible	1 : modéré	2 : moyenne	3 : forte
Durée usage (D)	0 : courte et peu fréquente	1 : courte et fréquente	2 : longue OU saisonnière	3 : longue ET saisonnière
Point de ravitaillement (P)	0 : sur place	1 : proche ou fréquenté	2 : éloigné OU peu fréquenté	3 : éloigné ET peu fréquenté

Tableau 7 : D'après échanges avec la FNCUMA : caractérisation des cas d'usages du machinisme dans le secteur agricole, en vue d'en estimer les changements de vecteurs énergétiques : faire la somme des scores dans chaque ligne I+D+P pour obtenir un score total

Les scores jusqu'à 6 sont les plus faciles à décarboner (électriquement ou au bioGNV), les scores de 7 à 9 peuvent être décarbonés de manière transitoire en faisant appel aux biocarburants de 2nde génération, cependant les pratiques agricoles associées tendent à évoluer vers des scores inférieurs.

Exemples de scores et matériels concernés

Score 9/9 : les automoteurs spécialisés et de récoltes (ensileuses, moissonneuses-batteuses, machines à vendanger, arracheuses de betteraves, de légumes, etc.), cela concerne particulièrement les prestataires ETA et CUMA.

Score 7 à 8/9 : les grands tracteurs utilisés sur les plus grandes exploitations en grandes cultures et pratique conventionnelle, à fort engagement journalier au champ et en transport, sans ravitaillement, et pour partie les automoteurs fixes énergivores (travail du sol, broyage de plaquettes, etc.).

Score 5 à 6 : les tracteurs compacts utilisés en polyculture-élevage sur des exploitations de moins de 200 ha en pratique agricole conventionnelle avec quelques activités de forte puissance (épandage organique de matière solide, etc.) **ou les grands tracteurs de grandes cultures pratiquant l'agriculture de conservation des sols (ACS).**

Score 3 à 4 : les tracteurs compacts utilisés en polyculture-élevage sur des exploitations de moins de 200 ha en pratiques agricoles moins énergivores permises soit par l'allongement des cycles de production et des assolements (jusqu'à 7 ans), soit par un recours accru à la fertilisation minérale et les intrants chimiques réduisant les travaux du sol.

Score 1 à 2 : les activités sur l'exploitation, les tracteurs de « cour de ferme » : manutention, alimentation des animaux, paillage, etc.

b. Bonnes pratiques et changements systémiques pour réduire la demande énergétique des tracteurs

Un certain nombre de leviers de décarbonation relevant de mesures d'efficacité et de bonnes pratiques professionnelles existent, par exemple^{394,395} :

- Passage au banc d'essai moteur : entretien, réglages du moteur (10 %)
- Conduite adaptée, éco-conduite (10-20 %)
- Adéquation tracteur - outil (5-8 %) (voir encadré ci-dessous)
- Réglages adaptés de l'outil et utilisation de la prise de force économique (30 % sur la conso de l'outil)
- Pression adaptée des pneus, bon usage du télégonflage, etc. (5-10 % d'économie)
- Optimisation de la gestion des masses (5-8 % d'économie)
- Total : il est possible de viser jusqu'à 35 % d'économie d'énergie en utilisant tous ces leviers.

Ces bonnes pratiques d'efficacité sont applicables dès aujourd'hui, sans même changer les itinéraires techniques ni les machines.

³⁹⁴ <https://aile.asso.fr/wp-content/uploads/2021/01/EFF20-METTONS-NOS-TRACTEURS-AU-R.pdf>

³⁹⁵ <https://www.entraid.com/articles/consommation-carburant-banc-essai>

Cependant, **des changements systémiques vers l'agroécologie sont en mesure de contribuer à des économies significatives d'énergie**, en particulier la **réduction du travail du sol** : l'approximation voudrait qu'un travail du sol consomme 1 litre de gasoil par ha et par cm de profondeur. Si la réalité est plus complexe, dépendant des conditions pédoclimatiques et particulièrement de la texture des sols, les économies de carburant réalisées par des agriculteurs ayant adopté des pratiques relevant de l'agriculture de conservation des sols (sols couverts, avec un travail minimum du sol en maximisant le semis direct, et avec une diversification des cultures) laisse présager des économies réelles d'énergie mécanique nécessaire pour conduire les cultures (jusqu'à 50 % de réduction de la demande en carburant pour les agriculteurs les plus performants).

Cette sobriété énergétique constitue à la fois un levier de décarbonation en soi, mais aussi la possibilité de considérer des motorisations moins autonomes en énergie que le moteur diesel, mais fortement décarbonées telles que l'électrique à batterie, à l'instar du transport routier.

Adéquation tracteur outil, efficacité énergétique et débit de chantier

Le débit de chantier correspond au temps nécessaire pour effectuer un chantier agricole pour une surface donnée : il est fonction de la largeur de travail³⁹⁶ de l'outil et de la vitesse d'avancement, (elle-même définie par l'outil, qui a une vitesse optimale d'utilisation, et les conditions de sol, comme l'humidité, la texture, etc.).

Un tracteur doit être utilisé dans sa gamme de puissance optimale pour avoir le meilleur rendement, et donc être utilisé à une charge moteur importante. Ainsi, dans des conditions idéales d'un point de vue énergétique, sous réserve que la taille du matériel soit optimisée, la puissance du tracteur détermine le débit de chantier. Un plus gros tracteur permet donc de tirer des outils plus larges à la même vitesse, réduisant le temps nécessaire pour un même travail.

c. Dimensionnement et puissance du parc machine : une logique contre-intuitive guidée par l'efficacité et les effets des changements climatiques

Si la perspective de tracteurs plus petits, et donc moins gourmands en énergie, peut sembler logique pour réduire la demande énergétique de l'agriculture française, cela n'est généralement pas vrai dans le cas des moteurs thermiques. En effet, pour les modèles actuellement sur le marché, les tracteurs les plus puissants sont aussi ceux qui ont de légèrement meilleurs rendements énergétiques (et donc une plus petite consommation de carburant par cv efficace)^{397,398}. L'électrification d'une partie du parc vient cependant nuancer cette approche. En outre, des machines plus lourdes et plus grosses ont aussi des impacts plus importants sur les sols, les routes, etc.

Or, au regard des effets des changements climatiques, il est probable que les fenêtres météorologiques permettant de réaliser certains travaux agricoles se réduisent (conditions favorables à la moisson, aux préparations de sol, aux semis, etc.) ce qui va impliquer que **pour effectuer le même travail dans des intervalles de temps plus courts, à pratiques identiques, les agriculteurs pourraient avoir besoin d'outils plus larges, et donc d'un peu plus de puissance utile par ha, toutes choses égales par ailleurs**, soit par l'augmentation du nombre de tracteurs, leur puissance ou une optimisation de leur utilisation.

³⁹⁶ Largeur sur laquelle un outil peut travailler en un seul passage, une même machine pouvant exister en différentes largeurs : une herse de 3m de largeur demandera moins de puissance pour être entraînée qu'une herse de 4m50, qui elle demandera moins de passages pour couvrir la même surface, mais la vitesse d'avancement sera la même.

³⁹⁷ https://chambres-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/National/Casdar/indices_performance_energ%C3%A9tique_tracteurs_d%C3%A9cembre2015.pdf

³⁹⁸ Cela pourrait trouver son explication dans le fait que les moteurs de taille plus importante ont un peu moins de pertes d'énergie par frottements.

d. Un parc de machines déjà surdimensionné

Si les tendances des aléas climatiques sont susceptibles de rendre pertinente la hausse du nombre de chevaux utiles par ha, cela ne se traduira pas forcément par une augmentation de la puissance des machines à l'achat. En effet, **le parc de machines actuel est considéré comme surdimensionné** par de nombreux acteurs (notamment des machines souvent trop puissantes par rapport aux besoins réels, ou une utilisation sous optimale du potentiel, soit en temps de travail par an, soit en puissance utile par rapport à la puissance disponible³⁹⁹), **en particulier en raison de la fiscalité agricole qui incite au surinvestissement les bonnes années afin de réduire l'assiette des résultats des exploitations imposable et soumise à cotisations sociales MSA** (voir par exemple *Plaidoyer pour une mécanisation responsable, durable et vivable de l'agriculture française* porté par la FNCUMA⁴⁰⁰). Une évolution de la fiscalité agricole et du mécanisme de cotisations semble en mesure de participer à améliorer cette situation.

e. Mutualisation, taux de renouvellement : des facteurs de durabilité

La mutualisation et/ou le recours aux prestations sont des moyens de réduire l'empreinte GES du machinisme : ainsi une étude d'ACV réalisée en Italie⁴⁰¹ illustre le poids de l'empreinte GES de la fabrication des machines dans le cycle de vie, et met en avant **le fait que la mutualisation des machines qui sont les moins utilisées sur la ferme (en nombre d'heures par an) permet d'en améliorer le bilan carbone (en ACV).**

Cette mutualisation (via une CUMA, une ETA, etc.) est aussi un moyen de disposer de matériel récent et performant, potentiellement mieux utilisé (réglage, entretien, etc.). Cette mutualisation n'a évidemment de sens que pour du matériel sur lequel l'utilisation n'est pas trop simultanée, et pour du matériel dont l'obsolescence est plus liée à sa vétusté (âge de la machine) qu'à son nombre d'heures de fonctionnement.

f. Incertitudes sur les évolutions du parc de machines à horizon 2050

La robotisation et l'automatisation sont une trajectoire possible pour l'évolution du parc de machines, sans présager des délais ou de la nature de ce déploiement : il est tout à fait possible d'imaginer des tracteurs sans cabines, polyvalents et puissants, venant remplacer les tracteurs actuels petit à petit, mais il est également possible que ce déploiement de la robotisation se fasse via le déploiement de machines plus petites et légères, plus spécifiques, déployés en flottes (plusieurs petits robots de désherbage par exemple, ou remplacement d'automoteurs spécifiques comme les pulvérisateurs).

Une partie du parc de tracteurs actuels pourrait aussi faire l'objet de modifications quant aux vecteurs énergétiques (rétrofit) pour fonctionner soit au biogaz, soit à l'électricité, ou encore simplement être homologué pour fonctionner au biocarburant. Peu de travaux de prospective existent cependant pour dessiner des trajectoires d'évolution du parc des engins agricoles à horizon 2050, et il est donc plus prudent de ne pas parier sur un déploiement massif à court terme.

La logistique agricole, transports et flux de matériels aux abords des parcelles et autour de l'exploitation, prend une part croissante de la consommation d'énergie et de temps. Utiliser des équipements dédiés au transport permet de décorrélérer les contraintes, par exemple la pression des pneumatiques (élevée sur route, basse au champ) ou la vitesse de circulation donc la puissance nécessaire : en d'autres termes, dissocier le tracteur de la logistique permet une potentielle meilleure utilisation de l'énergie disponible.

³⁹⁹ Les taux de charge moyen au travail (ratio entre la puissance utilisée et la puissance maximale disponible) seraient de l'ordre de 75% selon les constructeurs tractoristes.

⁴⁰⁰ <https://www.cuma.fr/app/uploads/sites/3/2024/08/fncuma-plaidoyer2024-hd-page.pdf>

⁴⁰¹ <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1537511021002968>

D'autres enjeux sont à prendre en compte pour estimer les besoins énergétiques liés à la mécanisation à horizon 2050 :

- « Remembrement d'intérêt énergétique » : une réorganisation du foncier via des échanges de parcelles et une planification des reprises et installations, visant à réduire la distance des parcelles par rapport au corps de ferme, avec un possible travail sur la forme et la taille des parcelles visant à réduire le nombre de demi-tours nécessaires pour effectuer les chantiers, etc. Attention cela peut présenter des intérêts contradictoires avec d'autres enjeux environnementaux (préservation des haies, taille modérée des parcelles favorable à la biodiversité par exemple).
- Questions organisationnelles : un travail sur l'amplitude horaire d'ouverture des silos pendant la moisson peut contribuer à optimiser les chantiers pendant les fenêtres météo propices aux récoltes, et donc d'atténuer les besoins d'accroître les débits de chantier, et/ou d'augmenter la résilience du système face à des conditions météorologiques changeantes.
- Un risque d'effet rebond : il est également nécessaire de tenir compte du fait que si le machinisme est décarboné et consomme moins d'énergie, qui plus est s'il ne nécessite pas de personnel (robots/tracteurs autonomes, etc.), un risque d'effet rebond conduisant à une augmentation de l'utilisation des machines est sérieux, avec des impacts difficiles à anticiper, par exemple : des parcelles plus "propres" grâce aux robots désherbeurs fonctionnant 24h/24, pourraient consommer finalement plus d'énergie, et/ou accentuer la diminution de ressources alimentaires pour la petite faune sauvage.

La perspective de décarbonation de 100 % des machines semble atteignable à horizon 2050, en particulier avec l'utilisation des biocarburants pour les usages qu'on ne sait pas électrifier ni passer au biogaz. Il faut cependant bien garder à l'esprit que des concurrences d'usage existent vis-à-vis des biocarburants. Cette transition du parc de machines agricoles nécessite une adaptation de l'appareil industriel de production, de retrofit et de l'entretien des machines agricoles, et doit être appuyée par un effort de conseil et de formation pour une utilisation et un réglage optimal des machines, et **une politique fiscale incitant à la décarbonation et au juste dimensionnement des machines.** Le Shift Project pourra approfondir ces travaux sur le machinisme agricole dans des travaux ultérieurs.

4. Leviers en faveur d'une meilleure résilience des systèmes agricoles

La superposition des facteurs d'impact climatique, énergétique et écosystémique susceptibles de survenir (voir partie II) questionne la résilience des systèmes agricoles et leur niveau de préparation. En combinaison avec des leviers d'atténuation, différents leviers peuvent être activés en faveur d'une meilleure résilience.

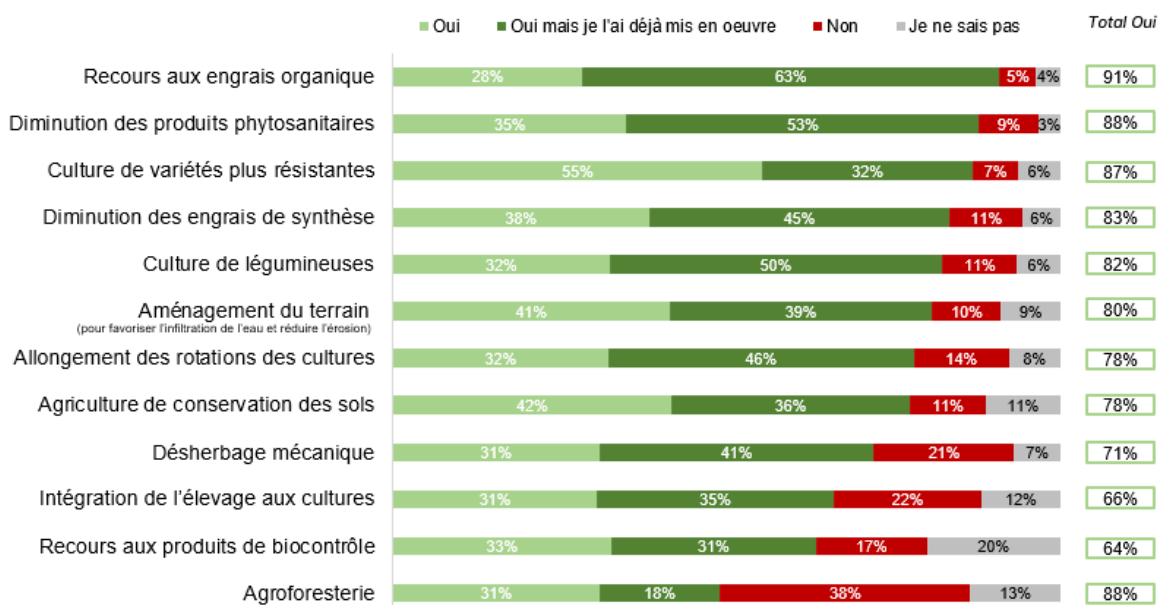
A. Adaptation des plantes cultivées et des techniques de culture

a. Sélection de variétés et d'espèces plus résistantes aux stress biotiques et abiotiques

Selon la Grande Consultation des Agriculteurs⁴⁰², **87 %* des agriculteurs souhaiteraient cultiver des variétés plus résistantes** et nombre d'entre eux tentent des expérimentations en ce sens, mais ce travail coûteux – en temps et en manque à gagner – n'est souvent pas rémunéré, comme le déplorait l'un d'entre eux : « *On nous demande souvent de participer à des travaux de recherche, parfois interrompus faute de budget, auquel cas, on a tout perdu... Les autres intervenants sont rémunérés, mais nous les agriculteurs, on est les seuls à ne pas être rétribués...* »

Tous ces leviers ont la faveur des agriculteurs : s'ils étaient rentables et accompagnés techniquement, la grande majorité des agriculteurs concernés les mettraient en œuvre.

En supposant que les pratiques ci-dessous soient financièrement rentables et que vous soyez accompagné(e) techniquement, quelles pratiques souhaiteriez-vous mettre en œuvre ?



* Totaux calculés sur une base excluant les répondants ayant déclaré être « non concernés par la question »

* Pourcentages calculés sur la base de la totalité des répondants hormis ceux ayant déclaré n'être pas concernés par ces pratiques.

Dans tous les systèmes de cultures, la poursuite de la sélection de variétés et d'espèces mieux adaptées aux nouveaux contextes pédoclimatiques nationaux (stress hydrique, chaleur, etc.), ainsi qu'aux pathogènes ou ravageurs, facilitera l'adaptation des systèmes agricoles. Ce levier concerne les

⁴⁰² Résultats de la Grande Consultation des Agriculteurs 2024, <https://theshiftproject.org/article/resultats-grande-consultation-des-agriculteurs/>

semenciers, mais aussi les agriculteurs qui pourraient être incités, dans les différents contextes français, à contribuer de façon plus importante à la sélection ou à la conservation dynamique des ressources biologiques. L'accent doit être particulièrement porté sur des cultures n'ayant pas fait d'efforts de sélection importants ces dernières décennies, mais de grand intérêt dans une optique de décarbonation et de résilience : c'est le cas des légumineuses, pour lesquelles le niveau de diversité variétale, et plus globalement de disponibilité des semences, ne permet pas aujourd'hui d'envisager une expansion rapide.

Les nouvelles technologies de sélection (« *New Breeding Techniques* ») peuvent offrir un gain de temps important sur les schémas de sélection, mais posent de sérieuses questions réglementaires et d'acceptation sociétale non résolues à ce jour au niveau européen⁴⁰³. Ce sujet est abordé plus en détail dans le rapport « Quelles technologies pour une agriculture bas carbone, résiliente et prospère »⁴⁰⁴ dont la publication accompagne celle du présent rapport.

b. Anticipation du déplacement des zones biogéographiques

Parallèlement à la sélection végétale doit être également anticipé le déplacement attendu des zones biogéographiques (aires de répartition des cultures) sur le territoire national (voir II.2.D.), par l'organisation des filières correspondantes en matière de collecte et transformation des productions.

c. Développement de l'usage des biostimulants et du biocontrôle

Les recherches sur les biostimulants semblent offrir des perspectives notables : en stimulant les processus de nutrition des plantes, ils pourraient améliorer l'efficacité d'utilisation des éléments nutritifs et leur tolérance aux stress abiotiques, tout en garantissant les caractéristiques qualitatives des récoltes⁴⁰⁵.

De même, les techniques de biocontrôle, basées sur l'emploi d'insectes auxiliaires ou de substances naturelles pour protéger les cultures contre les organismes nuisibles, peuvent contribuer à maintenir un niveau de production suffisant en limitant les impacts sur les écosystèmes et la biodiversité. Elles doivent cependant s'inscrire dans une démarche globale de prévention des risques par la protection intégrée des cultures (voir II.2.D.) et doivent parfois encore se combiner à des produits phytosanitaires de synthèse (à dose réduite) pour assurer l'efficacité recherchée.

d. Recours aux cultures associées et aux mélanges variétaux

Avec la pratique traditionnelle des méteils, **les cultures associées constituent un facteur de résilience dans la mesure où elles permettent la dilution du risque d'aléas par rapport à une culture pure**. Elles offrent aussi **un moyen privilégié de réintroduction des légumineuses**, se situant à la croisée d'intérêts de nature biophysique et économique⁴⁰⁶. Elles permettent en effet :

- la valorisation des complémentarités entre légumineuses à graines et céréales⁴⁰⁷,
 - complémentarités sur la nutrition azotée (céréales compétitives dans l'acquisition de l'azote minéral et légumineuses utilisent préférentiellement la fixation symbiotique),
 - capacité des légumineuses à relever le taux de protéines des céréales compagnes,
- la réalisation d'économies d'engrais minéraux (principalement azotés), du fait de l'effet fertilisant des légumineuses, à la fois sur les céréales cultivées simultanément et pour les cultures suivantes.

La réintroduction de légumineuses sous forme de cultures associées est également vectrice d'autres bénéfices, parmi lesquels un effet positif sur le rendement et de la qualité sanitaire des cultures suivantes (moins de

⁴⁰³ https://www.euractiv.fr/section/agriculture-alimentation/news/lue-divisee-sur-la-dereglementation-des-nouveaux-ogm/?_ga=2.99938008.778142029.1720621749-1495174760.1720621749

⁴⁰⁴ Rapport "Quelles technologies pour une agriculture bas carbone, résiliente et prospère", The Shift Project, Novembre 2024

⁴⁰⁵ <http://www.biostimulants.fr/produits-utilisation/definition/une-definition/>

⁴⁰⁶ Bedoussac et al., 2018, *Comment gérer l'azote dans les systèmes de cultures avec les légumineuses?*,

⁴⁰⁷ Schneider et Huyghes, 2015, *Les légumineuses pour des systèmes agricoles et alimentaires durables*. Editions Quae, 512 p.

mycotoxines dans les grains des céréales suivantes), une amélioration de la qualité des sols (état structural, vie microbienne...) et un effet facilitant pour l'acquisition de phosphore⁴⁰⁸.

Il existe une grande diversité de schémas d'association :

- les mélanges de céréales,
- les associations céréales/légumineuses à graines (blé/lentille, seigle/lentille, triticale/pois, etc.),
- les associations graminées - légumineuses fourragères (prairies graminées/luzerne ou trèfle),.

L'introduction d'arbres, légumineuses (robiniers, albizia...) ou non, cultivés au bord ou au sein des parcelles agricoles via des dispositifs agroforestiers, constitue aussi une forme d'association.

De même, **l'intérêt de l'utilisation de mélanges variétaux dans la résilience des agroécosystèmes a été établi**, en particulier pour le blé dans les bassins céréaliers⁴⁰⁹. Cette pratique n'est cependant pas généralisable à toutes les espèces : ainsi l'orge de brasserie doit impérativement être cultivée en variété pure pour répondre à la demande des malteurs.

B. Leviers favorables à la biodiversité

Certains des leviers d'atténuation et de transition présentés ci-dessus ou ci-après contribuent également à préserver la biodiversité :

- diversification et allongement des rotations, en particulier avec des cultures de légumineuses, insertion de couverts végétaux, cultures associées (voir III.1.A.),
- développement de systèmes d'élevage favorisant le pâturage de prairies permanentes ou temporaires ou un lien au sol avec des surfaces de parcours (voir III.2.E.),
- réduction du travail du sol (voir III.3.A.),
- plantation de haies ou de systèmes agroforestiers (voir III.5.),
- relocalisation de la production de l'alimentation animale (voir III.6.A.).

S'il peut exister des contradictions entre réduction des émissions de GES et biodiversité (voir III.2.A. concernant les élevages intensifs), la préservation de la biodiversité converge généralement avec des objectifs de résilience.

Des leviers spécifiques permettent de plus de favoriser tout particulièrement la biodiversité dans et autour des parcelles agricoles, afin de faire profiter les systèmes agricoles de certaines interactions biologiques et des services écosystémiques associés (pollinisation, lutte contre certains ravageurs...).

Certains reposent sur les effets bénéfiques de la complexification du paysage, par exemple :

- l'augmentation de l'hétérogénéité du paysage agricole en diminuant la taille des parcelles⁴¹⁰,
- l'implantation de bandes fleuries⁴¹¹ et autres infrastructures agroécologiques (espaces semi-naturels des agroécosystèmes : bordures de champs, bosquets, fossés,...) ,
- la création ou restauration de mares⁴¹².

D'autres concernent la diversification des productions ou l'adaptation des pratiques agricoles, par exemple :

- la réintroduction de l'élevage dans les territoires spécialisés en grandes cultures⁴¹³, avec pâturage des intercultures par les troupeaux⁴¹⁴,
- la modification des pratiques de fauche (retard et fréquence réduite)⁴¹⁵,
- l'utilisation de paillage végétal en viticulture⁴¹⁶ ou maraîchage,
- la réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires, et en particulier des plus nocifs.

⁴⁰⁸ Ibid.

⁴⁰⁹ <https://wheatamix.hub.inrae.fr/presentation-du-projet>

⁴¹⁰ <https://hal.inrae.fr/hal-02518943>

⁴¹¹ <https://hal.inrae.fr/hal-02595483/document>

⁴¹² <https://theses.hal.science/tel-03161836>

⁴¹³ <https://hal.inrae.fr/hal-02624127>

⁴¹⁴ <https://hal.inrae.fr/hal-03234782/document>

⁴¹⁵ <https://hal.science/hal-01458500/document>

⁴¹⁶ https://www.researchgate.net/publication/342850310_A_meta-analysis_of_the_ecotoxicological_impact_of_viticultural_practices_on_soil_biodiversity

C. Leviers d'adaptation par la gestion de l'eau : gérer l'eau dans les sols et les paysages, irrigation de résilience, cultures sobres

a. Gestion de l'eau dans les sols et les paysages agricoles

La résilience des sols agricoles peut être favorisée par leur capacité à stocker l'eau⁴¹⁷ pour la restituer aux plantes cultivées en fonction de leurs besoins. Le Réservoir en Eau Utilisable d'un sol (RU), ou Réserve Utile, dépend en premier lieu des caractéristiques du sol (texture, teneur en cailloux et surtout profondeur), mais peut être amélioré par l'apport de matière organique (plus particulièrement en sols sableux). **Les pratiques agricoles améliorant la structure du sol, limitant le ruissellement de l'eau ou les pertes en eau par évaporation** (notamment certaines successions culturales avec semis sous couvert, gestion des résidus de cultures) et la culture de plantes à enracinement profond permettent d'optimiser l'utilisation de l'eau par les cultures et valorisent toute la profondeur du RU.

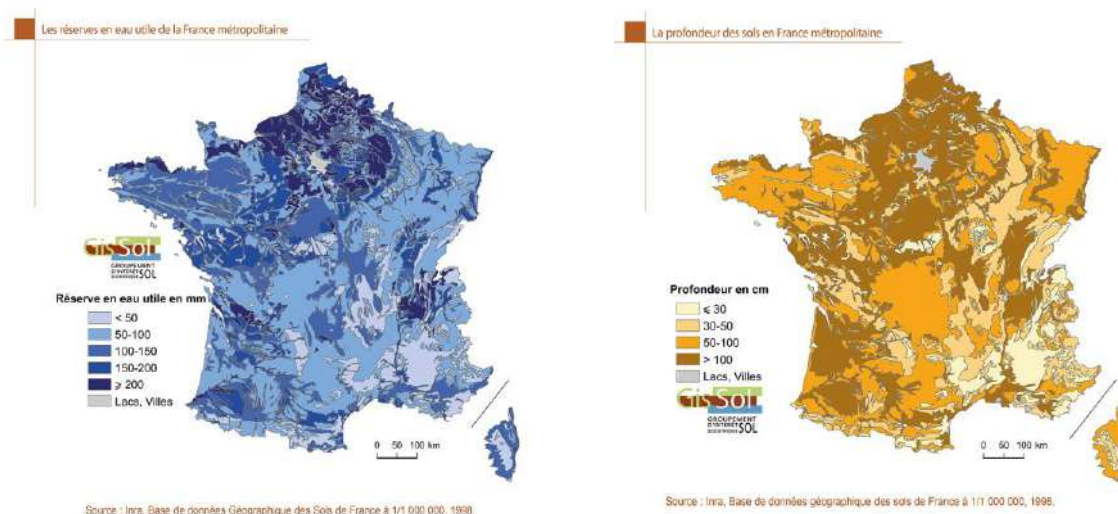


Figure 44 : Réserves en eau utile de la France métropolitaine / La profondeur des sols en France métropolitaine

Source : Gis Sol⁴¹⁸

À l'échelle du paysage agricole et non plus de la parcelle, la plantation de haies ou d'alignements d'arbres en systèmes agroforestiers (voir III.5) peut modifier localement l'agroécosystème et créer un microclimat modérant l'incidence de l'ensoleillement sur les cultures ou les animaux, tout en permettant l'infiltration de l'eau en profondeur. **il est possible aussi de mettre en place des aménagements pour améliorer et/ou orienter la circulation de l'eau, favoriser son infiltration et limiter le ruissellement par application des principes du keyline design⁴¹⁹**, fondant la discipline émergente en France de l'hydrologie régénérative. Imaginé dans les années 1950 dans le contexte australien de régime des pluies très aléatoire, mais jusqu'à présent assez peu connu en Europe, il consiste, à partir d'une lecture précise de la topographie locale, à aménager et organiser le terrain selon des lignes de niveau. Plus simple à concevoir dans le contexte de plantations pérennes⁴²⁰ (vignes et vergers) ou de prairies permanentes, il peut s'appliquer aussi aux paysages de grandes cultures⁴²¹, particulièrement concernés par la prévention des phénomènes d'érosion du sol.

⁴¹⁷ <https://hal.inrae.fr/hal-02785139/document>

⁴¹⁸ <https://www.gissol.fr/donnees/cartes/les-reserves-en-eau-utile-de-la-france-metropolitaine-1483>
<https://www.gissol.fr/donnees/cartes/la-profondeur-des-sols-en-france-metropolitaine-1493>

⁴¹⁹ <https://www.paysages-fertiles.fr/www/index.php/methodologie/le-keyline-design>

⁴²⁰ https://orgprints.org/id/eprint/53596/1/Bioactualit%C3%A9s_06_24_berbain_hydrologie.pdf

⁴²¹ <https://www.mdpi.com/2073-445X/12/1/100>

b. Irrigation de résilience

Cependant, dans les zones géographiques les plus problématiques, ou pour les productions agricoles très dépendantes de la disponibilité en eau, les variations attendues des précipitations, en volume comme en répartition au cours de l'année, nécessitent d'organiser la gestion de la ressource en eau, avec toutes les précautions qui s'imposent en termes de juste répartition de la ressource et de gouvernance.

Différents leviers sont activables⁴²² : systèmes permettant d'améliorer l'efficacité d'irrigation, création de nouvelles retenues d'eau en les conditionnant à des objectifs de sobriété des usages, etc. Une irrigation de résilience devrait pouvoir être réservée aux cultures indispensables les plus vulnérables et aux cultures à forte valeur ajoutée qui permettent la rémunération la plus élevée du m³ d'eau (semences, arboriculture, légumes de plein champ, etc.) ou, selon les contextes, à des stades précis des cultures (semis des cultures de printemps, semis des couverts d'interculture en été, cultures d'hiver en cas de printemps sec).

Par ailleurs, le choix du dispositif d'irrigation (canons enrouleurs, pivots/rampes, systèmes de couverture intégrale, systèmes de goutte-à-goutte) a une réelle incidence en termes de dépense énergétique⁴²³. De plus, concernant l'efficacité énergétique du matériel d'irrigation, la substitution technologique pourrait être un levier pertinent dans certains cas⁴²⁴ tels que :

- en grandes cultures, économies potentielles de 10 à 25 % en passant d'un enrouleur à un pivot, et de 10 à 35 % en passant d'une aspersion à un goutte à goutte. Les sondes de sol permettraient de réaliser des économies d'eau de 8 à 40 % d'économies d'eau ;
- en maraîchage de plein champ, économies d'eau potentielles de 30 à 90 %.

D'autre part, au-delà de la dépense énergétique adossée au matériel d'irrigation, il s'agit également de considérer les besoins en eau des cultures irriguées tout comme leur efficacité d'utilisation de cette eau^{425,426}. Les résultats confirment une solide capacité de valorisation de l'eau pour le maïs et la pomme de terre, d'autant plus lorsque celle-ci est apportée à des stades phénologiques critiques.

Néanmoins, ces différents éléments ne nous permettent pas de statuer quant à « l'efficacité énergétique globale » de ces cultures irriguées. Pour cela, il faudrait mettre leur dépense énergétique directe (au travers des équipements) et les volumes d'eau mobilisés au regard du rendement final, et en l'occurrence de la quantité de calories produites. Des ratios d'efficacité énergétique pourraient alors être calculés sur l'ensemble du cycle (de l'acheminement de l'eau à la récolte de la biomasse agricole). Cela pourrait constituer une boussole pour prioriser l'allocation de la ressource en eau en période de tensions.

Toutefois, ce prisme énergétique n'est pas l'unique manière de concevoir l'irrigation de résilience. Il serait également pertinent de chercher à minimiser les pertes de rendement voire même de travailler à la sauvegarde pure et simple de certaines cultures, dont la survie est compromise en cas de stress hydriques. Cela vaut par exemple pour les couverts intermédiaires implantés dans les territoires exposés à des conditions de plus en plus arides durant l'interculture (e.g. Occitanie, région PACA...). S'agissant des cas moins critiques, plusieurs spécialistes appellent à **miser sur une irrigation ciblée et légèrement « déficitaire » ; une logique consistant à appliquer des restrictions hydriques raisonnées en dehors des stades phénologiques critiques⁴²⁷.** Cela signifie que la consommation d'eau doit rester maîtrisée lorsque les cultures ne sont pas dans des phases à risque vis-à-vis de leur développement et du rendement final. **En termes économiques, l'objectif sous-jacent serait d'optimiser le revenu agricole final en diminuant les coûts liés à l'eau, et**

⁴²² <https://www.vie-publique.fr/files/rapport/pdf/285442.pdf>

⁴²³ Exprimée en kWh# par mètre cube d'eau, cette performance énergétique a été estimée par Arvalis pour les principales technologies d'irrigation. Le détail est livré à l'annexe 6, avec pour compléments le degré de souplesse des équipements et les principales productions végétales ciblées.

⁴²⁴ Serra Wittling C., 2017, Evaluation des économies d'eau à la parcelle réalisables par la modernisation des systèmes d'irrigation. Irstea, pp.149

⁴²⁵ Les estimations ont pu être réalisées via le modèle Irré-Lis, propriété d'Arvalis, faisant le bilan entre les entrées et les sorties d'eau dans le sol (expérimentations menées entre 2004 et 2023 sur cinq grandes cultures irriguées, pour lesquelles dates de semis et climats étaient amenés à varier. Le détail est livré à l'annexe 6.

⁴²⁶ <https://www.perspectives-agricoles.com/conduite-de-cultures/modelisation-des-besoins-en-eau-combien-consomment-les-cultures>

⁴²⁷ <https://www.aspexit.com/gestion-de-leau-et-technologies-numeriques-en-agriculture/>

principalement à l'énergie nécessaire à son pompage. Cette logique d'irrigation déficitaire est déjà identifiée et commence à monter en puissance dans les filières viticoles et arboricoles⁴²⁸.

Le déploiement de formes collectives

D'autre part, les schémas collectifs d'innovation et de gestion matérielle (type CUMA d'irrigation) pourrait constituer un levier intéressant pour faciliter la transition vers des systèmes agricoles sobres en eau et adaptés aux contraintes territoriales⁴²⁹. Ces formes mutualisées auraient une réelle pertinence pour les exploitations ayant recours à de l'irrigation d'appoint et ciblée sur les séquences critiques du point de vue de la phénologie des cultures présentes.

c. Cultures sobres en eau

Un premier axe de développement concerne la sélection génétique de variétés moins gourmandes en eau et/ou plus résilientes aux stress hydriques, ou permettant des stratégies d'esquive par une précocité demandant des besoins en eau décalés par rapport aux périodes de faible disponibilité. C'est un front de recherche contribuant à la séquence actuelle de réévaluation des critères de performance d'une variété. A cela s'ajoute la possibilité d'importer du matériel végétal issu de régions plus chaudes et/ou plus arides. C'est une piste prometteuse au regard de l'évolution attendue des aires biogéographiques françaises à horizon 2050 (voir partie II.2.D.), qui sera conduira à une aridité renforcée pour certains territoires (Occitanie, région PACA, etc.).

Une réponse plus transformationnelle consiste à substituer des cultures à forte consommation d'eau (maïs, pommes de terre, etc.) par des cultures qui en réclament relativement peu et/ou affichent une tolérance supérieure à la sécheresse (tournesol, sorgho, etc.). Des cultures nouvelles commencent ainsi à être envisagées dans le Sud de la France, comme par exemple le niébé : cette légumineuse cultivée actuellement en Afrique centrale et de l'Ouest affiche de faibles besoins en eau, une forte résilience aux stress hydriques et d'autres co-bénéfices intéressants (effet fertilisant, richesse en protéines et en micronutriments essentiels, etc.)⁴³⁰. Des essais de plantation de cépages de vigne en provenance du bassin méditerranéen (Sud Italie, Sardaigne, Liban) sont également en cours.

Ces pistes impliquent de penser l'insertion des nouvelles cultures dans l'assolement des exploitations, mais aussi de penser une stratégie de valorisation commerciale et la structuration de débouchés et filières associés.

d. Stockage de l'eau en surface

Concernant le stockage de l'eau en surface, la variabilité des problématiques d'un territoire à l'autre impose d'appuyer les politiques publiques sur une approche scientifique qui documente systématiquement et rigoureusement les enjeux et les recommandations à mettre en œuvre dans chaque territoire, avec une gouvernance locale des usages. Les spécialistes (hydrogéologues, agronomes des sols, etc.) insistent sur la nécessité d'adosser les futurs projets de retenues d'eau à des engagements de transition vers des pratiques économes en eau et inscrites dans de l'irrigation de résilience (cultures sobres, pratiques agroécologiques...). Ces exigences, décidées dans un cadre collectif et multi-acteurs, pourraient être une base intéressante pour défendre la pertinence de systèmes irrigués à l'avenir, et assurer par là même leur résilience.

D. Leviers de résilience socio-économique

Au-delà des leviers de transition (atténuation et/ou résilience "physiques" présentés ci-dessous), des leviers de résilience socio-économique des fermes ont été identifiés, permettant de viser une meilleure prospérité des acteurs économiques et du secteur.

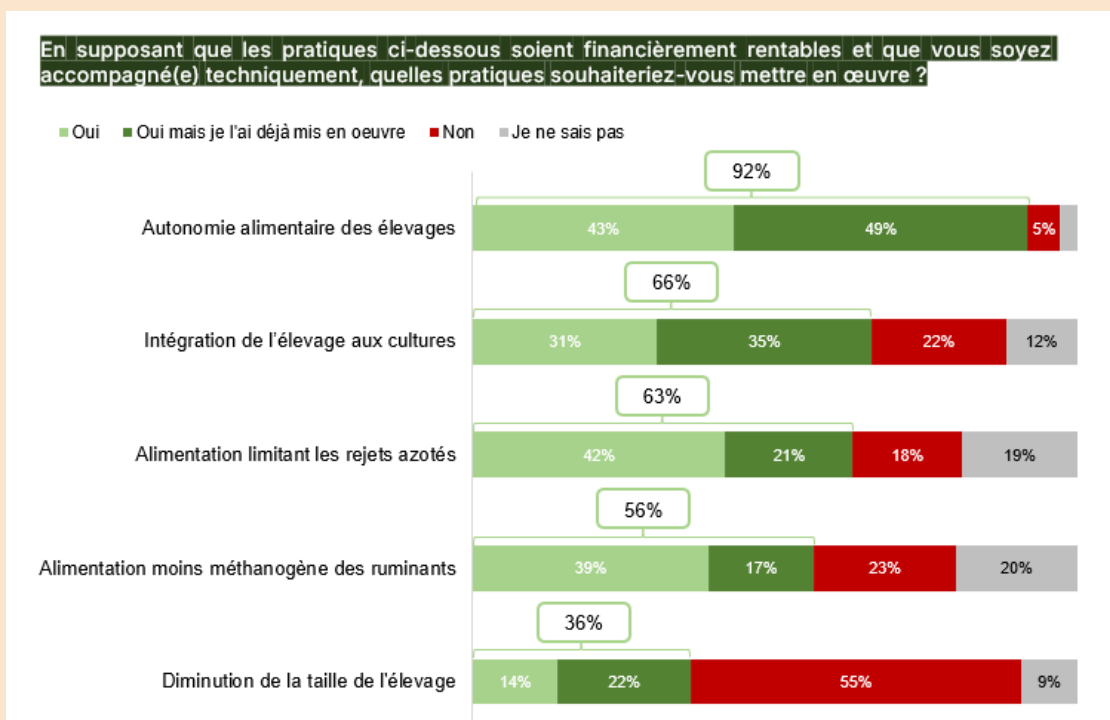
⁴²⁸ Ibid.

⁴²⁹ Devienne S., 2022, De l'eau pour qui et pour quoi ? Rôle de l'irrigation dans l'évolution de l'agriculture et les systèmes de production actuels dans différents territoires du bassin Adour-Garonne. Sud-Ouest Européen.

⁴³⁰ <https://lemag.ird.fr/fr/le-niebe-une-alternative-pour-la-souverainete-alimentaire-des-pays-dafrique-subsaharienne>

La transition vers des systèmes “autonomes et économes” est notamment un levier de résilience socio-économique significatif, fondé sur les gains de valeur ajoutée à l’échelle des fermes. Les difficultés économiques rencontrées par les agriculteurs, liées notamment à l’évolution défavorable des prix des produits agricoles face à ceux des intrants, des services et des équipements et à l’érosion continue de la part de la valeur ajoutée dans le produit brut depuis les années 1970 (voir partie I.2), ne facilitent pas le déploiement d’innovations. **C’est pourtant précisément sur la base du concept de valeur ajoutée⁴³¹ que certains spécialistes de l’économie agricole appellent à repenser les systèmes agricoles⁴³².** En effet, sur le demi-siècle écoulé (1970-2020), les logiques de développement agricole se sont révélées particulièrement gourmandes en intrants et en équipements. Principalement d’ordre énergétique (engrais minéraux, carburants fossiles, eau d’irrigation...), ces derniers ont été mobilisés à des fins de sécurisation du rendement, mais leur utilisation croissante a entraîné une hausse des consommations intermédiaires et, par extension, une baisse mécanique de la valeur ajoutée des exploitations.

Garantir une résilience socio-économique aux agriculteurs est un point clé, 81 % de ces derniers citant un frein d’ordre financier pour ne pas s’engager ou accélérer leur transition, et 87 % posant une condition financière⁴³³.



La valeur ajoutée, au sens économique, mesure la richesse créée au cours du processus de production agricole, excluant ainsi toutes les richesses exogènes et détruites au cours de ce même processus de production. En cela, elle permet de mesurer l’efficacité économique du système de production mis en œuvre au sein de l’exploitation. Les subventions sont également écartées du calcul puisqu’elles relèvent de richesses injectées et non produites par l’agriculteur. Sur cette base, plusieurs travaux⁴³⁴ ont considéré qu’une priorité pour l’agriculture de demain pourrait être de miser sur une réduction des consommations intermédiaires et des

⁴³¹ Pour rappel, Valeur Ajoutée = Produit brut (valeur des productions) – consommations intermédiaires (biens et services consommés et détruits de manière annuelle) – consommation moyenne de capital fixe

⁴³² Devienne S. et al., 2017, Les systèmes autonomes et économes pour répondre aux enjeux d’aujourd’hui », Ministère de la Transition écologique et solidaire, Commissariat général au développement durable

⁴³³ Résultats de la Grande Consultation des Agriculteurs 2024, <https://theshiftproject.org/article/resultats-grande-consultation-des-agriculteurs/>

⁴³⁴ Devienne S. 2018. Les révolutions agricoles contemporaines en France. In Chouquer, G., & Maurel, M. (Eds.), *Les mutations récentes du foncier et des agricultures en Europe*. Presses universitaires de Franche-Comté

équipements afin d'améliorer la valeur ajoutée des exploitations, et par extension, la prospérité des actifs agricoles.

En la matière, l'une des options suggérées est la transition vers des systèmes qualifiés d' « autonomes et économes en intrants » qui visent « *au-delà d'une simple autonomie fourragère, protéique ou alimentaire, à réduire leurs coûts, en particulier les consommations intermédiaires et de capital fixe, quitte à modérer le produit brut par actif ou par unité de surface, mais en accroissant la part qui en est conservée* »⁴³⁵. De manière plus concise, les systèmes désignés se sont inscrits dans une double quête d'autonomie et de réduction d'intrants, fondée sur le pâturage de prairies temporaires composées d'association graminées – légumineuses. Cette stratégie semble avoir plutôt bien fonctionné pour les élevages herbagers inscrits dans cette logique⁴³⁶.

Mais, au-delà du monde de l'élevage, cette approche est reprise dans d'autres filières, notamment pour les producteurs en grandes cultures inscrits ou désirant s'inscrire dans des démarches à bas niveau d'intrants. À cet égard, le principe des systèmes autonomes et économes est que **la génération de valeur ajoutée se situe dans le degré d'autonomie et de sobriété acquis**, à ceci près qu'il faut être parvenu à sauvegarder des niveaux de rendements suffisamment élevés (baisse moyenne des rendements comprise entre 10 et 15 % pour les systèmes autonomes et économes matures par rapport aux systèmes conventionnels⁴³⁷). Pour cela, il faut que les économies d'intrants et d'agroéquipements réalisées s'effectuent en lien avec une reconfiguration du système agricole afin de s'appuyer au maximum sur les mécanismes de régulation biologique. En phase avec les éléments cités dans l'encadré (« *Biodiversité, un facteur de stabilité et de productivité pour les agroécosystèmes* ») en II.4, il s'agirait ici de concevoir son assolement, ses pratiques au champ et son paysage de manière à faciliter l'expression de processus biologiques protecteurs, et plus globalement, vecteurs de résilience pour son exploitation (présence accrue d'auxiliaires de cultures pour la lutte biologique et/ou les besoins de pollinisation, haut degré de diversité cultivée au regard des stress biotiques...)⁴³⁸ ; l'idée sous-jacente étant que le recours à ces régulations biologiques permette de faire de substantielles économies d'intrants, tout en rendant le système plus résilient face aux aléas climatiques et économiques.

Dans la pratique, ces systèmes autonomes et économes de distinguent ainsi par des rotations de longue durée, marquées par une grande diversité d'espèces cultivées aux propriétés complémentaires et adaptées à leurs conditions pédoclimatiques : céréales, légumineuses, plantes sarclées ou nettoyantes (chanvre, sarrasin, etc.). Cette logique s'applique aussi bien aux systèmes d'élevage de ruminants privilégiant le pâturage de prairies temporaires d'association, équilibrées en graminées et en légumineuses, qu'aux systèmes de grandes cultures. Ces derniers poursuivent simultanément trois priorités : une couverture permanente des sols (plantes de couverture en interculture pour le piégeage des nitrates, la fixation symbiotique d'azote, l'exploration d'horizons profonds du sol, l'amélioration de la structure du sol, la production d'une grande quantité de biomasse à incorporer dans le sol,...), le maintien d'une forte diversité spécifique et génétique (diversité intraspécifique au travers des mélanges variétaux) et le maintien d'un haut degré de complexité paysagère (haies, bandes mellifères, agroforesterie, etc.). Ces logiques de fonctionnement, favorables à une baisse des consommations intermédiaires et des investissements matériels fixes, sont susceptibles d'accroître la valeur ajoutée des exploitations tout en améliorant leur bilan environnemental.

Toutefois, la bascule vers un système autonome et économe, dont la conception se fonde sur des spécificités pédoclimatiques (et donc pour lequel tous les contextes ne se valent pas), n'est pas exempte d'incertitudes et d'une longue phase de mise au point. L'expérience montre que les démarches collectives sont particulièrement efficaces car il s'agit bien de concevoir des systèmes de production adaptés

⁴³⁵ <https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/Ana126/analyse1261808.pdf>

⁴³⁶ Garambois N. et Devienne S. 2012. Les systèmes herbagers économes. Une alternative de développement agricole pour l'élevage bovin laitier dans le Bocage vendéen ? », *Économie rurale*, 330-331.

⁴³⁷ Charroin P. et al., 2012, Productivité du travail et économie en élevages d'herbivores: définition des concepts, analyse et enjeux. INRA Productions Animales, 25 (2), pp.193-210.

⁴³⁸ Lin et al., 2011, Resilience in agriculture through crop diversification: adaptive Management for Environmental Change. *Bioscience* 61, pp. 183–193.

aux conditions spécifiques des agriculteurs, ce qui nécessite un changement de paradigme aussi pour la recherche (conception down-top et non plus top-down), l'agriculteur devenant un paysan-chercheur⁴³⁹.

Les micro-fermes maraîchères : des modèles en faveur de la résilience et de la biodiversité

En maraîchage diversifié, les modèles de fermes organisés selon les concepts de la permaculture⁴⁴⁰ reposent sur un très faible niveau de motorisation en organisant la production de façon intensive sur de petites surfaces : une fois installés (avec parfois un apport initial massif de MO en provenance de l'extérieur pour agrader rapidement le sol), ils fonctionnent avec très peu d'énergie fossile, sans intrant de synthèse et avec une consommation d'eau économe grâce au paillage. Ils sont en revanche exigeants en main d'œuvre.

Basés sur une très grande diversité cultivée, ils profitent à la biodiversité et font preuve d'une grande résilience. Positionnés sur des circuits courts, leur rentabilité économique est cependant conditionnée aux débouchés locaux et à une commercialisation efficace, pas forcément reproductible dans tous les contextes. Selon ses concepteurs, **les principes de la permaculture appliqués à la production agricole visent à créer un « système intégré et évolutif d'espèces végétales et animales pérennes, ou s'auto-pérennisant, utiles à l'homme⁴⁴¹»**. Créée notamment en réponse à la pénurie annoncée des énergies fossiles, la permaculture repose sur une éthique : « Prendre soin de la terre, prendre soin des hommes, partager équitablement », proche des principes de développement durable, et est complétée, pour le design des plantations et de la ferme, par des principes de conception pratiques, tels que « Capter et stocker l'énergie, Intégrer plutôt que ségréguer ». Elle concerne principalement un réseau de petites fermes (voir par exemple la carte du réseau Fermes d'Avenir).

Des travaux de recherche menés à la Ferme du Bec Hellouin⁴⁴² en Normandie explorent en particulier **l'intérêt technico-économique de l'installation de forêts-jardins⁴⁴³**, formes d'agroforesterie rassemblant arbres fruitiers, buissons à baies, légumes, plantes médicinales et aromatiques, mais aussi ligneux pour le bois d'œuvre et de chauffage, en grande densité par unité de surface, qui stockent du carbone naturellement. La culture de céréales jardinées, offrant des rendements intéressants sans recours à la mécanisation, est également étudiée depuis plusieurs années dans un objectif de recherche de solutions de résilience alimentaire. L'attention y est portée notamment à la comparaison de l'énergie nécessaire à la culture de céréale jardinée par rapport à une culture de plein champ⁴⁴⁴.

⁴³⁹ André Pochon : Agronomes et paysans : un dialogue fructueux, Sciences en Question, Quae

⁴⁴⁰ <https://hal.science/tel-02801554/>

⁴⁴¹ Mollison B. et Holmgren D., Permaculture one, Tagari, 1978

⁴⁴² <https://www.fermedubec.com/la-ferme/la-recherche/>

⁴⁴³ https://www.fermedubec.com/wp-content/uploads/sites/8/2024/10/RAPPORT_SCIENTIFIQUE_IFBH_2023-2024_011024.pdf

⁴⁴⁴ https://www.fermedubec.com/wp-content/uploads/sites/8/2023/12/PROGRAMME_RECHERCHE_2022_061223_BDEF.pdf

5. Pratiques stockantes : augmenter le stock agricole de carbone et favoriser la résilience des systèmes

Si la production agricole émet des gaz à effet de serre, c'est aussi l'un des rares secteurs à pouvoir stocker naturellement du carbone, dans les sols et la biomasse ligneuse, via le processus naturel de la photosynthèse, à condition d'en préserver les sols pour y maintenir les stocks existants et d'y développer les pratiques adéquates pour accroître les puits de carbone. Le stockage de carbone additionnel dans les sols agricoles est en effet réversible (et sensible aux évolutions climatiques) et temporaire (jusqu'à l'atteinte d'un nouvel état d'équilibre). Ces pratiques peuvent dans le même temps accroître la fertilité des sols, la biodiversité des espaces cultivés et, plus globalement, la résilience des systèmes. La préservation de sols fertiles et/ou leur régénération doit constituer une priorité.

A. Des leviers pour préserver et augmenter les stocks de carbone dans les sols et la biomasse ligneuse

La préservation des surfaces agricoles, en particulier lorsqu'elles ne sont pas travaillées, ainsi que des pratiques agricoles adéquates et le maintien ou l'implantation d'éléments ligneux dans les parcelles contribuent à maintenir les stocks existants ou à augmenter les puits de carbone agricoles.

- **Maintien des stocks de carbone existants** : lutte contre l'artificialisation des sols, préservation des prairies permanentes, enherbement des cultures pérennes, maintien des linéaires de haies, des arbres isolés sur parcelles agricoles.
- **Augmentation du puits de carbone agricole** : généralisation des couverts végétaux et plus généralement de l'agriculture de conservation des sols, déploiement de l'agroforesterie (plantation de végétaux ligneux, arbres et haies), plantation de vergers, augmentation de l'utilisation de ressources fertilisantes organiques, introduction de prairies temporaires dans les rotations de cultures annuelles.

Le biochar : potentiel et limites

Le biochar, un matériau carboné, offre un large éventail d'applications, notamment en agriculture et dans l'industrie. Il est valorisé pour ses bénéfiques potentiels, comme l'amélioration de la fertilité des sols et la séquestration du carbone, tout en étant sujet à des risques et des défis spécifiques liés à sa production et à son utilisation.

Production et stockage du biochar

Le biochar est produit par pyrolyse, processus de décomposition thermique de la biomasse en l'absence d'oxygène. Ce procédé génère trois produits : le biochar (solide), la bio-huile (liquide) et le syngaz (gaz). Les rendements en biochar et en autres produits varient selon la température de pyrolyse, la technologie, le type de biomasse et la durée du processus. Sur le plan énergétique, la production de biochar est un processus énergivore. Cependant, cette consommation peut être partiellement compensée par la récupération des gaz produits lors de la pyrolyse.

Le stockage du biochar pose également des défis logistiques. En raison de son potentiel d'auto-inflammation, des mesures spécifiques sont requises pour limiter le contact avec l'oxygène, augmentant ainsi les coûts de transport et de stockage. Une installation industrielle de pyrolyse doit par exemple surveiller en permanence la température du biochar stocké, sous peine de combustion spontanée.

Applications du biochar

L'un des usages les plus répandus du biochar est l'amendement du sol pour améliorer la rétention d'eau, la porosité et la disponibilité des nutriments. Toutefois, les effets varient en fonction du type de sol (en particulier du pH et de la texture) et du climat. Le biochar peut également réduire les émissions de GES des

sols, en particulier le CH₄ et N₂O. Cependant, des études menées dans des rizières montrent des résultats contrastés, allant d'une réduction significative des émissions à une augmentation substantielle, ce qui souligne l'importance de l'adapter aux conditions locales.

Outre l'agriculture, le biochar trouve des applications dans l'industrie, par exemple pour la purification de l'eau et des gaz, car il est un adsorbant efficace pour capturer les métaux lourds tels que le plomb et les polluants organiques, ou encore dans la construction où il est utilisé comme additif dans les matériaux de construction (béton) pour améliorer la résistance des matériaux tout en réduisant leur empreinte carbone. Ces utilisations restent limitées par la complexité technique et les coûts de mise en œuvre des systèmes de récupération et d'intégration du biochar dans les procédés industriels.

Séquestration du carbone et impacts environnementaux

Le biochar est valorisé pour sa capacité à séquestrer du carbone de manière durable. Il peut persister dans les sols pendant des siècles et son potentiel de séquestration est estimé de 1 à 3 Gt par an à l'échelle mondiale selon différentes études. Cependant, ce potentiel dépend fortement des pratiques de production et de la biomasse utilisée.

Le biochar peut également contribuer à l'amélioration de la qualité de l'eau en réduisant la lixiviation des nutriments et en stabilisant les métaux lourds dans le sol. Toutefois, son application peut aussi avoir des effets négatifs sur la biodiversité des sols, notamment en modifiant la densité apparente des sols et en perturbant les communautés d'invertébrés.

Défis et perspectives économiques

En France, la disponibilité de certaines biomasses, telles que les effluents d'élevage ou les bois forestiers, est déjà fortement concurrencée par d'autres utilisations comme la méthanisation, le compost ou la fertilisation brute. Cela limite l'accès à ces matières premières pour la pyrolyse et pousse les producteurs de biochar à se tourner vers des biomasses moins nobles, comme les déchets de bois de classe B ou des lots contaminés. Ces dernières sont souvent moins adaptées pour la production de biochar de qualité, ce qui impacte la valorisation économique et agronomique du produit final.

En l'état actuel des technologies, les coûts de production du biochar varient considérablement, allant de environ 50 à 650 €/tonne, selon le procédé de pyrolyse et la biomasse utilisée. De plus, les défis logistiques liés au transport et au stockage sécurisé du biochar représentent des freins majeurs.

Les caractéristiques finales du biochar, telles que la porosité et la capacité d'échange cationique, dépendent fortement du type de biomasse et des conditions de pyrolyse. Par exemple, les biochars produits à basse température (< 400 °C) améliorent la fertilité des sols en augmentant la rétention d'eau et la disponibilité des nutriments. En revanche, ceux issus de hautes températures (> 500 °C) offrent une meilleure stabilité à long terme dans le sol, mais avec des effets moindres sur la rétention d'eau et la capacité d'échange cationique. Ainsi, le choix de la température de pyrolyse doit être aligné sur les objectifs spécifiques : stabilisation du carbone ou amélioration de la fertilité des sols.

Le biochar possède donc un potentiel intéressant pour améliorer les sols et séquestrer du carbone, mais ses effets varient en fonction de nombreux facteurs, tels que le type de sol, le climat et sa qualité. Cette variabilité rend difficile la généralisation des résultats, chaque biochar nécessitant une évaluation spécifique. Bien qu'il puisse apporter des avantages importants, notamment pour la structure des sols, ses limites, comme les coûts de production et les risques liés à son stockage, doivent être pris en compte pour en optimiser l'utilisation à grande échelle.

B. Un potentiel de stockage de carbone significatif sous réserve de préserver les stocks existants et de développer massivement des pratiques stockantes additionnelles

Les différents travaux présentés ci-dessous mentionnent des potentiels de stockage en carbone et/ou en équivalent CO₂. Il est rappelé que 1 kg de CO₂ contient 0,2727 kg de carbone seul. « 1 kg de carbone stocké » correspond donc à « 3,67 kg de CO₂e stockés ».

Un potentiel de stockage additionnel dans les sols agricoles significatif

Des travaux quantifiant les impacts de la mise en oeuvre de neuf pratiques stockantes⁴⁴⁵, sur une période de 30 ans, sous climat et concentration en CO₂ actuels, sans modification de l'occupation des sols et sans transformation structurelle des exploitations agricoles, mettent en avant un potentiel de stockage additionnel annuel de + 1,8 ‰ tous usages du sol confondus (agriculture et forêt), de **+ 3,2 ‰ pour les surfaces agricoles seules**. L'essentiel du potentiel de stockage additionnel se situe en sols de grandes cultures, où il pourrait dépasser la cible des 4 pour 1000 (+ 5,1 ‰), ce qui est en grande partie dû au fait que les stocks hérités y sont bas. À noter, concernant les forêts, qu'aucune pratique « plus stockante » n'a été identifiée par rapport aux pratiques actuelles.

En ajoutant le stockage tendanciel et le stockage additionnel permis par l'adoption de pratiques plus stockantes, il serait possible d'atteindre un stockage total se situant entre + 1,8 et + 5 ‰ pour l'ensemble des sols agricoles et forestiers.

Atteindre un objectif global moyen de + 4 ‰ n'est pas exclu, mais nécessiterait :

- de maintenir les surfaces et pratiques favorables présentant un stockage tendanciel positif (forêts et prairies permanentes),
- de mettre en oeuvre l'ensemble des pratiques stockantes sur la totalité de leur assiette technique en grandes cultures et prairies, ce qui est très ambitieux,
- de stopper les changements d'usage du sol qui réduisent les stocks (retournement des prairies et artificialisation des terres agricoles).

⁴⁴⁵ <https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/4pM-Synth%C3%A8se-Novembre2020.pdf>

	Stockage additionnel par ha d'assiette Horizon 0-30 cm kgC/ha/an	Assiette Mha	Stockage additionnel France entière Horizon 0-30 cm MtC/an	Stockage additionnel, rapporté au stock du mode d'occupation du sol correspondant %/an
En grandes cultures et prairies temporaires				
Extension des cultures intermédiaires	+126	16,03	+2,019	
Semis direct	+60	11,29	+0,677	
Nouvelles ressources organiques	+57	1,46	+0,084	
Insertion et allongement de prairies temporaires	+127	6,63	+0,840	
Agroforesterie intraparcellaire	+207	5,33	+1,103	
Haies	+17	8,83	+0,150	
Total grandes cultures			+4,873 (85,6%)	+5,1
En prairie permanente				
Intensification modérée	+176	3,94	+0,694	
Remplacement fauche-pâturage	+265	0,09	+0,023	
Total prairies permanentes			+0,717 (12,6%)	+0,9
En vignoble				
Enherbement	+182	0,56	+0,103	
Total vignoble			+0,103 (1,8%)	+3,7
En forêt				
Pas de pratique plus stockante que les pratiques actuelles identifiées	-	-	-	-
Total forêt			-	-
Total France (hors surfaces artificialisées et divers)			5,693 (100%)	+1,8

Figure 45 : Stockage additionnel de carbone associé à 9 pratiques stockantes

Source : Inrae⁴⁴⁶

Des potentiels de stockage additionnel plus élevés dans les systèmes de grandes cultures

- Les systèmes de **grandes cultures**, du fait de stocks initiaux relativement bas, concentrent l'essentiel du potentiel de stockage additionnel (**85,6 % du potentiel total**).
- Les surfaces de **prairies permanentes** présentent des potentiels de stockage additionnel plus faibles (**12,6 % du total**), du fait de stocks initiaux plus élevés, et d'une assiette modeste pour les pratiques stockantes étudiées (frein au remplacement de la fauche par du pâturage en lien avec le besoin de constituer des réserves fourragères hivernales).
- L'enherbement des **vignobles** présente un potentiel de stockage additionnel unitaire significatif en vignoble (+ 182 kgC/ha/an), mais faible à l'échelle de la France entière (**1,8 % du total**) du fait des faibles surfaces concernées.

Cultures intermédiaires, agroforesterie et prairies temporaires : les pratiques ayant les plus forts potentiels de stockage additionnel dans les sols

Les pratiques avec les plus forts potentiels de stockage sur l'horizon 0-30 cm sont, par potentiel de stockage additionnel décroissant, les suivantes⁴⁴⁷ :

- **l'extension des cultures intermédiaires** (36 % du potentiel total),
- **l'agroforesterie intraparcellaire** (20 % du potentiel total),
- **l'insertion et l'allongement du temps de présence des prairies temporaires** dans les rotations (13 % du potentiel total).

⁴⁴⁶ <https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/4pM-Synth%C3%A8se-Novembre2020.pdf> p91

⁴⁴⁷ <https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/4pM-Synth%C3%A8se-Novembre2020.pdf>

Il est à noter que la pratique du **semis direct** permet un stockage additionnel dans l'ensemble de l'horizon labouré, mais, du fait de la redistribution verticale du carbone, est neutre sur l'ensemble du profil.

Par ailleurs, la mobilisation de **nouvelles ressources organiques** (les effluents d'élevage et certains autres produits résiduaux organiques sont déjà apportés au sol mais d'autres gisements de produits résiduaux organiques d'origine agricole, industrielle ou issus de déchets urbains actuellement incinérés ou mis en décharge pourraient, sous réserve de leur innocuité, être collectés et épandus sur des parcelles agricoles) ne représente que 1,5 % du potentiel de stockage additionnel total. Les hypothèses à ce sujet sont à ce stade prudentes car elles tiennent compte des réticences au recyclage agricole de certaines ressources telles que les boues de stations d'épuration.

L'agroforesterie : recomplexifier les paysages en associant arbres et agriculture

L'agroforesterie recouvre l'ensemble des pratiques agricoles qui associent, sur une même parcelle, des arbres (sous toutes leurs formes : haies, alignements, bosquets, etc.) à une culture agricole et/ou de l'élevage. Elle cherche, comme plus largement la couverture végétale des sols, à assurer un équilibre naturel et fonctionnel du système agricole à travers la diversification, l'étagement des cultures et un maximum de complémentarités entre les différents « compartiments » de l'écosystème (sol, plantes, animaux, atmosphère).

Les systèmes agroforestiers sont ancestraux et présents partout dans le monde. En Europe, malgré la standardisation des pratiques agricoles et le remembrement de la deuxième moitié du XX^{ème} siècle, certains systèmes agroforestiers traditionnels se sont maintenus : bocages, pré-vergers, cultures intercalaires en vergers fruitiers, vignes complantées... Aujourd'hui de nouveaux systèmes agroforestiers sont en cours de développement et visent à suivre, en la maîtrisant, la tendance naturelle des sols à se couvrir de plantes toujours plus grandes et diversifiées, et à maintenir, notamment après les récoltes, une couverture végétale suffisante pour que les sols restent stables, fertiles et en capacité de produire. En termes agronomiques, l'agroforesterie s'inspire du fonctionnement autonome de la forêt et de la prairie.

Il existe une multiplicité de systèmes agroforestiers contemporains⁴⁴⁸ : agroforesterie en grandes cultures, sylvopastoralisme, verger maraîcher, parcours arboré pour les volailles, agroforesterie et vignes, jardin forêt, pré-verger... La sélection des arbres dépend des conditions pédoclimatiques de la parcelle à aménager et des objectifs techniques et économiques de l'agriculteur : alignements d'arbres monospécifiques (en association noyers-grandes cultures, peupliers-grandes cultures) ou association de plusieurs essences en mélange (mélange d'arbres forestiers et d'arbustes et/ou de fruitiers). Il existe de plus une multitude d'aménagements agroforestiers (haies, alignements intraparcels, bosquets, etc.) et une diversité de modes de gestion des arbres (arbres de haut jet, taillis, arbres têtards, etc.). Autant d'éléments permettant de diversifier les productions (bois d'œuvre, bois énergie, etc.) et l'identité paysagère des fermes.

⁴⁴⁸ <https://www.agroforesterie.fr/systemes-agroforestiers/>

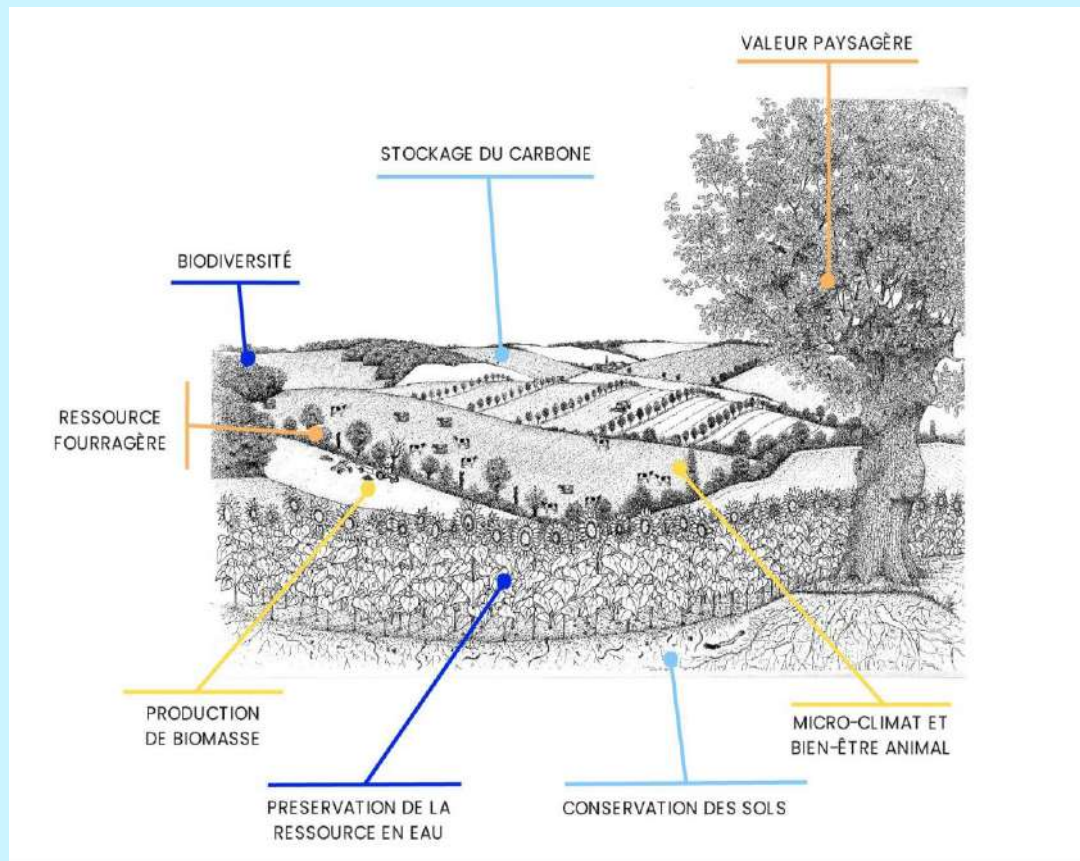


Figure 46 : Services écosystémiques de l'agroforesterie

Source : Association Française d'Agroforesterie - ©David Dellas

L'agroforesterie apporte des bénéfices multiples, allant dans le sens de la durabilité et de la résilience des systèmes de production agricole.

Climat : capture de CO₂, libération d'oxygène, stockage de carbone dans leur biomasse (bois, racines), favorisation de la séquestration du carbone dans les sols, formation d'une barrière naturelle, protection contre le vent et amortissement des extrêmes climatiques.

Eau : régulation du cycle de l'eau, amélioration de l'infiltration et recharge de la réserve utile du sol, réduction du ruissellement, limitation des pertes par évaporation, filtration de pollutions...

Sol : enrichissement du sol en matière organique, la présence d'arbres et de haies permettant de capter davantage de lumière et d'amplifier la photosynthèse.

Biodiversité : structuration d'habitats semi-naturels pouvant abriter une faune et une flore diversifiées, fourniture de ressources alimentaires pour la biodiversité grâce à l'échelonnement des cycles de végétation et des floraisons, maintien d'une trame écologique, évolutive dans l'espace et dans le temps.

Bien-être animal : protection des animaux d'élevage contre le vent, apport d'ombre, fourniture de fourrages diversifiés (arbres fourragers).

Source : Association Française d'Agroforesterie

Un bilan sur l'ensemble des compartiments de stockage et des GES en faveur de l'agroforesterie, des haies et des prairies temporaires

Le bilan de GES complet des pratiques étudiées, qui permet en effet d'intégrer les modifications d'émissions liées à l'adoption de pratiques stockantes, **met en avant l'intérêt des leviers « agroforesterie intra-parcellaire », « haies » et « prairies temporaires »**, notamment du fait du stockage de carbone dans la

biomasse pour l'agroforesterie et les haies. Il nuance fortement l'intérêt de l'intensification modérée des prairies extensives, du fait des émissions de N₂O supplémentaires liées à l'usage d'engrais azotés.

Le calcul du potentiel de stockage de carbone associé à la présence ou à la plantation d'arbres (agroforesterie intra-parcellaire et haies) inclut en effet trois compartiments : la biomasse aérienne, la biomasse racinaire et le sol. **Le stockage dans la biomasse aérienne (ligneuse), intégré dans les bilans de GES réalisé par ces études, est notamment significatif : 80 % du stockage total pour l'agroforesterie, et 93 % du stockage total pour les haies.**

Agroforesterie intra-parcellaire :

- La synthèse de 25 références analysées dans le rapport « 4 pour 1000 » dans des conditions proches des conditions françaises indique un taux moyen de stockage additionnel dans les sols de 250 kgC/ha/an, avec un intervalle de confiance à 95 % compris entre - 230 et + 730 kgC/ha/an.
- En prenant en compte le stockage additionnel moindre dans les rotations avec prairie temporaire, la moyenne nationale de stockage associée à l'agroforesterie est estimée à **207 kgC/ha/an soit 759 kgCO₂e/ha/an.**
- Le bilan de GES réalisé sur l'agroforesterie intra-parcellaire met en avant un potentiel encore plus favorable de cette pratique, grâce au stockage dans la biomasse ligneuse qui s'ajoute au stockage de carbone dans le sol avec une **part très significative du stockage dans le compartiment aérien, à hauteur de 3,3 tCO₂e/ha/an.**

L'agroforesterie présente donc un potentiel de stockage majeur dans la biomasse ligneuse : le stockage dans ce compartiment représente 80 % du stockage de carbone total (3,3 tCO₂e/ha/an sur un total stocké de 4 tCO₂e/ha/an).

En kg CO ₂ e/ha/an						En kg C/ha/an	
Emissions N ₂ O directes et indirectes	Emissions CO ₂ directes	Emissions CO ₂ induites	Stockage de carbone dans la biomasse	Stockage de carbone dans le sol	Bilan global	Stockage de carbone dans le sol	Bilan global
-118	-6	-450	-3 300	-759	-4 633	-207	-1 260

Tableau 8 : Bilan de GES de l'agroforesterie intra-parcellaire

Source : Inrae⁴⁴⁹

Haies

- La synthèse des 12 références analysées dans le rapport « 4 pour 1000 » permet de retenir un stockage additionnel dans les sols de **750 kgC/ha de haie/an** (soit sur 2,4 à 3,4 % de la surface des parcelles), avec un intervalle de confiance compris entre 490 et 1 020 kgC/ha/an pour les haies implantées sur des parcelles cultivées. Ces chiffres correspondent à une profondeur moyenne de 39 cm, une densité moyenne de 739 arbres/km, et à un âge moyen de 27 ans. Pour les haies plantées en périphérie de prairies permanentes, l'effet sur le carbone du sol apparaît négligeable.
- En tenant compte des surfaces respectives en grandes cultures pures et en rotations associant grandes cultures et prairies temporaires⁴⁵⁰, cela aboutit à un stockage additionnel moyen de **+ 17 kgC/ha de SAU/an soit 61 kg CO₂e/ha SAU /an.**
- Comme dans le cas de l'agroforesterie intra-parcellaire, le bilan de GES global est nettement amélioré du fait du stockage de carbone dans la biomasse et de sa valorisation partielle sous forme de bois

⁴⁴⁹ <https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/4pM-Synth%C3%A8se-Novembre2020.pdf>

⁴⁵⁰ En considérant qu'une haie de 2 m de large est associée à une bande enherbée de 3 m de large, le stockage additionnel dans les sols est estimé à 650 kgC/ha de haie/an, soit en moyenne 20 kgC/ha/an, en grande culture pure, et à 220 kgC/ha de haie/an, soit en moyenne 6 kgC/ha/an, en rotation de grandes cultures avec prairie temporaire.

énergie, conduisant à une réduction des émissions induites par effet de substitution aux énergies fossiles. Le stockage dans la biomasse est estimé à **243 kg C/ha SAU/an soit 893 kg CO₂e/ha/an**.

Les haies en systèmes de grandes cultures présentent également, même si moins significatif à l'unité de surface, un potentiel de stockage majeur dans la biomasse ligneuse : le stockage dans ce compartiment représente 93 % du stockage de carbone total (893 kg CO₂e/ha/an sur un total stocké de 954 kg CO₂e/ha/an).

En kg CO ₂ e/ha/an						En kg C/ha/an	
Emissions N ₂ O directes et indirectes	Emissions CO ₂ directes	Emissions CO ₂ induites	Stockage de carbone dans la biomasse	Stockage de carbone dans le sol	Bilan global	Stockage de carbone dans le sol	Bilan global
-28	-8	-191	-893	-61	-1 182	-17	-322

Tableau 9 : Bilan de GES de l'implantation de haies (grandes cultures pures et rotations associant grandes cultures et prairies temporaires)

Source : Inrae⁴⁵¹

Au global, un potentiel de stockage de carbone additionnel total dans les sols de plusieurs dizaines de millions de tonnes CO₂e, encore plus significatif en intégrant le stockage dans la biomasse ligneuse

L'étude « 4 pour 1000 » fait état d'un potentiel de stockage additionnel dans les sols de **29,9 MtCO₂e/an sur une période de 30 ans**, calculé sur la totalité du profil de sol (excluant donc le semis direct), tenant compte des interactions d'assiette, et sur la base de la mise en œuvre de l'ensemble des 8 pratiques étudiées sur la totalité de leur assiette maximale technique.

D'autres travaux font état d'un potentiel de stockage de carbone additionnels dans les sols et la biomasse agricoles estimé entre 36 à 53,5 MtCO₂e par an sur une période de 30 ans, en fonction des conditions économiques considérées pour le déploiement de ces pratiques (prix du carbone entre 55 et 250 €/tCO₂e)⁴⁵². Cet écart de potentiel s'explique notamment par certaines différences quant aux pratiques considérées par rapport à l'étude « 4 pour 1000 » : le stockage dans la biomasse est pris en compte, la substitution du maïs fourrager est intégrée, l'extension des cultures intermédiaires est non seulement considérée dans l'espace mais aussi en termes de durée, enfin le déploiement des surfaces en agroforesterie et des linéaires de haies est plus ambitieux. Enfin, ces travaux mettent particulièrement en évidence la part significative du stockage dans la biomasse (estimée à 43 % du total) par rapport au stockage dans le sol (estimée à 48 %).

Ces estimations de potentiel de stockage mettent à nouveau en lumière le caractère **temporaire** (atteinte d'un état d'équilibre, ici considéré de 30 ans, au bout duquel la pratique ne permet plus de stocker du carbone additionnel), et **réversible** (la pratique doit être maintenue même après l'atteinte de cet état d'équilibre pour éviter un relargage du carbone stocké) du stockage de carbone par les systèmes agricoles. L'utilisation du bois des arbres agricoles en ameublement ou construction, et non en bois énergie, offre néanmoins des perspectives de séquestration à long terme du carbone stocké.

Ces calculs interrogent les objectifs de seulement 10 MtCO₂e retenus pour le puits de carbone agricole dans la SNBC2 qui propose en effet des hypothèses beaucoup plus prudentes en lien avec les freins socio-économiques à l'adoption de ces pratiques.

⁴⁵¹ <https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/4pM-Synth%C3%A8se-Novembre2020.pdf>

⁴⁵² <https://hal.inrae.fr/hal-03899905/document>

Couverture du sol et albédo : quel effet d'atténuation ?

Le réchauffement climatique lié aux activités agricoles dépend à la fois d'effets biogéochimiques (émissions de gaz à effet de serre, stockage de carbone), mais également de paramètres biogéophysiques, directement liés au forçage radiatif, tels que l'albédo et les flux de chaleur, dont les effets quantitatifs à l'échelle locale et globale sont cependant moins documentés à ce stade.

L'albédo, qui correspond à la fraction d'énergie solaire renvoyée vers l'atmosphère par rapport à l'énergie solaire incidente (ou « pouvoir réfléchissant de la surface »), fait en particulier l'objet d'études, à l'instar du stockage de carbone dans les sols, quant à son potentiel d'atténuation du changement climatique, puisqu'il est modifié par le type d'utilisation des terres. Sa valeur se situe entre 0 (toute la lumière est absorbée, cas de surfaces noires) et 1 (toute la lumière est réfléchie, cas de surfaces blanches).

Ainsi, l'effet biogéophysique de la couverture végétale des sols, dans les systèmes de grandes cultures et dans les prairies en particulier, pourrait être non négligeable dans le potentiel d'atténuation net des agroécosystèmes.

Les prairies, en raison de leur couverture permanente du sol, disposent d'une valeur d'albédo annuelle plus élevée que les cultures dont le cycle végétatif peut laisser des périodes où le sol est nu. La gestion des prairies et les modes d'élevage (à l'herbe ou non) affectent également directement l'albédo de surface qui évolue selon des pas de temps variables en fonction notamment des conditions météorologiques, des pratiques et de la croissance et de la structure des plantes : des résultats issus de mesures sur 7 prairies françaises montrent un effet plus ou moins important sur l'albédo : la fauche de refus a le moins d'impact, - 3,5 % pendant quelques jours, le pâturage, - 3,9 % en moyenne pendant 2 semaines, tandis que la fauche a un effet plus marqué, - 13,7 % pendant un mois. L'impact est transitoire et peut être limité sur l'effet refroidissant des prairies selon le moment de l'année où fauche et pâturage surviennent. Par rapport à un sol nu, le forçage radiatif des prairies est ainsi négatif, d'autant plus important en été (- 11,1 W/m²) du fait de la présence accrue de végétation et d'un rayonnement solaire plus élevé. Simulé à l'échelle d'exploitations, l'albédo moyen de l'assolement augmente avec la part de surfaces en herbe, montrant ainsi que les systèmes les plus herbagers ont un effet forçage radiatif favorable à l'atténuation du changement climatique, qui pourrait être accentué via l'adaptation des pratiques sur les prairies⁴⁵³.

D'autres travaux portant sur des **systèmes en grandes cultures** ont montré également **un effet positif induit par le non-labour et le maintien des pailles en surface**, qui permettrait d'augmenter l'albédo des parcelles d'environ 0,1⁴⁵⁴. Plus récemment, des études ont porté sur les effets conjoints, biogéochimiques et biogéophysiques associés à des changements de pratiques en grandes cultures. Des résultats *in situ* ont ainsi montré **l'effet des cultures intermédiaires, montrant qu'elles pouvaient accroître l'albédo de surface**, réduire les flux de chaleur et la température du sol et stocker du carbone, avec des coûts additionnels en termes d'émissions de GES liées aux opérations de semis et destruction négligeables⁴⁵⁵. D'autres études menées à l'échelle européenne via des données satellitaires couplées à de la modélisation ont montré que **l'effet albédo des cultures intermédiaires était en ordre de grandeur équivalent à leur effet stockage de carbone**⁴⁵⁶.

Des besoins en recherche importants sont identifiés sur différents axes : étudier l'albédo entre variétés d'une même espèce (où les écarts peuvent être de l'ordre de 20 %⁴⁵⁷) pourrait permettre d'aider au choix des cultures selon leur albédo à performances agronomiques équivalentes. Le potentiel d'atténuation via l'albédo des prairies est également un axe majeur de recherche : la production d'analyses à l'échelle des exploitations dans différentes conditions pédoclimatiques, et avec différents choix de systèmes de production de fourrage (tout à l'herbe, mixte, entièrement basé sur des cultures fourragères, avec ou sans cultures intermédiaires, etc.), devrait permettre d'orienter au mieux les décisions sur les pratiques d'élevage. Des projets de recherche (Albédo-Prairies, ClieNfarms, CASDAR ALBAATRE) doivent permettre de combler certaines de ces lacunes et visent à proposer l'intégration des processus biogéochimiques et biogéophysiques dans les stratégies d'atténuation, mais aussi d'adaptation, des systèmes agricoles⁴⁵⁸. Plus globalement, la diffusion de la notion d'albédo, bien connue des climatologues et glaciologues, pourrait ainsi être accentuée dans le monde agricole.

⁴⁵³ Mischler et al., « L'albédo, un levier d'atténuation du changement climatique méconnu: quel potentiel d'atténuation pour les prairies? »

⁴⁵⁴ Davin et al., « Preferential cooling of hot extremes from cropland albedo management ».

⁴⁵⁵ Ceschia et al., « La gestion de l'albédo des surfaces continentales ».

⁴⁵⁶ Lugato et al., « Maximising climate mitigation potential by carbon and radiative agricultural land management with cover crops ».

⁴⁵⁷ Ceschia et al., « La gestion de l'albédo des surfaces continentales ».

⁴⁵⁸ Ceschia et al., « La gestion de l'albédo des surfaces continentales ».

La pérennité du stockage de carbone dans les sols fait l'objet de débats scientifiques, notamment concernant la cinétique de minéralisation à court terme de matière organique fraîche ajoutée aux sols⁴⁵⁹. Par ailleurs, la capacité de stabilisation du carbone organique dans les sols dépend en partie de leurs propriétés intrinsèques et en particulier de leur teneur en argile. La capacité de stockage additionnel en dépend donc également et ce ne sont pas obligatoirement les sols présentant les plus faibles teneurs qui offrent le meilleur potentiel additionnel de stockage de carbone⁴⁶⁰, même si en moyenne en France c'est le cas notamment du fait du potentiel de déploiement important des couverts végétaux en grandes cultures.

C. Un impact modéré du changement climatique sur le stockage de carbone au niveau global, mais des disparités régionales et un enjeu sur la ressource en eau

Le rapport complémentaire de l'étude « 4 pour 1000 » dédié à l'étude des effets du changement climatique sur le stockage de carbone dans les sols de grandes cultures⁴⁶¹ fait état d'un **impact modéré d'un climat futur modifié sur la période 2030-2060 sur les potentiels de stockage moyen en agriculture, mais met en avant des disparités régionales**. Cet effet modéré du changement climatique s'explique en partie par le fait que les effets sur la production de biomasse et sur la minéralisation se compensent en partie.

Sur la moyenne nationale, le climat modifié ne remet pas en cause :

- **ni les ordres de grandeur du stockage des pratiques actuelles** : + 51 +/- 263 kg C/ha/an sous climat actuel à + 37 kg C/ha/an sous climat modifié,
- **ni ceux du stockage permis par les pratiques stockantes additionnelles et leur combinaison** : + 184 kg C/ha/an +/- 166 sous climat actuel à + 184 +/- 179 kg C/ha/an sous climat modifié.

Le total de stockage permis par les pratiques actuelles et par les pratiques additionnelles est ainsi estimé à environ 236 kg C/ha/an sous climat actuel et à 221 kg C/ha/an sous climat modifié.

⁴⁵⁹ <https://www.researchgate.net/publication/358318232> Traduction française de l'article de EJSS Janvier 2022pdf

⁴⁶⁰ GIS Sol, 2011. L'état des sols de France

⁴⁶¹ Complément au rapport « Stocker du carbone dans les sols français : quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût ? », Constantin et al., 2020

Tableau 1. Valeurs du stockage de C (Δ SOC) et du stockage additionnel ($\Delta\Delta$ SOC) en kg C ha⁻¹ an⁻¹ permis par chaque scénario sous les deux climats.

LB : ligne de base, CI : extension des cultures intermédiaires, IP : insertion de prairies temporaires, AP : allongement des prairies temporaires, NRO : mobilisation de nouvelles ressources organiques, COMBI : combinaison des scénarios, LB_ « nom d'un scénario » : séquences du scénario avant modification des pratiques.

Scénario	Climat actuel		Climat modifié	
	Δ SOC	$\Delta\Delta$ SOC	Δ SOC	$\Delta\Delta$ SOC
LB	51		37	
CI	169	131	145	123
LB_CI	38		22	
IP	390	466	398	466
LB_IP	-76		-67	
AP	399	28	413	58
LB_AP	371		355	
NRO	195	233	157	208
LB_NRO	-38		-51	
COMBI	236	184	221	184
LB_combi	51		37	

Tableau 10 : Comparaison des valeurs de stockage additionnel de carbone de différents scénarios sous climat futur modifié et sous climat actuel - les lignes COMBI et LB_combi font apparaître respectivement le stockage additionnel lié à l'évolution des pratiques et le stockage lié aux pratiques actuelles

Source : Inrae⁴⁶²

Concernant le stockage additionnel : dans le scénario de climat modifié pris en compte dans ce rapport « 4 pour 1000 » (scénario RCP 8.5 correspondant à un réchauffement de + 4 °C à horizon 2100, projeté sur l'horizon 2030-2060), la mise en œuvre simultanée des trois pratiques stockantes retenues (combinaison de scénarios correspondant à l'extension des cultures intermédiaires, l'insertion et allongement des prairies temporaires, la mobilisation de nouvelles ressources organiques) permettrait un ainsi stockage additionnel de **+ 184 (+- 179) kg C/ha/an sur l'horizon 0-30 cm**, avec les évolutions régionales suivantes :

- **Extension des cultures intermédiaires :** le gain de stockage de C de + 123 +- 83 kg C/ha/an sous climat modifié est sensiblement le même que sous climat actuel (131 +- 93). Des « pertes » de stockage additionnel auraient cependant lieu dans le Bassin-Parisien, le Poitou-Charentes et la Provence-Alpes-Côte-d'Azur (baisse de production de biomasse des cultures intermédiaires) alors que le Sud-Ouest bénéficierait de gains de rendement des cultures intermédiaires, particulièrement sur la féverole.
- **Insertion et allongement des prairies temporaires :** le gain de stockage national moyen n'est pas affecté en ce qui concerne l'insertion de prairies (+ 466 +- 176 kg C/ha/an), en revanche le gain permis par l'allongement des prairies augmenterait (+ 58 +- 81 kg C/ha/an contre + 28 +- 78 kg C/ha/an sous climat actuel). L'essentiel des différences de stockage additionnel s'explique par un impact du changement climatique plus modéré sur les prairies (- 2 % de rendement en moyenne, et effet même positif dans le Sud-Ouest) que sur les cultures principales (notamment le maïs fourrage, surfaces sur lesquelles les entrées de carbone diminuent en lien avec la diminution de la satisfaction des besoins en eau).
- **Mobilisation de nouvelles ressources organiques :** le gain de stockage additionnel diminue (+ 208 +- 118 kg C/ha/an vs. + 233 +- 126 kg C/ha/an) avec des pertes partout sur le territoire (sauf en Bretagne et dans le Nord), probablement en lien avec l'évolution des conditions de minéralisation qui s'accélère à l'Est et diminue au Nord-Ouest.

⁴⁶² Complément au rapport « Stocker du carbone dans les sols français : quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût ? », Constantin et al., 2020

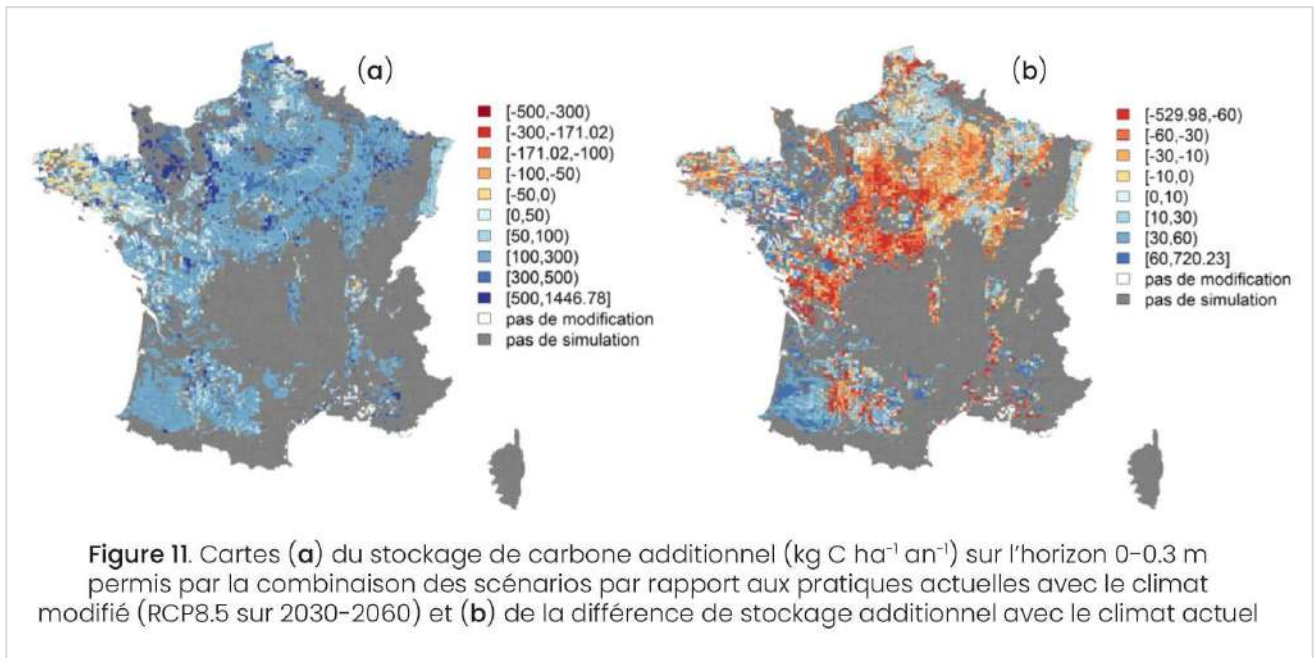


Figure 47 : Comparaison des potentiels de stockage additionnel de carbone sous climat futur modifié et sous climat actuel
 Source : Inrae⁴⁶³

Si les ordres de grandeur de stockage de carbone additionnel ne sont pas remis en cause, **un des points critiques est néanmoins la disponibilité de la ressource en eau.** Il est ainsi en particulier considéré dans l'étude la possibilité d'irrigation des cultures intermédiaires afin d'assurer leur levée. Ainsi, la quantité d'eau d'irrigation est doublée, passant de 82 mm en moyenne pour les cultures irriguées sous climat actuel à 167 mm sous climat futur modifié. L'étude recommande donc notamment de réfléchir à irriguer moins intensément mais sur une plus grande surface ou à mettre en place des pratiques et des rotations diminuant les besoins en eau.

⁴⁶³ Complément au rapport « Stocker du carbone dans les sols français : quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût ? », Constantin et al., 2020

6. Circularité des systèmes agricoles : assurer le rebouclage des cycles biogéochimiques

Les systèmes et flux agricoles peuvent retrouver des cycles biogéochimiques plus naturels et résilients. L'échelle territoriale a un rôle prépondérant à jouer dans la mise en œuvre de ces leviers.

A. Relocalisation de la production de l'alimentation animale et des flux de nutriments

Les importations de soja en provenance d'Amérique du Sud pour l'alimentation animale (volailles et bovins laitiers essentiellement) sont la source d'émissions de GES conséquentes (4 MtCO_{2e}), notamment du fait de la déforestation associée à cette culture, mais témoignent également de flux de nutriments peu efficaces à l'échelle géographique (en particulier l'azote).

Or des travaux récents⁴⁶⁴ suggèrent que l'élevage français pourrait se passer du soja importé, en augmentant les surfaces nationales, en réservant ce soja aux seuls élevages de volailles et en redéployant des surfaces de légumineuses prairiales pour les élevages bovins. L'annexe 4 propose un tableau avec les modalités de redéploiement des légumineuses fourragères (soja, trèfle, luzerne...) avec les perspectives d'accroissement pour chacune des espèces concernées à horizon 2050.

B. Reconnexion des productions végétales et animales : moindre spécialisation des régions agricoles et renouveau de la polyculture-élevage

La disponibilité en engrais azotés minéraux d'une part, en carburants bon marché d'autre part, a permis de dissocier les zones de cultures et les zones d'élevage ces dernières décennies. **Une redistribution des élevages sur le territoire permettrait un meilleur usage des fertilisants organiques en zones céréalières, tout en limitant les impacts environnementaux dans les zones d'élevage très spécialisées sans surfaces d'épandage suffisantes pour absorber durablement les effluents, notamment en milieu vulnérable.**

La complexité de redéploiement des systèmes de polyculture-élevage est un cas illustrant bien la difficulté à déployer certaines innovations organisationnelles, certes pertinentes du point de vue de la résilience des systèmes agricoles (en l'occurrence le bouclage des cycles de l'azote et du phosphore), mais peu compatibles avec l'architecture actuelle du secteur.

Les zones de plaines céréalières sont en effet aujourd'hui fortement marquées par une disparition des filières et du paysage infrastructurel liés à l'élevage, tout particulièrement en ce qui concerne les outils d'abattage, de transformation de proximité et les services vétérinaires. **L'absence de ces services sur de vastes zones géographiques et les difficultés de valorisation de nouvelles productions animales empêchent concrètement les agriculteurs qui le souhaiteraient de « se déspecialiser » (ou s'installer en polyculture-élevage).**

Pour dépasser ces verrous socio-techniques, la redistribution spatiale des activités d'élevage doit être planifiée et accompagnée. Cela permettrait de poser la question des besoins infrastructurels et techniques indispensables à sa réalisation au niveau des territoires, à la fois en termes qualitatifs (compétences, fonctions) et quantitatifs (nombre d'emplois ou d'infrastructures nécessaires). Une planification par des acteurs publics et privés, est déterminante pour définir une trajectoire, assurer les moyens nécessaires. Parmi eux, la question des outils d'abattage à réimplanter (abattoirs fixes, abattoirs itinérants, abattage à la ferme), des compétences

⁴⁶⁴ <https://idele.fr/detail-article/lelevage-peut-il-se-passer-du-soja-importe>

techniques à réunir (soins vétérinaires, expertise zootechnique, conseil technico-commercial, etc.), des possibilités de valorisation commerciale (grande distribution, boucheries, restauration collective en circuit court, vente directe, etc.), de l'évolution de la réglementation sur le transport des animaux d'élevage, du degré d'acceptabilité de l'élevage par le voisinage immédiat et de l'attractivité de la filière auprès des nouveaux entrants dans le monde agricole seraient à examiner.

C. Rebouclage du cycle des minéraux et matières organiques par la gestion des excréta humains et des biodéchets urbains

Le rebouclage du cycle des nutriments constitue un gros enjeu : alors que la fabrication et l'usage des engrais azotés minéraux contribuent de façon importante aux émissions de GES du secteur, aujourd'hui 90 % de l'azote minéral excrété par les humains est perdu⁴⁶⁵. Le retour au sol des biodéchets urbains, en maîtrisant les risques sanitaires, pourrait également contribuer de façon significative à la fertilisation et au maintien de la productivité agricole (voir III.1 sur le recyclage de l'azote).

Concernant les biodéchets urbains, une attention doit être portée plus particulièrement à la pollution plastique dans les sols⁴⁶⁶ : seuls les biodéchets les plus « propres » devraient être réservés aux terres agricoles et aux jardins nourriciers des particuliers ou collectivités, ce qui implique un travail de tri et de valorisation différenciée.

⁴⁶⁵ <https://hal.science/hal-04232722>

⁴⁶⁶ <https://enpc.hal.science/hal-02974698v1>

7. Adaptation des flux logistiques pour plus de résilience

La disponibilité et le faible coût du pétrole ont permis le transport massif de produits agricoles et alimentaires à travers la France et le monde. Or la contraction de la disponibilité en énergie affectera le transport national et international des intrants et denrées agricoles, ainsi que des animaux d'élevage. Elle pèsera également sur le coût du stockage des productions, pouvant être soumis par ailleurs à des difficultés liées aux nouvelles conditions climatiques (manque de températures suffisamment basses en hiver pour assurer la ventilation et la bonne conservation des grains stockés, ou inversement besoin en été de réfrigération pour certaines productions périssables). **Outre la décarbonation des usages, imaginer des flux plus courts et plus sobres peut s'envisager par une nouvelle répartition des activités sur le territoire et/ou la relocalisation des productions lorsqu'elle est possible, et notamment à plus grande proximité des centres urbains. Les importations, mais également les exportations pourront être fortement contraintes par la disponibilité à bas coût du pétrole.** Ces questions seront particulièrement cruciales pour les productions les plus fragiles telles que les fruits et légumes, par nature très périssables et transportés principalement par la route⁴⁶⁷ (90 % des volumes intérieurs et 2/3 de flux intrarégionaux). En matière logistique, les possibilités d'optimisation sont évidemment très variables selon les productions et les volumes concernés⁴⁶⁸.

Ce sujet pourra être approfondi dans le cadre des prochains travaux du Shift Project sur l'alimentation.

Conclusion

Si pour certains leviers, notamment techniques, les potentiels d'atténuation sont quantifiables, le calcul d'un potentiel global d'atténuation des émissions directes et indirectes s'avère complexe. Il existe en effet des synergies entre certains leviers (et donc des risques de double-comptage d'atténuation des émissions).

C'est une des raisons pour lesquelles l'exercice de projection de la transformation de l'agriculture à 2050 qui suit repose, non pas sur des hypothèses de transformation technique ou systémique (par exemple : optimisation de la fertilisation azotée de x kgN/ha ou encore déploiement de la polyculture-élevage en substitution de x t d'azote minéral), mais sur des hypothèses d'évolution quantitative (évolution des assolements, des cheptels, des pratiques d'optimisation dans une liste donnée). Par ailleurs, le périmètre de l'exercice justifie également cette approche (territoire hexagonal et absence de territorialisation).

⁴⁶⁷ <https://www.interfel.com/services/documentation/transport-fruits-et-legumes-frais-pratiques-et-enjeux-pour-la-filiere/>

⁴⁶⁸ <https://www.franceagrimer.fr/fam/content/download/65410/document/SYN-CER-Evaluation%20co%20de%20la%20cha%20logistique%20cerealiere%20francaise-2020-%20.pdf?version=2>



Scénarios de transformation du système agricole à horizon 2050

SYNTHÈSE DES SCÉNARIOS

GES

PRINCIPE INVARIANT SUR LES 4 SCÉNARIOS

Respect des objectifs de décarbonation du secteur agricole tels que définis par la SNCB 2 : **48 MtCO₂eq à horizon 2050 (émissions directes)**

3 SCÉNARIOS TESTS AUX FINALITÉS VOLONTAIREMENT CONTRASTÉES

Sorties marquantes

S1

UNE MEILLEURE AUTONOMIE AGRICOLE ET ALIMENTAIRE NATIONALE

- Couverture des besoins en protéines totales et en calories
- Absence d'importations d'aliments pour animaux

S2

UNE MEILLEURE INDÉPENDANCE ÉNERGÉTIQUE NATIONALE

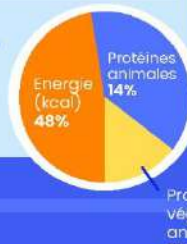
303 314 GWh de bioénergies produites soit **5 x la production actuelle**



S3

CONTRIBUTION À LA SÉCURITÉ ALIMENTAIRE MONDIALE

Une remarquable performance nourricière



Contreparties



Diminution conséquente des cheptels ruminants



Forte diminution des cheptels ruminants et monogastriques (risque de report sur les importations)

S4

PROPOSITION D'UN SCÉNARIO DE CONCILIATION : UN CHEMIN POTENTIEL DE DÉCARBONATION ET DE RÉSILIENCE POUR LE SECTEUR AGRICOLE

Objectifs



Réduire les émissions indirectes et accroître les capacités de stockage à hauteur des émissions directes résiduelles



S'affranchir des énergies fossiles et atteindre l'autosuffisance énergétique



Contribution à la résilience de la société (contribution à la décarbonation extra-sectorielle, à la préservation de la biodiversité et de la ressource en eau)



Hypothèses structurantes

- Forte croissance des surfaces en légumineuses, en particulier en soja
- Extensification des élevages associée à une diminution des effectifs :



Monogastriques



Bovins lait



Bovins viande



Ovins et caprins

Conciliation proposée



- Neutralité carbone
- Plus bas niveau d'émissions indirectes (-82% sur les émissions de GES liées à la synthèse des engrais)



Couverture des besoins alimentaires domestiques (forte hausse des protéines végétales)



- Forte baisse de la demande énergétique (directe et indirecte)
- Production de bioénergies multipliée par 3



Maintien d'une capacité d'export (en particulier sur les céréales)

ENSEIGNEMENTS DE CE SCÉNARIO DE CONCILIATION

Activer massivement des leviers de transition systémique :

- Transformer les pratiques de fertilisation
- Faire évoluer les systèmes d'élevage
- Réduire et décarboner la demande énergétique et contribuer aux autres secteurs
- Maintenir et développer le stockage de carbone dans les sols et la biomasse

RECOMMANDATIONS

Pour une transition planifiée, cohérente et efficace :

- Planifier et clarifier les objectifs
- Garantir la sécurité économique des agriculteurs
- Anticiper les besoins en compétences, recherche et connaissances
- Mobiliser les acteurs territoriaux : filières et collectivités
- Diffuser les pratiques agroécologiques

IV. Transformer le système agricole d'ici 2050 : plusieurs scénarios possibles, choisir et planifier

À partir des possibilités offertes par les leviers de transition présentés ci-dessus, ce projet a imaginé des projections possibles de transformation du système agricole qui contribueraient à l'atteinte des objectifs suivants, souvent invoqués dans les débats sur l'avenir de l'agriculture française :

- Produire afin de répondre aux besoins alimentaires nationaux, en maximisant l'autonomie des filières agricoles françaises,
- Atténuer les émissions de gaz à effet de serre du secteur,
- Assurer la résilience du secteur agricole aux crises climatiques, énergétiques et géopolitiques à venir, et en particulier diminuer sa dépendance aux énergies fossiles.
- Contribuer à la résilience globale de la société et à la préservation des écosystèmes en limitant les impacts des activités agricoles sur les écosystèmes.

Au regard des multiples fonctionnalités de l'agriculture et des usages concurrents de la biomasse agricole, il nous semble essentiel d'explicitier les arbitrages retenus et les coûts et bénéfices associés, et ainsi s'accorder sur un cap à donner au système. Dans le même temps, il importera d'assurer la prospérité économique des fermes, prérequis pour la transformation du secteur, dont il convient de définir collectivement le sens.

Nous ne présumons pas à ce stade d'un régime alimentaire optimal, ni précisément d'une allocation optimale de la biomasse agricole. Nous essayons d'imaginer une répartition relative des cultures et des cheptels qui permettraient d'atteindre les objectifs climatiques fixés au niveau national. Par la diversité de ses systèmes, de ses terroirs et de ses contextes pédoclimatiques, en mesure également de déplacer certaines productions sensibles dans les nouvelles aires de répartition qui pourraient exister en 2050, l'agriculture française peut en effet être (ré)organisée de diverses manières. L'Histoire montre que les assolements peuvent être adaptés, que les cheptels évoluent, que les pratiques sont transformables.

Ce travail de projections de transformation du système agricole s'est déroulé en trois temps :

- la construction de 3 scénarios-tests répondant à des priorités stratégiques contrastées,
- l'assignation d'objectifs climatiques à ces scénarios-tests, mettant en avant les besoins d'arbitrage sur les sols et la biomasse,
- la proposition d'un quatrième scénario, dit "de conciliation", construit pour répondre aux objectifs physiques poursuivis (production, climat, énergie, résilience).

Une réflexion qui s'inspire d'autres travaux prospectifs en matière de transition agricole

Il existe de nombreux travaux relatifs à la transition agricole, conduits notamment par l'INRAE⁴⁶⁹, l'IDDRI⁴⁷⁰, SOLAGRO⁴⁷¹, le LIED⁴⁷², l'ADEME⁴⁷³... Ces recherches s'adressent tantôt au monde agricole, avec de nombreuses références techniques, tantôt aux institutions et à la société civile, avec une volonté de narration et de scénarisation des transitions possibles.

Outre le cadre géographique de référence (France / Europe), les propositions de ces travaux se distinguent par :

- la priorité accordée aux questions énergétiques ou à la préservation de la biodiversité,

⁴⁶⁹ <https://www.inrae.fr/actualites/agriculture-europeenne-pesticides-2050>

⁴⁷⁰ <https://www.iddri.org/sites/default/files/PDF/Publications/Catalogue%20Iddri/Etude/201809-ST0918EN-tyfa.pdf>

⁴⁷¹ https://afterres2050.solagro.org/wp-content/uploads/2015/11/solagro_afterres2050_version2016.pdf

⁴⁷² <https://liedlab.net/equipres/>

⁴⁷³ <https://librairie.ademe.fr/ged/6531/transitions2050-rapport-compressé2.pdf>

- une transformation des modes de production plus ou moins forte, en particulier concernant la place de l'agriculture biologique, et donc l'intensité d'utilisation d'engrais azotés de synthèse et de produits phytosanitaires,
- la place des différents types d'élevage, en distinguant ruminants et monogastriques,
- la place des débouchés énergétiques de la biomasse agricole.

Concernant les engrais azotés minéraux, les objectifs varient aussi selon le crédit accordé à la possibilité d'en décarboner la fabrication à l'avenir (voir partie III.1.B.).

Tous ces travaux ont en commun d'imaginer la reconception plus ou moins forte des systèmes agricoles et mettent en évidence la corrélation entre production agricole et régimes alimentaires. Cette question sera approfondie lors de la deuxième phase de notre projet : nous faisons dans un premier temps le choix de considérer d'abord le potentiel agricole physique du territoire, en termes de production de biomasse globale.

1. Tests de scénarios aux priorités contrastées et sous contrainte de réduction des émissions de GES

A. Notre choix : un scénario par priorité

Pour orienter notre recherche, **nous avons choisi d'explorer dans un premier temps les conséquences de trois grandes priorités qui pourraient être données au système agricole national à horizon 2050**, selon que l'on viserait en priorité :

- **une meilleure autonomie agricole et alimentaire nationale,**
- **une moindre dépendance énergétique nationale,**
- **le maintien de capacités exportatrices dans un objectif de contribution potentielle à la sécurité alimentaire internationale**

Ces priorités sont fréquemment avancées par les acteurs économiques et décideurs politiques, sans que leur hiérarchisation soit claire. Nous avons cherché à mettre en évidence les conflits qui peuvent émerger entre ces objectifs et les effets d'une priorisation de ces enjeux les uns par rapport aux autres, à en explorer les conséquences et à en évaluer les enjeux physiques sous-jacents.

Cet exercice a vocation à susciter la discussion et ouvrir le débat, aussi les hypothèses testées ont été volontairement construites avec des orientations marquées mais suffisamment réalistes pour ne pas être excessivement disruptives par rapport au système agricole actuel. **L'approche vise à mettre en évidence les besoins d'arbitrage des usages des sols et des usages de la production agricole en conséquence** (usages des biomasses). En outre, avec l'augmentation des aléas climatiques, la production de biomasse agricole pourrait souffrir en 2050 d'une grande variabilité, à l'image d'autres énergies intermittentes⁴⁷⁴, et les volumes minimaux ne seront pas garantis tous les ans, voire réduits à zéro parfois pour certaines cultures.

B. Présentation des outils utilisés : de ClimAgri à MoSUT

Pour tester ces scénarios, après l'utilisation de ClimAgri comme outil de quantification des flux physiques dans nos premiers travaux exploratoires (rapport intermédiaire), **nous avons eu recours à l'outil de scénarisation MoSUT (MODélisation Sur l'Utilisation des Terres)**⁴⁷⁵ également développé par Solagro, et utilisé dans le cadre des travaux de prospective agricole et alimentaire de l'ADEME (Transition(s) 2050), ou encore dans le cadre des travaux de quantification de la Stratégie nationale bas-carbone (SNBC) pilotée par les pouvoirs publics.

Cet outil de modélisation permet d'assurer un bouclage des principaux flux physiques mis en jeu par l'agriculture à l'échelle française, en reposant sur ClimAgri et d'autres outils permettant la construction d'une trajectoire dynamique de transition, de 2020 à 2050.

C. Description des hypothèses retenues pour les trois scénarios-tests

Les trois scénarios-tests présentés dans notre rapport intermédiaire ne permettaient pas d'atteindre les objectifs climatiques de la Stratégie nationale bas carbone. Nous avons souhaité approfondir ces travaux exploratoires en retravaillant les hypothèses. Nous analyserons plus en détail l'impact de cet objectif de réduction des émissions de GES sur les autres objectifs initiaux des scénarios, ce qui nous a conduits à réévaluer les hypothèses de nos premiers travaux.

Hypothèses transverses à tous les scénarios, dans une perspective de décarbonation :

⁴⁷⁴ <https://minesparis-psl.hal.science/hal-04166035v1/document>

⁴⁷⁵ <https://solagro.org/travaux-et-productions/outils/mosut-outil-de-modelisation-systemique-sur-l-utilisation-des-terres>

- Évolution des pratiques : 25 % des surfaces en agriculture biologique (rendements AB basés sur les références actuelles), 75 % avec une approche agroécologique (en moyenne 80 % des surfaces en non labour et/ou semis direct, baisse de la demande énergétique totale pour la mécanisation estimée à 20 %, réduction moyenne de l'utilisation des phytosanitaires (IFT) de 50 %, considérés comme sans effets sur les rendements, à l'exception de l'impact des changements climatiques, pour lesquels on retient une valeur moyenne de - 5 %).
- Généralisation des couverts d'intercultures.
- Hausse des infrastructures agroécologiques et de l'agroforesterie (4 % d'IAE sur terres arables, 10 % d'agroforesterie sur terres arables, 14,7 % d'IAE sur prairies).
- Amélioration de l'efficacité énergétique, décarbonation des engins, matériels et bâtiments et développement de la sobriété des usages :
 - Électrification des moteurs thermiques pour 1/3 du parc matériel à 2050
 - Utilisation de biogaz pour 1/3 du parc matériel à 2050
 - Utilisation de biocarburant pour les usages résiduels
 - Isolation des bâtiments et bonnes pratiques d'économie d'énergie (- 20 %).
- Montée en qualité de la totalité des élevages monogastriques (5 % en bio, 95 % sous label).
- Réduction de la fermentation entérique des bovins : - 15 %.
- De façon transverse, conservation du maximum de prairies permanentes et autres surfaces toujours en herbe, répondant à la double exigence de maintenir les stocks de carbone dans les sols et de ne pas ajouter d'émissions liées au retournement des prairies, ainsi que de maintenir ces surfaces productives qui nécessitent moins d'énergie entrante que des parcelles cultivées ou des prairies temporaires. L'usage des éventuels excédents de fourrages est ensuite analysé, scénario par scénario, en sortie de modèle.

Les hypothèses de construction des différents scénarios en comparaison à la situation actuelle sont rassemblées en partie IV.2.

a. Scénario-test 1 : Priorité à une meilleure autonomie agricole et alimentaire nationale

Objectif : assurer en premier lieu l'alimentation de la population française, en dépendant le moins possible d'intrants et d'aliments importés (répondre à la totalité de la demande actuelle en produits agricoles, sans importations), tout en réduisant les émissions de GES pour atteindre 48 MtCO_{2e} (objectif SNBC2, limité aux émissions directes).

Par rapport à la situation actuelle et aux dépendances du système agricole mises en évidence précédemment, cet objectif implique :

- une **autonomie accrue en fertilisants**, organiques ou de synthèse, en particulier les engrais azotés (en cherchant à en réduire la consommation, mais avec la possibilité d'en augmenter la fabrication sur le territoire national sans importation de gaz fossile⁴⁷⁶) ;
- une **autonomie accrue en alimentation animale**, notamment en grains et tourteaux riches en protéines, mais aussi en légumineuses prairiales ;
- une **autonomie accrue en énergie** (carburants, combustibles, électricité) pour les fermes, si cela est possible.

Cette recherche d'autonomie implique une hausse importante des surfaces de légumineuses, que ce soit en culture principale, en interculture, via les plantes compagnes ou les couverts permanents, pour diminuer le recours aux engrais azotés minéraux. **Elle implique également une hausse des surfaces de protéagineux et légumineuses prairiales à destination de l'alimentation animale** afin d'assurer le remplacement des tourteaux et graines importés.

⁴⁷⁶ En particulier de façon décarbonée : les premiers travaux du Shift Project sur la décarbonation de l'industrie envisageaient une production maximale de 2Mt d'azote ammoniacal d'origine électrique, et une perspective d'export de l'excédent, https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2022/01/PTEF-Decarboner-lindustrie_-Rapport-final.pdf

L'autonomie énergétique du secteur agricole peut augmenter (photovoltaïsme, énergie bois et biomasse, méthanisation), mais la production de biocarburants et de biogaz ne serait développée qu'en cas d'opportunité et de disponibilité de gisements organiques locaux (pas de cultures dédiées) avec une consommation majoritairement locale.

Les exportations sont limitées aux seules productions agricoles excédentaires (ce qui n'est pas conséquences pour la balance commerciale de la France), les importations aux seuls fruits et légumes exotiques, riz, café, cacao... Les fruits et légumes tempérés consommés en France sont produits sur le territoire. La surface de vignes reste stable, avec une évolution de leurs zones d'implantation sous les effets des changements climatiques.

Hypothèses quantitatives retenues pour ce scénario-test 1

- Relocalisation des productions et de l'alimentation animale :
- Doublement des surfaces de fruits et légumes.
- Maintien des cheptels de petits ruminants.
- Maintien des cheptels monogastriques.
- Par rapport au rapport intermédiaire, au regard des objectifs de décarbonation du secteur, réévaluation des effectifs des cheptels ruminants à la baisse (- 35 %).
- Disparition des surfaces en maïs ensilage et prairies temporaires.
- Multiplication de l'ordre de 4,5 des surfaces en soja et de 4 des autres protéagineux à graines.

b. Scénario-test 2 : priorité à une meilleure indépendance énergétique nationale

Objectif : assurer la fourniture d'un maximum de biomasse agricole à des usages énergétiques pour des usages agricoles et non agricoles (mobilité rurale, *sustainable aviation fuels*...), après sécurisation des usages alimentaires nationaux (sur la base des Besoins Moyens Quotidiens définis par la FAO, voir ci-après section C.) tout en réduisant les émissions de GES pour atteindre 48 MtCO_{2e} (objectif SNBC2, limité aux émissions directes).

Par rapport à la situation actuelle, cet objectif implique la recherche, sous conditions de durabilité :

- d'un **développement important de la méthanisation** à partir de gisements de matières organiques, mais aussi de CIVE et de cultures dédiées, voire de luzerne et herbe ;
- d'un **développement important des biocarburants** à partir de biomasse agricole nationale (limitation des importations de biocarburants), y compris des biocarburants de deuxième génération.

Les sous-produits de la fabrication d'huile végétale (tourteaux de colza) sont toujours valorisés en alimentation animale, en particulier pour les élevages monogastriques.

Les exportations sont limitées aux éventuelles productions agricoles excédentaires, les importations aux fruits et légumes exotiques, riz, café, cacao, ainsi qu'aux éventuels compléments de protéines végétales si cela est nécessaire.

Hypothèses quantitatives retenues pour ce scénario-test 2

- Augmentation des surfaces à vocation énergétique :
- Multiplication par 2,5 de la surface en oléagineux, avec une utilisation en biodiesel, et ajout de 1,5 million d'ha de culture de miscanthus, pour la synthèse d'éthanol de 2^{ème} génération ;
- Réduction de l'ordre de 35 % des surfaces en céréales à paille et maïs grain ;
- Augmentation des légumineuses à graines (x 1,5) et légumes secs afin de produire un peu plus de protéines végétales à destination de l'alimentation humaine.

Par rapport au rapport intermédiaire, hypothèses de réduction des productions animales afin de libérer des surfaces pour des cultures énergétiques :

- Diminution des cheptels bovins lait et viande de - 35 % ;
- Diminution des cheptels monogastriques et petits ruminants de l'ordre de - 30 % ;
- Division par 2 des surfaces en maïs ensilage et prairies temporaires.

Dans ce scénario, les bovins sont nourris pour une partie d'entre eux principalement à partir des prairies permanentes, pour une autre partie, principalement au bâtiment avec des aliments, en particulier à partir des tourteaux issus de la trituration des oléagineux ayant pour vocation la production de biodiesel (scénario « Dual » de répartition des élevages de bovins). Les déjections des animaux sont méthanisées partout où cela est possible (70 %), ainsi que les surplus d'herbe et une partie des couverts végétaux et des résidus de culture. 10 % des pailles sont également fléchées, aux côtés du miscanthus, pour produire du bioéthanol de seconde génération.

c. Scénario-test 3 : priorité à la contribution à la sécurité alimentaire internationale par le maintien d'une capacité exportatrice française

Objectif : assurer la production d'un maximum de biomasse alimentaire exportable (céréales et oléo-protéagineux) après sécurisation des usages alimentaires nationaux (sur la base des BMQ définis par la FAO, voir ci-après section C.). Assurer un rôle géostratégique à la France, lutter contre la faim dans le monde dans un contexte de changement climatique affectant la production agricole mondiale, tout en réduisant les émissions de GES pour atteindre 48 MtCO_{2e} (objectif SNBC2, limité aux émissions directes).

Par rapport à la situation actuelle, cet objectif implique :

- le **maintien voire l'augmentation des surfaces des cultures exportables les plus productives** (céréales, oléagineux) ;
- la **réduction des productions animales**, en particulier des monogastriques, consommatrices de grains et donc de SAU ;
- le **maintien des échanges commerciaux internationaux** pour les intrants (importation d'engrais azotés et d'aliments pour animaux) ;
- le développement de biocarburants et de biogaz uniquement selon les opportunités et la disponibilité de gisements organiques locaux (pas de cultures dédiées) avec consommation majoritairement locale.

Hypothèses de calcul retenues pour ce scénario-test 3

- Augmentation des cultures destinées à l'alimentation humaine :
- Augmentation d'environ 25 % des surfaces en céréales à pailles
- Réduction des surfaces en oléagineux d'environ 30 % et en maïs grain d'environ 40 %
- Multiplication par quatre des surfaces de légumineuses à graines à vocation alimentaire
- Réduction des cheptels monogastriques de 30 % et des élevages de petits ruminants de 30 %
- Réduction des cheptels bovins de 35 %, avec pour idée de ne maintenir que des élevages à l'herbe sur prairies (et donc minimiser strictement la part de concentré dans les rations)
- Production d'énergie : méthanisation de 40 % des déjections animales et 5 % des fourrages excédentaires et des prairies

Les résultats relatifs à ces trois scénarios-tests sont présentés de façon détaillée en partie 3 ci-dessous.

Les résultats des différents scénarios en termes de potentiel nourricier sont estimés en valeur nette, soit selon les besoins moyens quotidiens (BMQ) estimés par la FAO, soit selon les apports réels quotidiens (ARQ) moyens des Français (valeurs 2007). Ces deux indicateurs diffèrent notamment d'un facteur 2 sur les protéines totales et d'un facteur 3 sur les protéines animales. Les valeurs de référence de la FAO et d'autres sources sont présentées en annexe 12.

Les priorités stratégiques initialement poursuivies par ces scénarios ne sont pas totalement atteintes après leur avoir assigné une contrainte d'objectif climatique. Pour rappel, nous ne présumons pas à ce stade d'un régime alimentaire optimal, ce qui sera pris en compte dans la suite des travaux.

- Le scénario-test 1 visant l'autonomie agricole et alimentaire nationale affiche une diminution des cheptels de ruminants conséquente (par rapport au régime alimentaire actuel), ce qui impliquerait des reports sur des importations (qui ne peuvent être pris en compte dans le périmètre de notre exercice) ou un changement de régime alimentaire. Si ce scénario ne couvre pas les ARQ en protéines animales, il permet néanmoins de couvrir les ARQ en protéines totales et en calories.
- Le scénario-test 2 visant la production de bioénergies nécessite les mêmes réductions de cheptel et affiche des résultats plus faibles en termes de potentiel nourricier, qui ne couvrirait pas les besoins de la population à 2050 selon les ARQ (diminué de 45 % par rapport à la situation actuelle). C'est le seul scénario qui ne couvre plus les ARQ en protéines totales et en calories.
- Enfin, le scénario-test 3 orienté vers l'export, subit les mêmes arbitrages que le scénario-test 1 sur les effectifs de ruminants mais également sur les effectifs de monogastriques, avec les mêmes conséquences en termes de couverture des besoins en ARQ et de risques de reports vers des importations. De la même manière que le scénario-test 1, ce scénario ne couvre pas les ARQ en protéines animales, il permet néanmoins de couvrir les ARQ en protéines totales et en calories.

Ce constat a permis de mettre en évidence le besoin de compromis et de pragmatisme entre ces priorités, à l'origine de la construction d'un quatrième scénario.

D. Pour plus de réalisme et de résilience : un scénario de conciliation

Ce scénario cherche à développer une des visions possibles de compromis entre les différentes priorités stratégiques contrastées données aux scénarios-tests étudiés précédemment. Contrairement aux scénarios précédents, il est construit de façon à concilier en premier lieu les objectifs physiques poursuivis (production, énergie, climat), avec une priorité particulière donnée à la résilience.

Au-delà des résultats quantitatifs obtenus (couverture des besoins alimentaires, émissions directes et indirectes de GES, potentiel de stockage de carbone, production et consommation d'énergie), il permet également de préciser les points d'arbitrage majeurs et les conditions de mise en œuvre associées à cette trajectoire.

Les spécificités de ce scénario sur les différents objectifs par rapport aux scénarios précédents sont :

- **Produire afin de répondre aux besoins alimentaires nationaux, en maximisant l'autonomie des filières agricoles françaises** : il s'agit ici d'un objectif similaire à celui du scénario-test 1, avec un accent particulier mis sur l'autonomie en termes d'alimentation animale, afin de limiter des effets de report et des émissions importées, sans en fermer totalement la possibilité ;
- **Atténuer les émissions de GES du secteur** : au-delà de l'ambition commune à tous les scénarios de réduire les émissions directes du secteur agricole pour atteindre 48 MtCO_{2e} à horizon 2050, ce scénario vise également (contrairement aux autres scénarios) à réduire les émissions indirectes et, si possible, à stocker du carbone à hauteur des émissions directes résiduelles du secteur ;
- **Assurer la résilience du secteur agricole** : il s'agit ici du seul scénario parmi les scénarios étudiés où sont fixés des objectifs quantitatifs en matière de consommation et de production d'énergie : il vise à sortir des énergies fossiles consommées par le secteur, et à produire de l'énergie à hauteur de ses besoins ;
- **Contribuer à la résilience globale de la société** : il s'agit ici, comme dans les autres approches, de s'assurer (sans objectif quantitatif défini) de la possibilité d'assurer une fourniture d'énergie et de ressources régulières, en quantité soutenable pour les agroécosystèmes et limitant les concurrences avec l'alimentation humaine, de préserver et restaurer la biodiversité et de favoriser la sobriété des usages de l'eau.

2. Pour chaque scénario, des hypothèses travaillées de façon itérative

Le tableau ci-dessous présente une vue d'ensemble des hypothèses structurantes utilisées dans les 4 scénarios construits (ces hypothèses pouvant différer des hypothèses d'entrée initiales, du fait de la nature itérative de la modélisation). La logique de construction des hypothèses du scénario de conciliation est détaillée dans la partie IV. 4.

Hypothèses testées	S1 Autonomie 2050	S2 Bioénergie 2050	S3 Export 2050	S4 Conciliation 2050
Évolution des systèmes de culture				
% agriculture raisonnée / intégrée / bio	0 / 75 / 25 %	0 / 75 / 25 %	0 / 75 / 25 %	0 / 75 / 25 %
% de terres arables en agroforesterie	10 %	10 %	10 %	10 %
% de prairies en agroforesterie	5 %	5 %	5 %	5 %
Évolution des assolements				
Surfaces en céréales	x0,96	x0,64	x1,36	x0,83
Surfaces en oléagineux	x1,38	x2,50	x0,68	x1,03
Surfaces en protéagineux (hors soja)	x3,94	x0,89	x1,66	x2,31
Surfaces en soja	x4,43	x0,41	x1,04	x3,70
Surfaces en prairies temporaires	x0,10	x0,49	x0,12	x0,80
<i>Dont surfaces en légumineuses fourragères</i>	x0,74	x0,54	x0,96	x2,78
Surfaces en maïs ensilage	x0,02	x0,63	x0,04	x0,56
Surfaces de prairies permanentes	x0,97	x1,00	x1,06	x0,90
Surfaces en vigne	x0,97	x0,99	x1,03	x0,93
Surfaces en arboriculture	x1,93	x0,67	x0,52	x1,85
Surfaces en maraîchage	x1,93	x0,71	x1,07	x2,14
Évolution des systèmes d'élevage				
Systèmes d'élevage bovins lait*	Scénario "Tout herbager"	Scénario "Dual"	Scénario "Tout herbager"	Scénario "Beaucoup plus de pâturage"
Productivité (production de lait par vache laitière)	-5 %	+4 %	-13 %	-3 %
Systèmes d'élevage bovins viande*	60 % "plus pâturants"	60 % "plus pâturants"	60 % "plus pâturants"	80 % "plus pâturants"
Atténuation de la fermentation entérique	-15 %	-15 %	-15 %	-15 %
Systèmes d'élevage volailles	5 % bio / 95 % label	5 % bio / 95 % label	5 % bio / 95 % label	10 % bio / 65 % label / 25 % certifié
Systèmes d'élevage porcins	5 % bio / 95 % autres signes de qualité	5 % bio / 95 % autres signes de qualité	5 % bio / 95 % autres signes de qualité	5 % bio / 95 % autres signes de qualité
Gestion des effluents : méthanisation	50 %	70 %	40 %	50 %
Evolution des cheptels				
Cheptel bovin lait	-35 %	-35 %	-35 %	-30 %
Cheptel bovin viande	-35 %	-35 %	-35 %	-25 %
Cheptel volailles	+0 %	-30 %	-30 %	-20 %
Cheptel porcine	+0 %	-30 %	-30 %	-20 %
Cheptel ovin et caprin	+0 %	-30 %	-30 %	-20 %

Evolution de la production et consommation d'énergie				
Mesures d'efficacité énergétique	-20 % (efficacité et isolation)	-20 % (efficacité et isolation)	-20 % (efficacité et isolation)	-20 % (efficacité et isolation)
Décarbonation du parc matériel, engins	1/3 électrification, 1/3 biogaz	1/3 électrification, 1/3 biogaz	1/3 électrification, 1/3 biogaz	1/3 électrification, 1/3 biogaz
Usages non alimentaires de la biomasse : biogaz	29 % des couverts ; 10 % d'herbe et fourrages non consommés	29 % des couverts ; 25 % d'herbe et fourrages non consommés	29 % des couverts ; 5 % d'herbe et fourrages non consommés	29 % des couverts ; 20 % d'herbe et fourrages non consommés
Hypothèses qualitatives sur l'utilisation de la biomasse pour produire des biocarburants	Usage opportuniste (pas d'hypothèses sur l'offre)	Usage priorisé (hypothèses d'une augmentation importante de l'offre)	Usage résiduel (pas d'hypothèses sur l'offre, et biomasse priorisée ailleurs)	Usage raisonné

Tableau 11 : Tableau 10 : Hypothèses principales des différents scénarios étudiés

*La description des scénarios de répartition des systèmes d'élevages bovins est disponible en annexe 13

3. Synthèse des principaux résultats des différents scénarios

Les résultats détaillés des 4 scénarios sont disponibles en annexe 14 : évolution des assolements, des cheptels, des principales productions, émissions directes et indirectes de GES, consommation et production d'énergie. Les changements apportés aux scénarios initiaux pour atteindre les objectifs de réduction des émissions de GES sont importants, car ils n'étaient pas initialement construits autour de cet enjeu. Les résultats présentés ici montrent en quoi les objectifs spécifiques à chacun des scénarios initiaux sont affectés.

A. Résultats en termes de potentiel nourricier

Le tableau ci-après présente les résultats des différents scénarios en termes de potentiel nourricier en valeur nette, en production nette d'énergie et de protéines et selon les indicateurs BMQ (besoins moyens quotidiens) et ARQ (apports réels quotidiens).

Hypothèses testées	Situation initiale 2020	S1 Autonomie 2050	S2 Bioénergie 2050	S3 Export 2050	S4 Conciliation 2050
Potentiel nourricier (calories et protéines produites par an)					
Énergie (Gcal)	156 323 121	129 167 191	83 055 237	150 285 273	111 257 234
Protéines végétales et animales (t)	3 680 894	2 900 524	1 869 807	3 426 354	2 622 459
Protéines animales (t)	1 507 295	1 079 044	990 256	901 907	1 046 166
Potentiel nourricier (nombre de personnes nourries par an selon les ARQ France)					
Énergie	122 366 435	101 109 347	65 013 884	117 640 135	87 089 811
Protéines végétales et animales	100 846 410	79 466 423	51 227 576	93 872 719	71 848 197
Protéines animales	59 848 915	42 844 723	39 319 270	35 811 271	41 539 248
Potentiel nourricier (nombre de personnes nourries par an selon les BMQ FAO)					
Énergie	158 623 157	131 067 672	84 277 257	152 496 472	112 894 200
Protéines végétales et animales	192 088 400	151 364 615	97 576 335	178 805 179	136 853 709
Protéines animales	183 536 674	131 390 483	120 579 093	109 821 232	127 387 028

Tableau 12 : Potentiel nourricier dans les différents scénarios étudiés

À des fins d'analyse de ces résultats, la démographie est estimée à environ 70 millions d'habitants en 2050⁴⁷⁷.

Pour répondre aux enjeux de décarbonation et de transition de l'agriculture, un certain nombre d'évolutions viennent impacter le potentiel nourricier par rapport à la situation initiale, **tout en maintenant, pour tous les scénarios, une couverture largement supérieure aux besoins de la population française en BMQ.**

⁴⁷⁷ <https://www.insee.fr/fr/statistiques/1377211?sommaire=1377217>

- D'abord, l'augmentation de la part d'agriculture biologique jusqu'à 25 % des surfaces en grandes cultures vient affecter une partie de la productivité moyenne de la ferme France (pas d'hypothèse d'amélioration des rendements de l'agriculture biologique dans l'exercice de modélisation ; hypothèse de perte de 5 % de rendements sur les céréales, mais pas d'hypothèse d'impact du changement climatique sur les différents rendements liée à l'échelle de modélisation) ;
- De plus, les évolutions des assolements, amenant à une réduction de la SAU en grandes cultures (agroforesterie, cultures énergétiques pérennes, artificialisation et déprise agricole, etc), ainsi que l'augmentation de la part de légumineuses (moins productives à l'hectare) contribuent à la réduction du potentiel nourricier dans tous les scénarios.

Il est à noter que la situation initiale 2020 présente un déficit en protéines animales (selon les ARQ), probablement lié aux importations de volaille et d'ovins (voire d'une surestimation de l'indicateur). C'est également le cas des différents scénarios étudiés à 2050.

Ces résultats permettent de souligner l'importance du différentiel entre le potentiel nourricier selon les BMQ et selon les ARQ (de l'ordre de 30 %), et l'**importance du levier de l'évolution des régimes alimentaires pour la maximisation de ce potentiel**. A titre d'exemple, le scénario-test 2 Bioénergies ne permet pas de répondre aux besoins alimentaires à 2050 selon les ARQ.

B. Résultats sur les émissions de GES directes et indirectes

Pour rappel, l'objectif climatique quantitatif assigné aux scénarios, celui de la SNBC2, ne concerne que les émissions directes du secteur agricole.

Total émissions de GES (ktCO ₂ e)	Situation initiale 2020	S1 Autonomie 2050	S2 Bioénergie 2050	S3 Export 2050	S4 Conciliation 2050
Émissions directes de GES	82 314	49 413	45 087	46 921	47 971
Émissions indirectes de GES	13 919	6 790	5 616	6 458	5 611
Bilan brut des émissions de GES	96 233	56 202	50 703	53 379	53 583

Tableau 13 : Émissions directes et indirectes (ktCO₂e) par rapport à la situation actuelle, dans les différents scénarios étudiés

Emissions directes de GES (ktCO₂e) : résultats des 4 scénarios

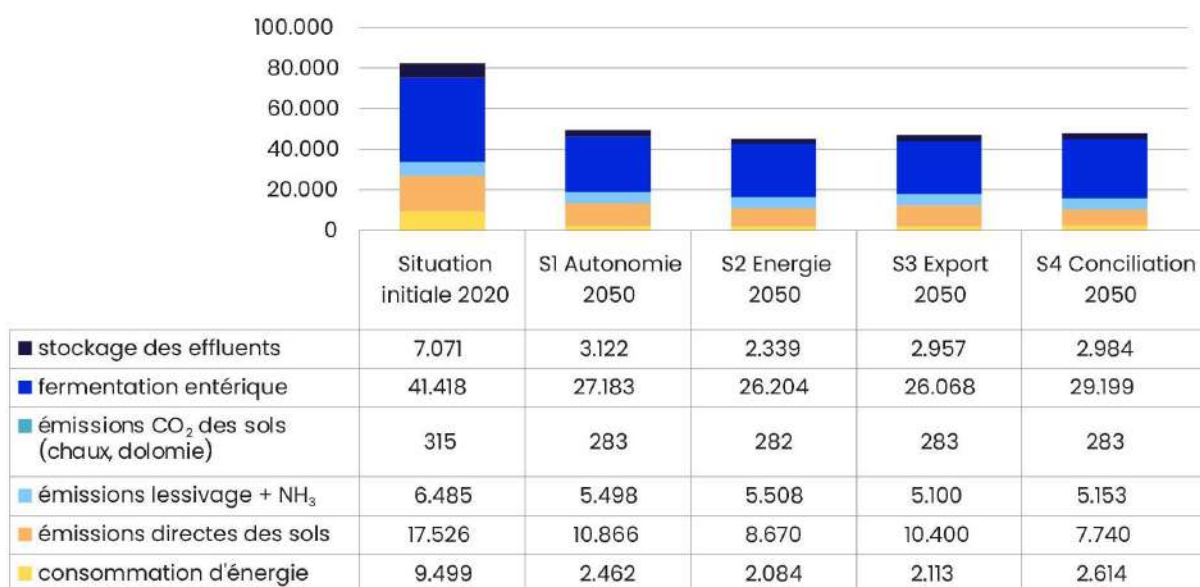


Figure 48 : Émissions directes (ktCO₂e) par rapport à la situation actuelle, dans les différents scénarios étudiés

Emissions indirectes de GES (ktCO₂e) : résultats des 4 scénarios

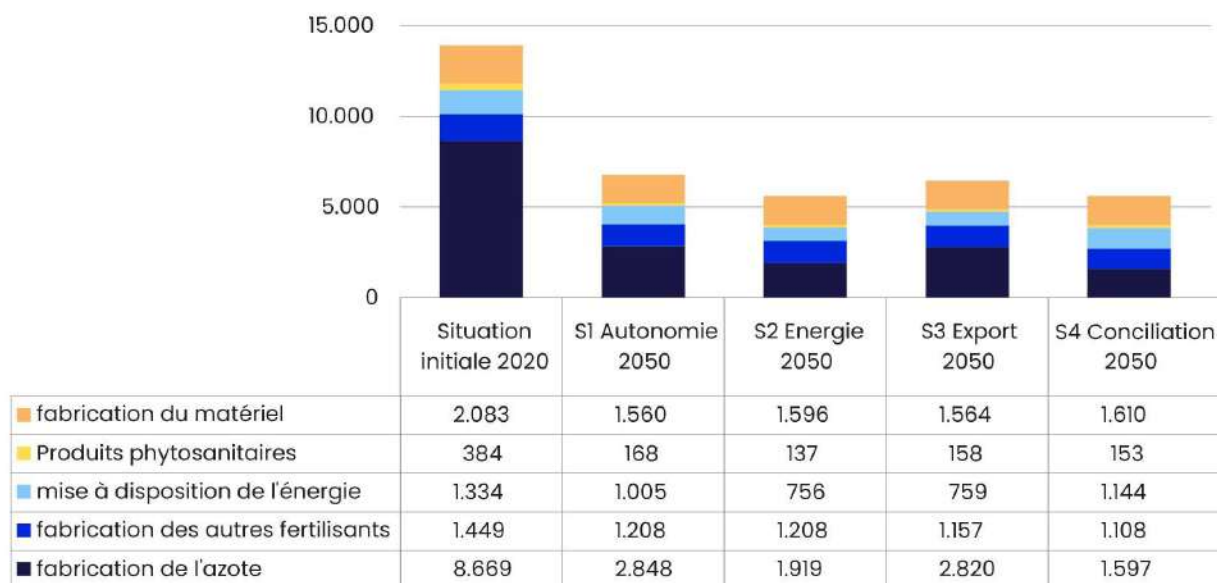


Figure 49 : Émissions indirectes (ktCO₂e) par rapport à la situation actuelle, dans les différents scénarios étudiés

Au-delà de l'atteinte (ou presque) des objectifs climatiques de la SNBC2 sur les émissions directes, les quatre scénarios présentent de légers différentiels de répartition des émissions directes et indirectes.

Pour tous les scénarios, la baisse des émissions repose sur les trois mêmes mécanismes, avec des valeurs légèrement différentes : baisse d'émissions liées à la fermentation entérique résultant de la diminution des cheptels et de son atténuation par animal, baisse des émissions des sols liées à une diminution de l'utilisation d'engrais azotés minéraux (variable selon les scénarios) et décarbonation de l'énergie utilisée.

Le Scénario 1 Autonomie, s'il semble moins décarboné que les deux autres, se distingue par l'absence d'importations pour le secteur agricole (pas d'importation d'aliments pour animaux) dont le bilan carbone ne figure pas dans cette représentation.

Les variations d'émissions indirectes sont principalement liées à la production d'engrais azotés, et donc au taux de recyclage des nutriments à l'échelle du système agricole. À ce titre, le scénario 4 Conciliation affiche un potentiel d'atténuation significativement supérieur aux trois autres scénarios sur les postes de fabrication de l'azote et des émissions directes des sols du fait du développement significatif des surfaces en légumineuses.

La décarbonation des autres secteurs permise par ces scénarios n'apparaît pas dans ces résultats, elle est notamment deux fois plus élevée pour le scénario 2 que pour les autres scénarios.

C. Résultats sur la consommation et la production d'énergie du secteur agricole

Consommation et production d'énergie (GWh)	Situation initiale 2020	S1 Autonomie 2050	S2 Bioénergie 2050	S3 Export 2050	S4 Conciliation 2050
Demande énergétique (énergie directe)	54 129	38 702	30 340	30 595	42 967
Demande énergétique (énergie indirecte)	44 346	26 319	22 015	25 864	20 272
Production de bioénergie	56 427	149 793	303 314	127 202	161 720

Tableau 14 : Demande énergétique et production de bioénergie (GWh) par rapport à la situation actuelle, dans les différents scénarios étudiés

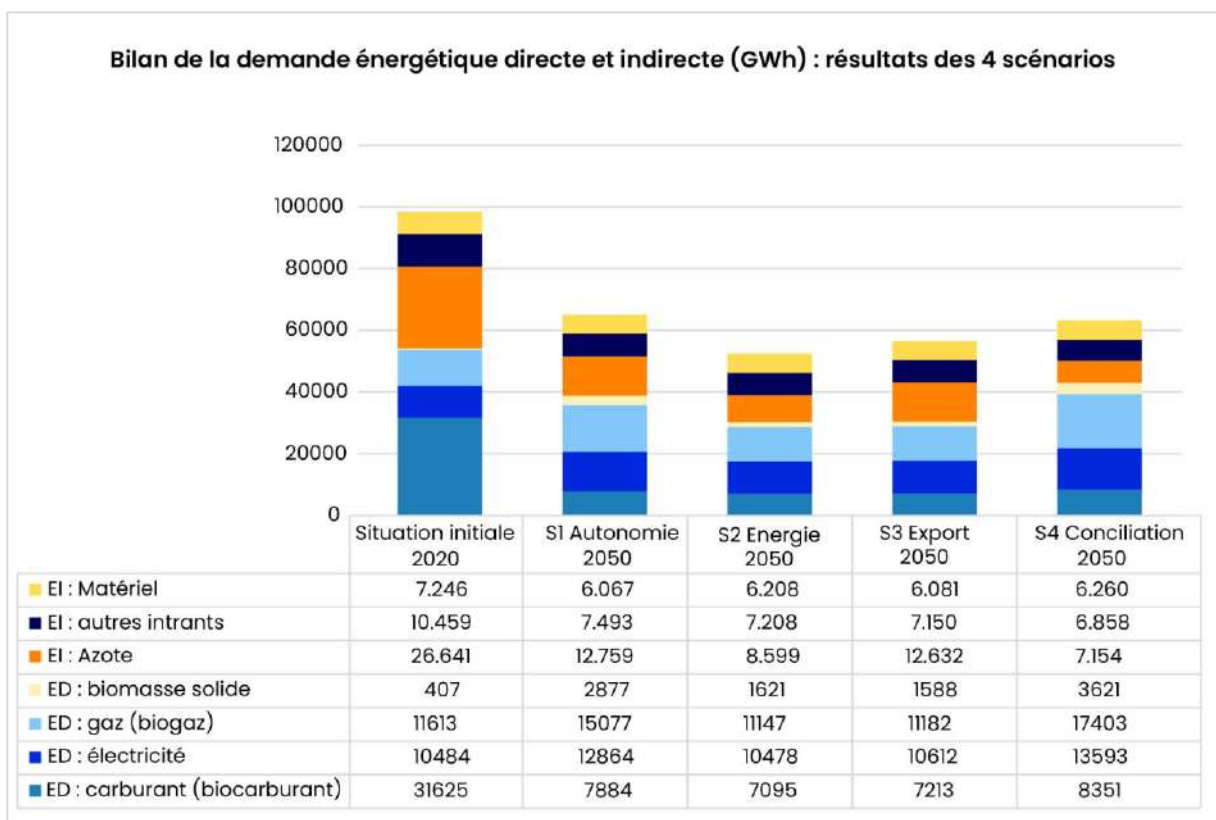


Figure 50 : Consommations d'énergie directe (ED) et indirecte (EI) (GWh) par rapport à la situation actuelle, dans les différents scénarios étudiés

Les scénarios 1 Autonomie et 4 Conciliation conservent plus d'effectifs monogastriques que les scénarios 3 Export et 2 Bioénergie, conduisant à une demande énergétique pour le chauffage des bâtiments d'élevage supérieure (biogaz et électricité). Ces élevages sont cependant en mesure de produire une partie de l'énergie qu'ils consomment via la méthanisation des déjections de ces animaux. Le scénario 4 Conciliation se caractérise par la demande en énergie indirecte la plus faible, en particulier du fait de moindres besoins en azote minéral.

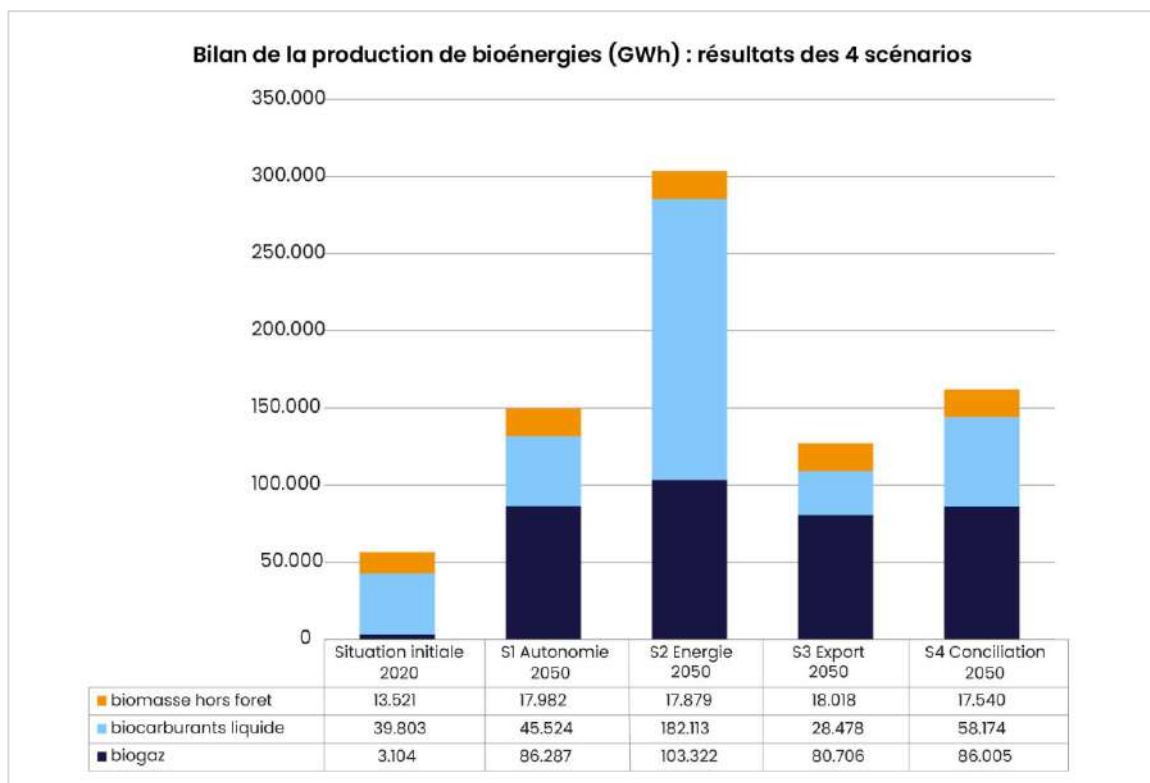


Figure 51 : Production de bioénergies (GWh) par rapport à la situation actuelle, dans les différents scénarios étudiés (biomasse hors forêt = biomasse solide issue de l'agroforesterie et des résidus de culture à usage combustion)

Le scénario 2, orienté sur la maximisation de la production d'énergie pour les autres secteurs de l'économie, se démarque particulièrement, avec une production de biocarburants très importante, mais c'est aussi le scénario au potentiel nourricier le plus faible, conduisant à réduire drastiquement les exportations de céréales et réduire significativement la part des protéines animales produites en France.

Les scénarios 1, 3 et 4 contribuent à la production d'énergie au moins à la hauteur des besoins directs et indirects de l'agriculture, à partir de biomasse. Cela constitue un gage de résilience de l'agriculture face aux risques d'aléas énergétiques, bien qu'il soit nécessaire de structurer les filières de production et de transformation afin que l'agriculture puisse consommer sa propre énergie quand cela est nécessaire.

Note : la production d'électricité par l'agrivoltaïsme n'est pas prise en compte dans ces scénarios. En effet, les potentiels de développement d'agrivoltaïsme sont importants, mais les éventuels impacts sur la production agricole en tant que telle semblent dépendre des conditions de déploiement sur le terrain, de façon spécifique à chaque projet. Si ceux-ci semblent limités quand les bonnes conditions de déploiement sont respectées (voir encadré dédié), il est néanmoins complexe de définir un niveau de déploiement « souhaitable » des surfaces en agrivoltaïsme. Certains experts proposent un potentiel de 100 000 ha⁴⁷⁸ d'agrivoltaïsme déployés à horizon 2050, pour une puissance installée de 50 GW. Cependant, cela dépend aussi du déploiement du photovoltaïque sur d'autres surfaces (zones déjà artificialisées, parkings, toitures, etc.) et de priorités qui pourraient être assignées au secteur de la production d'électricité photovoltaïque. The Shift Project se réserve la possibilité d'approfondir ces estimations quantitatives en lien avec les travaux des autres secteurs de l'économie dans des travaux ultérieurs.

⁴⁷⁸ <https://www.inrae.fr/dossiers/agriculture-forets-sources-denergie/panneaux-oui-pas-trop>

4. Résultats détaillés du scénario de conciliation par objectif

A. Produire afin de répondre aux besoins alimentaires nationaux, en maximisant l'autonomie des filières agricoles françaises

Dans l'exercice de modélisation, cet objectif se traduit par les hypothèses suivantes :

- **Produire de la biomasse alimentaire permettant de répondre aux besoins de la population :** couverture a minima des besoins moyens quotidiens (BMQ) tels que définis par la FAO
- **Assurer l'adéquation entre les productions végétales et les besoins des cheptels et limiter les importations d'alimentation animale**
 - Multiplication des surfaces en légumineuses fourragères (x 2,78), autres protéagineux (x 2,31) et soja spécifiquement (x 3,70)
 - Facteur d'importation divisé par 4.

a. Capacité à couvrir largement les besoins alimentaires de la population

Ce scénario permet de maintenir un excédent significatif en termes de calories, garantissant de répondre largement aux besoins de la population française (112 millions de personnes selon les BMQ, et 87 millions de personnes selon les ARQ), et dégageant un excédent structurel permettant de maintenir des exportations (en baisse néanmoins), en particulier sur les céréales.

Remarque méthodologique concernant le potentiel nourricier : en l'état actuel des travaux du Shift Project, n'ayant pas encore approfondi les évolutions portants sur les secteurs agroalimentaire et alimentation, nous ne sommes pas en mesure de développer de façon approfondie à ce stade les enjeux de balance commerciale en lien avec l'alimentation des Français, ni faire de prescriptions quantifiées quant à la réduction de la consommation de protéines d'origine animale. Afin d'évaluer la couverture des besoins de la population, nous nous sommes basés sur l'estimation des BMQ tel que définis par la FAO.

b. Réduction des concurrences entre alimentation humaine et animale

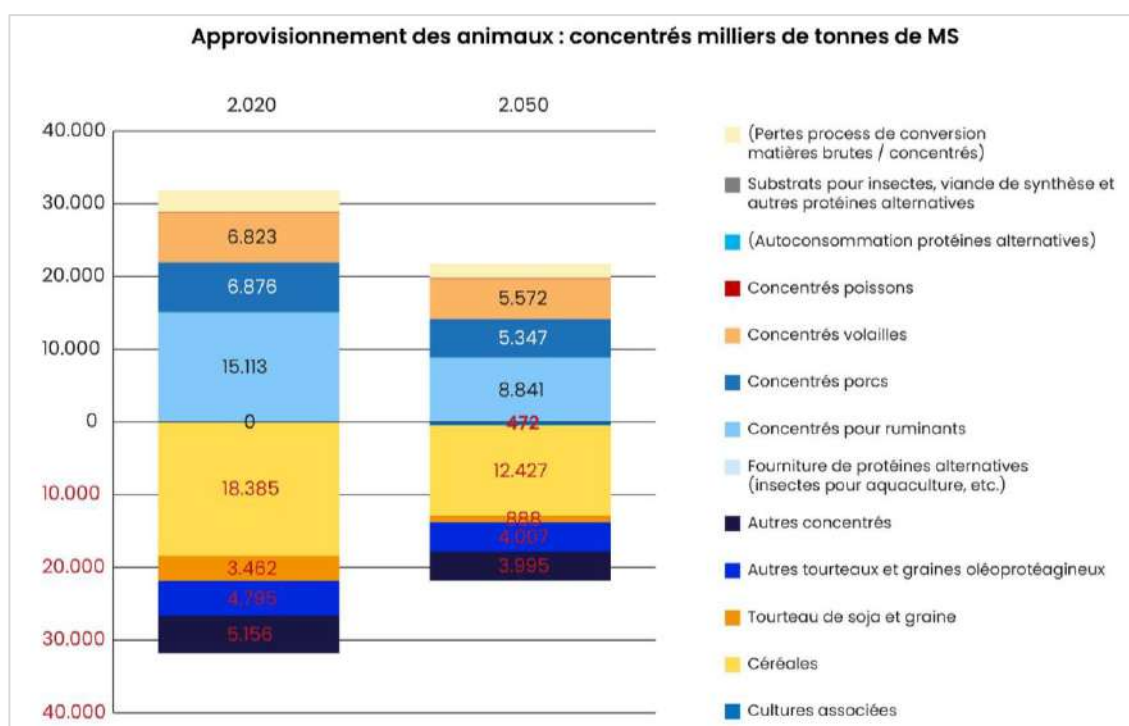


Figure 52 : Bilan des aliments concentrés⁴⁷⁹ (Mt MS) entre la situation initiale (2020) et le scénario de conciliation (2050) : les valeurs sous l'axe des abscisses correspondent aux ressources en concentrés, et les valeurs au-dessus à leurs emplois.

Ce scénario permet de réduire les concurrences entre alimentation humaine et animale, via deux leviers :

- La réduction des cheptels monogastriques, de l'ordre de 20 % à horizon 2050, et la valorisation des coproduits de l'industrie. Couplé à une hausse importante des productions de légumineuses à graines et soja, cette baisse du cheptel monogastrique contribue aussi à réduire les besoins en importations de protéines végétales (soja, graines et autres tourteaux).
- Les ruminants sont majoritairement nourris à l'herbe, avec un poids du pâturage plus important (objectif de résilience agricole), que ce soit pour les bovins lait ou bovins viande, principalement sur les prairies permanentes. La part de maïs ensilage est ainsi quasiment divisée par deux, remplacée par des prairies artificielles constituées de légumineuses fourragères contribuant à l'autonomie protéique des élevages laitiers.

Ces choix conduisent à réduire les besoins en céréales à destination des animaux de 5,9 millions de tonnes, soit près d'1/3 de moins que les besoins actuels.

⁴⁷⁹ Concentrés : aliments pour animaux à haute teneur en énergie ou en protéines : céréales, tourteaux et graines

c. Équilibre fourrager respecté ou excédentaire

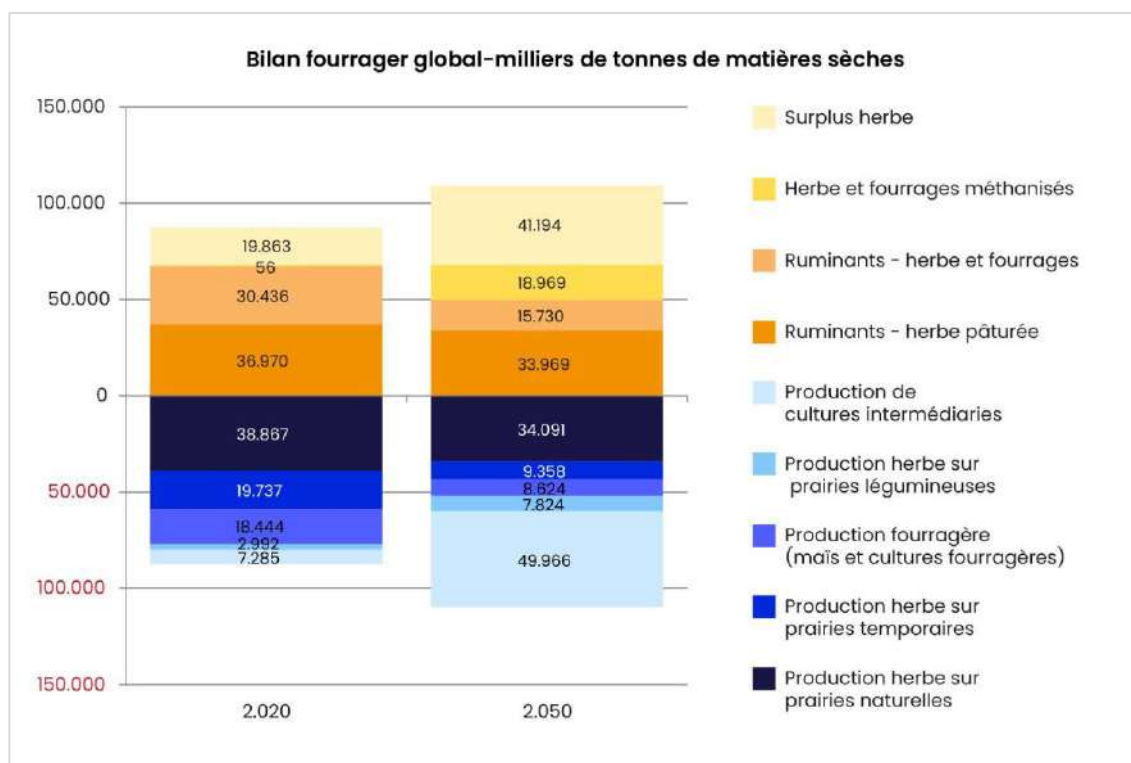


Figure 53 : Bilan fourrager global (MtMS) entre la situation initiale (2020) et le scénario de conciliation (2050)

Le bilan fourrager global (incluant toutes les productions et tous les usages des fourrages, y compris la méthanisation et la production de couverts) nous permet de nous assurer de l'existence d'un excédent important (le surplus d'herbe passe de 20 MtMS à 38 MtMS), permis par l'augmentation des couverts végétaux. L'excédent correspond à la part de biomasse qui revient au sol, permettant de contribuer à la fertilité et à la séquestration de carbone.

Pour nous assurer de la cohérence de nos hypothèses, nous avons aussi isolé le bilan herbe hors couvert pour le mettre en regard de la demande hors méthanisation : on obtient en 2050 une production totale de 67,7 MtMS, pour une demande pour les ruminants estimée à 49,7 MtMS.

Note : la variabilité inter-annuelle de la production fourragère est importante selon les conditions climatiques de l'année, et le sera d'autant plus à horizon 2050. A titre d'exemple, l'année 2020 a permis de générer un surplus d'herbe alors que 2022 a présenté un bilan fourrager déficitaire, suivie des années 2023 et 2024 qui ont permis de reconstituer des stocks.

B. Atténuer les émissions de GES du secteur

Dans la modélisation, cet objectif de décarbonation se traduit par les hypothèses suivantes :

- **Réduire les émissions de CH₄ à courte durée de vie dans l'atmosphère et à fort pouvoir réchauffant**
 - Amélioration de la conduite des troupeaux pour l'atténuation de la fermentation entérique (- 15 % d'émissions de méthane par tête grâce à l'optimisation de la conduite des troupeaux, de l'alimentation animale et la génétique bas méthane - le levier de la génétique étant activable à partir de 2030 seulement)
 - Diminution planifiée et à un rythme plus lent que le rythme actuel des effectifs de ruminants (- 30 % pour le cheptel laitier, - 25 % pour le cheptel allaitant)

Variantes sur les hypothèses concernant l'élevage

Dans le cadre des travaux de modélisation ont été étudiés plusieurs jeux d'hypothèses concernant les systèmes d'élevage (effectifs, pratiques d'atténuation, types de systèmes) dans le but de maximiser la réduction des émissions de méthane tout en limitant la diminution des effectifs (rappel : pas d'hypothèse sur l'évolution des régimes alimentaires).

Ainsi nous avons souhaité, au-delà des hypothèses prises en compte dans le scénario principal, étudier deux autres variantes qui mettent un accent plus fort sur les potentiels d'atténuation associés à la diminution de la fermentation entérique (et relativement un accent moins fort sur des besoins de diminution des effectifs) avec un objectif de limitation de l'impact sur les niveaux de production. Ces variantes diffèrent du scénario principal sur les deux leviers suivants :

- **l'amélioration de la conduite du troupeau** avec la diminution des périodes improductives (diminution de l'intervalle vêlage-vêlage, allongement des carrières - permettant *in fine* une diminution des besoins en génisses de renouvellement). Les experts sollicités indiquent que les gains associés à cette amélioration de la conduite permettraient jusqu'à **15 % de réduction des émissions de CH₄ par litre de lait produit**.

- **la sélection génétique** (formats des animaux, races mixtes, sélection génétique bas méthane). Sur ce deuxième levier, les gains attendus seraient potentiellement de 1 % par an par litre de lait, mais pas avant 2030, **soit jusqu'à 15-20 % à horizon 2050**.

Au-delà du scénario principal (- 30 % d'effectifs laitiers et - 25 % d'effectifs allaitants), une variante « médiane » sur les effectifs et une variante de « maximisation » des effectifs ont ainsi été étudiées.

La variante « maximisation » correspondrait à un maintien des effectifs laitiers entre 2030 et 2050 (contre une diminution de 9 % entre 2019 et 2024), et une diminution très limitée des effectifs allaitants (grâce au moindre besoin de génisses de renouvellement) de 2,6 % entre 2030 et 2050 (contre une diminution de 12 % entre 2019 et 2024). Il s'agit donc d'hypothèses très ambitieuses par rapport à la situation actuelle, qui nécessiteraient d'inverser totalement la dynamique actuellement en cours.

Les potentiels de gains d'émissions permis par cette variante étant fortement dépendants des efforts de sélection génétique, non attendus avant 2030, l'effectivité de ces leviers nécessite de la prudence dans les hypothèses.

Les trois options permettent néanmoins toutes de **ralentir le rythme de diminution des effectifs par rapport au rythme constaté entre 2019 et 2024**. L'effet de la diminution du cheptel "prévaut" mathématiquement par rapport à celui de l'atténuation de la fermentation entérique, celle-ci étant fonction des effectifs, et génère également des atténuations en cascade sur les émissions liées aux effluents ainsi que sur celles liées à l'alimentation animale.

Dans le scénario principal, nous privilégions le jeu d'hypothèses permettant de maximiser les réductions d'émission de méthane tout en ralentissant le rythme de diminution des effectifs, avec une hypothèse parcimonieuse sur la génétique par principe de précaution.

Ainsi le scénario principal permet de **réduire à hauteur de 30 % les émissions liées à la fermentation entérique** (contre 26 % pour la variante « médiane » et 21 % pour la variante "maximisation") **et de 58 % celles liées au stockage des effluents** (contre - 56 % pour la variante "médiane" et 53 % pour la variante « maximisation »).

Les hypothèses et résultats comparatifs des trois variantes sont présentés dans le tableau ci-dessous. Il est à noter que ces variantes ont été construites en prenant en clé d'entrée principale la question des effectifs. L'exercice pourrait être affiné et complété en donnant pour objectif à ces trois variantes d'atteindre le même montant d'émissions.

Hypothèses sur l'élevage dans les 3 variantes	Scénario principal	Variante « médiane ruminants »	Variante « maximisant les ruminants »
% atténuation de la fermentation entérique	-15 % (Alimentation : -5 % Optimisation conduite : -5 % Génétique >2030 : -5 %)	-20 % (Alimentation : -5 % Optimisation conduite : -10 % Génétique >2030 : -5 %)	-30 % (Optimisation conduite : -15 % Génétique >2030 : -15 %)
% de diminution des effectifs du troupeau laitier	-30 %	-22 %	-13 %
Soit un rythme annuel moyen (2019-2050) de :	-0,9 %/an	-0,8 %/an	-0,5 %/an
Rythme actuel (2019-2024)	-1,9%/an		
% de diminution des effectifs du troupeau allaitant	-25 %	-22 %	-15 %
Soit en rythme annuel moyen (2019-2050) de :	-1,2 %/an	-0,8 %/an	-0,6 %/an
Rythme actuel (2019-2050)	-2,6%/an		
Résultats émissions de CH ₄ lié à la fermentation entérique (kt CO ₂ e)	29 199 (-30 %)	30 744 (-26 %)	32 604 (-21 %)
Résultats émissions de CH ₄ et N ₂ O lié à la gestion des effluents (kt CO ₂ e)	2 984 (-58 %)	3 123 (-56 %)	3 313 (-53 %)

Tableau 15 : Comparaison des hypothèses et résultats des différentes variantes étudiées pour l'élevage dans le scénario conciliation

- **Réduire les volumes d'engrais azotés minéraux tout en respectant l'équilibre du bilan azoté, afin de réduire les émissions de N₂O et de CO₂ lié la fabrication et à l'utilisation des engrais minéraux**
 - Généralisation des légumineuses en cultures principales, cultures associées et dans les couverts végétaux (multiplication x 2,31 des surfaces en protéagineux et x 3,70 du soja spécifiquement, x 2,78 des surfaces en cultures fourragères légumineuses, c'est-à-dire en prairies temporaires à dominante légumineuses)
 - Maximisation du recyclage de l'azote, y compris par la méthanisation et les couverts
- **Améliorer l'efficacité énergétique, décarboner les engins, matériels et bâtiments**
 - Électrification des moteurs thermiques pour 1/3 du parc matériel à 2050
 - Utilisation de biogaz pour 1/3 du parc matériel à 2050
 - Pour les usages résiduels, utilisation de bioénergies
 - Simplification des itinéraires techniques sur un maximum de surfaces (80 % de semis direct pour les surfaces qui ne sont pas en agriculture biologique)
 - Isolation des bâtiments et bonnes pratiques d'économie d'énergie (- 20 %)
- **Produire des bioénergies a minima à hauteur des besoins du secteur**
 - Production de bioénergies pour répondre à la consommation estimée à 2050, intégrant l'énergie indirecte (minimum de 70 TWh), idéalement 100 TWh (consommation actuelle estimée)
- **Maximiser le potentiel de stockage de carbone par les prairies, l'agroforesterie et les couverts végétaux**

- Développement significatif de l'agroforesterie (10 % des terres arables et 5 % des prairies)
- Maintien de 90 % des prairies permanentes
- Généralisation des couverts végétaux (surfaces x 7,8)

a. Décarbonation du secteur

Émissions de GES du secteur agricole (kt CO ₂ e)	Situation initiale (2020)	Scénario de conciliation (2050)
Émissions directes de GES	82 314	47 971
Consommation d'énergie	9 499	2 614
Emissions directes des sols	17 526	7 740
Emissions lessivage + NH ₃	6 485	5 153
Emissions CO ₂ des sols (chaux, dolomie)	315	283
Fermentation entérique	41 418	29 199
Stockage des effluents	7 071	2 984
Émissions indirectes de GES	13 919	5 611
Fabrication de l'azote	8 669	1 597
Fabrication des autres fertilisants	1 449	1 108
Mise à disposition de l'énergie	1 334	1 144
Produits phytosanitaires	384	153
Fabrication du matériel	2 083	1 610

Tableau 16 : Émissions directes et indirectes de GES du secteur agricole dans la situation actuelle et dans le scénario de conciliation

Ce scénario permet une décarbonation du secteur agricole de **34,3 MtCO₂e sur les émissions directes** en comparaison à la situation actuelle, permettant d'atteindre l'objectif de **48 MtCO₂e de la SNBC2**. Les réductions d'émissions indirectes sont également significatives (**8,3 MtCO₂e de réduction pour atteindre un total de 5,6 MtCO₂e**).

Ce potentiel de décarbonation repose sur les trois leviers suivants, par ordre décroissant de montants d'atténuation des émissions de GES :

- **La réduction de l'utilisation des engrais azotés minéraux, qui contribue à une réduction de 18,1 MtCO₂e** (9,8 MtCO₂e pour les émissions directes des sols liées à l'épandage et la volatilisation de N₂O, 1,3 MtCO₂e pour les émissions liées au lessivage et à la volatilisation de NH₃ et 7 MtCO₂e pour les émissions indirectes liées à la fabrication des engrais).
La réduction de l'utilisation des engrais azotés dans ce scénario laisse ressortir des valeurs en rupture avec la situation actuelle, très ambitieuses, avec une **baisse de ces engrais de l'ordre de -70 %**. Cette valeur est une donnée de sortie de MoSUT, liée à plusieurs leviers mis en oeuvre simultanément :
 - L'augmentation très importante de la fixation symbiotique (x 2,35 pour avoisiner les 1 million de tonnes) à l'échelle du territoire national, grâce à la hausse des surfaces en légumineuses qui, par substitution à des cultures plus demandeuses d'azote, diminuent également la demande totale en azote.
 - L'augmentation des taux de recyclage de l'azote via la généralisation des couverts végétaux, qu'ils soient laissés au champ ou méthanisés, et la méthanisation de 50 % des déjections des

- animaux en bâtiments (ce levier permet aussi de diviser par 2 les émissions de méthane et de N₂O des déjections animales lors du stockage).
- Une amélioration de l'efficacité de l'épandage de l'azote organique (enfouissement généralisé).
 - L'augmentation jusqu'à 25 % des surfaces cultivées conduites en agriculture biologique.
- **La diminution des émissions de méthane liées aux élevages, qui contribue à une réduction de plus de 16,3 MtCO₂e.** L'amélioration de la conduite des troupeaux et la diminution des effectifs contribuent à hauteur de 12,2 MtCO₂e et l'amélioration de la gestion des effluents à hauteur de 4,1 MtCO₂e. Il est à noter que les leviers considérés dans l'hypothèse de diminution de la fermentation entérique unitaire sont ici considérés de façon parcimonieuse. En effet, les gains permis par la génétique ne sont attendus qu'à horizon 2030. Cela a donc une importance particulière pour la dynamique de décarbonation du secteur de l'élevage, pour laquelle l'effort restant entre 2030 et 2050 reste important.
 - **Enfin, la décarbonation des usages directs de l'énergie, qui contribue à une réduction de 6,9 MtCO₂e.** Les principaux leviers permettant une diminution de la demande ainsi que la décarbonation de la consommation d'énergie sont les suivants :
 - L'électrification de 1/3 du parc machine (des tracteurs de faible puissance, automoteurs ou robots ayant des besoins en puissance relativement contenus, ou utilisés sur des périodes de temps suffisamment courtes : pulvérisateurs, mélangeuses à aliments pour les élevages, valets de ferme, chargeurs, etc.).
 - Le passage au biogaz de 1/3 du parc, sur des tracteurs intermédiaires (80-120 CV), dont certains pourraient être issus d'un retrofit, en mesure de réaliser la plupart des opérations agricoles malgré la contrainte de pouvoir être rechargés après une demi-journée de travail environ.
 - L'équipement du dernier tiers du parc, constitué de tracteurs les plus puissants ainsi que les machines de récolte (moissonneuses, ensileuses, etc.) par des moteurs compatibles avec l'utilisation de biocarburants.

Les potentiels d'auto-consommation sont également significatifs et potentiellement prometteurs en matière d'autoconsommation ou de génération d'excédent pour contribuer à la décarbonation du reste de la société : l'objectif de 100 % d'énergie décarbonée utilisée par le secteur peut être atteint si le biocarburant produit est effectivement affecté aux usages agricoles.

Cette autoconsommation ne consiste pas en un effacement de la demande, mais correspond à la production moins la consommation d'énergie via des vecteurs que l'agriculture est en mesure de produire.

b. Stockage de carbone agricole

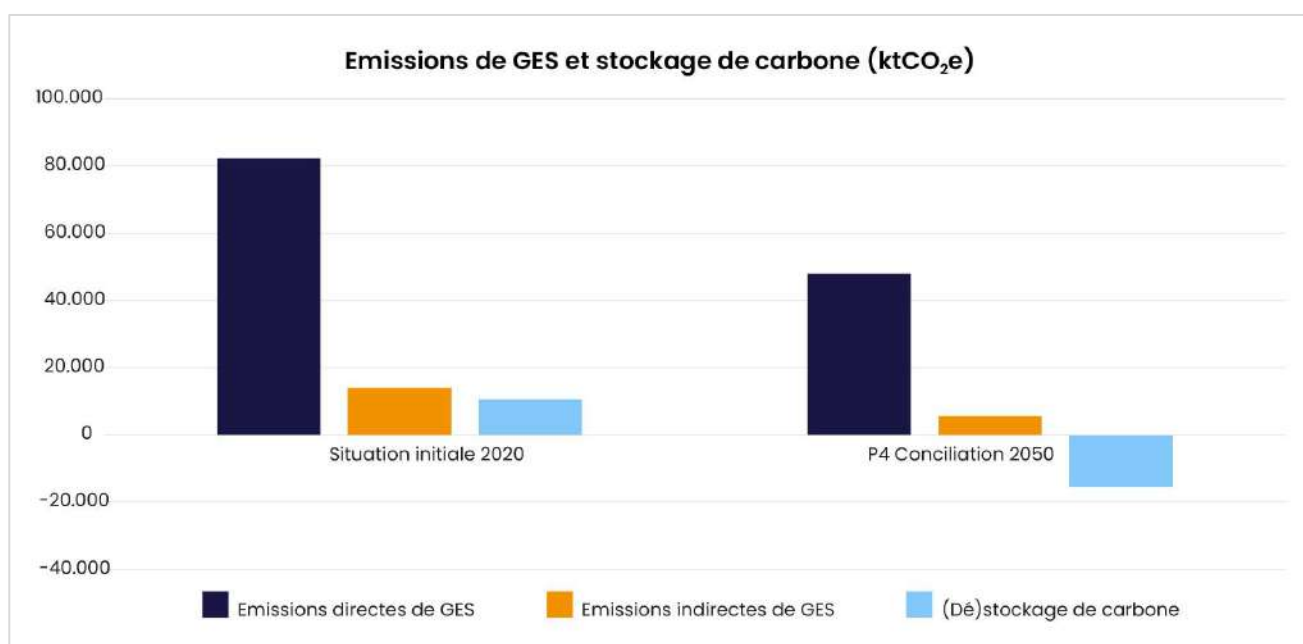


Figure 54 : Émissions directes, indirectes et potentiel de stockage ou déstockage (ktCO₂e) entre situation actuelle et scénario de conciliation

Le stockage de carbone agricole additionnel dans les sols et la biomasse ligneuse représenterait quant à lui un potentiel d'atténuation global de **15,6 MtCO₂e**.

Ce potentiel doit être envisagé comme un potentiel minimum au vu des hypothèses parcimonieuses considérées. Il est ainsi nettement inférieur aux estimations réalisées dans les différents travaux de synthèse sur le sujet (présentés en partie III.5). En effet, si les hypothèses de déploiement de certaines pratiques stockantes sont similaires (semis direct déployé sur environ 65 % des surfaces en grandes cultures, soit environ 12 Mha, cultures intermédiaires déployées sur environ 93 % des surfaces en grandes cultures, soit environ 16 Mha), les hypothèses du scénario de conciliation concernant le développement de l'agroforesterie et des haies sont nettement inférieures : l'agroforesterie intra-parcellaire n'est déployée « que » sur 1,9 Mha - ce qui correspond déjà à une multiplication par 10 des surfaces (contre 5,3 Mha soit 31 % de la surface en grandes cultures dans l'étude « 4 pour 1000 »), et les haies sur 2,1 Mha (contre 4 fois plus dans l'étude « 4 pour 1000 »). Par ailleurs, les surfaces de prairies temporaires sont réduites de 20 % dans le scénario. Enfin, la perte de 10 % des surfaces en prairies permanentes* engendre un déstockage de carbone important, ayant un impact significatif dans ce différentiel. La mobilisation de ces surfaces pour le développement de vergers, et un déploiement plus ambitieux de l'agroforesterie permettraient ainsi respectivement de limiter le déstockage et d'augmenter significativement le potentiel de stockage à horizon 2050, sous réserve qu'il soit attractif techniquement et économiquement pour les agriculteurs.

* Pour rappel, il ne s'agit pas de l'hypothèse initiale de construction du scénario, mais bien d'une sortie du modèle.

En simulant le fait que les émissions peuvent être « réduites » des potentiels de stockage, ou « augmentées » des phénomènes de déstockage, **la situation initiale affiche un bilan « net » d'environ 107 MtCO₂e d'émissions annuelles, alors que le scénario de conciliation 2050 présente un bilan « net » d'environ 38 MtCO₂e émis chaque année.**

- la situation initiale génère en effet un déstockage de carbone à hauteur de 10,5 MtCO₂e annuelles (comptabilisé en positif au même titre que des émissions) ;
- le scénario de conciliation à 2050 génère un stockage de carbone additionnel annuel de 15,5 MtCO₂e (comptabilisé en négatif au titre d'un potentiel d'atténuation des émissions) principalement lié au

développement de l'agroforesterie et des cultures intermédiaires, dans une moindre mesure du semis direct et des haies.

S'il permet de mettre en avant le potentiel important de compensation des émissions résiduelles grâce aux pratiques de stockage, ce résultat exprimé sous la forme de bilan « net » ne saurait être valorisé en tant que tel dans la comptabilité carbone nationale, notamment du fait que les potentiels de stockage agricole sont réversibles (relargage possible si la pratique n'est pas maintenue) et temporaires (l'état d'équilibre étant généralement atteint au bout d'une trentaine d'années, en fonction des pratiques et des compartiments concernés (sol ou biomasse ligneuse). Par ailleurs, ce potentiel est également soumis aux effets du changement climatique, chroniques comme aigus, dont l'impact notamment à l'échelle régionale peut être significatif (cf. partie II - 3 - C).

Pratiques stockantes étudiées dans le scénario de conciliation	Déploiement par rapport à la situation initiale 2020	Contribution au potentiel de stockage total du scénario
Agroforesterie (75 arbres/ha, lignes espacées de 24m)	+1,9 Mha	41%
<i>Agroforesterie sur terres arables</i>	+1,6 Mha	35%
<i>Agroforesterie sur prairies</i>	+ 0,3 Mha	6%
Haies (60 mlha)	+2,07 Mha	10%
<i>Haies (IAE) sur terres arables</i>	+1,13 Mha	7%
<i>Haies (IAE) sur prairies</i>	+0,94 Mha	3%
Cultures intermédiaires	Surfaces x 7,9 (16 Mha)	31%
Semis direct	Surfaces x 17,7 (12 Mha)	12%
Enherbement des vignes et vergers	0,73 Mha	6%

Tableau 17 : Contribution des différentes pratiques stockantes étudiées dans le scénario de conciliation au potentiel de stockage de carbone dans les sols et la biomasse (ordres de grandeur basés sur les pratiques stockantes, hors déstockage)

L'analyse de la contribution relative des différentes pratiques stockantes déployées dans ce scénario souligne l'importance de l'agroforesterie et des couverts végétaux à l'atteinte du potentiel global, avec un potentiel de déploiement envisageable encore plus massif de l'agroforesterie et des haies.

Les hypothèses retenues pour les différentes pratiques concernant le calcul du stockage de carbone dans les sols et dans la biomasse ligneuse prennent en compte les modifications d'émissions liées à la mise en œuvre de ces pratiques. Elles sont les suivantes (pour plus de précisions, se référer à la note méthodologique) :

- **Agroforesterie : 1 260 kgC/ha/an soit 4 621 kgCO₂e/ha/an** (dont 759 kgCO₂e/ha/an dans le sol et 3 300 kgCO₂e/ha/an dans la biomasse)
- **Haies : 334 kgC/ha/an soit 1 223 kgCO₂e/ha/an** (dont 61 kgCO₂e/ha/an dans le sol et 1 223 kg CO₂e/ha/an dans la biomasse)
- **Cultures intermédiaires : 112 kgC/ha/an soit 411 kgCO₂e/ha/an** (463 kg CO₂e/ha/an sont stockés dans le sol mais les pratiques agricoles associées génèrent des émissions de CO₂ et de N₂O)
- **Semis direct : 55 kgC/ha/an soit 203 kg CO₂e/ha/an** (219 kgCO₂e/ha/an sont stockés dans le sol mais les pratiques agricoles associées génèrent des émissions de N₂O)
- **Enherbement des vignes et vergers : 160 kgC/ha/an** (pour un enherbement hivernal) à **490 kgC/ha/an** (pour un enherbement permanent). Pas de bilan réalisé sur l'ensemble des GES.

c. Réduction des émissions liées à l'alimentation animale importée

Émissions de GES des importations (kt CO ₂ e)	Situation initiale (2020)	Scénario de conciliation (2050)
Céréales et maïs (tous usages)	329	293
Tourteaux, huiles, oléoprotéagineux (tous usages)	3 393	1 477

Tableau 18 : Émissions de GES liées à certaines catégories de produits agricoles importés

La réduction des émissions liées aux importations notamment d'alimentation animale permet également de générer une réduction des autres émissions indirectes, pour un ordre de grandeur d'environ **1,9 MtCO₂e**, **principalement liée à la réduction des importations d'oléoprotéagineux.**

Le modèle ne nous permet pas de savoir quels flux d'importations sont attribués spécifiquement à l'alimentation animale, il s'agit donc ici d'une approximation.

d. Équilibre du bilan azoté

Bilan azoté (en k tonnes de N pur)	Situation initiale (2020)	Scénario de conciliation (2050)
Engrais minéraux	1 808,5	576
Fixation symbiotique	394	929
Recyclage (redéposition atmosph., pâture, végétaux laissés au champ)	2 364	1 854
Recyclage (engrais verts)	286	1 368
Recyclage (épandage fumier, lisier)	870	299
Recyclage (épandage digestat)	66	1 012
Exportations par les fourrages et pâture	1 053	924
Exportations par les cultures (et couverts exportés)	3 184	3 909
Volatilisation	730	393
Solde au sol	821	812
Solde au sol (kg/ha)	29	30,1

Tableau 19 : Décomposition du bilan azoté (situation actuelle et scénario de conciliation)

Entrées d'azote *en vert* / Sorties *en rouge*

L'équilibre du bilan azoté est respecté grâce à l'action combinée de trois paramètres : l'augmentation significative de la fixation symbiotique (x 2,35) liée aux surfaces en légumineuses, celle des couverts végétaux (recyclage engrais verts x 4,8) permettant la diminution conséquente de l'utilisation des engrais minéraux (division par 3,6) et de la volatilisation associée (divisée par 2). L'épandage des digestats issus de la méthanisation (à hauteur de 1 million de tonnes d'azote pur) contribuent également à fournir une fertilisation plus facilement pilotable, se substituant bien aux formes minérales pour les apports en cours de développement des cultures.

C. Assurer la résilience du secteur agricole

Dans la modélisation, cet objectif de résilience se traduit par les hypothèses suivantes, les trois premiers jeux étant également déclinés dans l'objectif de décarbonation :

- **Améliorer l'efficacité énergétique, décarboner les engins, matériels et bâtiments**
 - Électrification des moteurs thermiques pour 1/3 du parc matériel à 2050
 - Utilisation de biogaz pour 1/3 du parc matériel à 2050
 - Pour les usages résiduels, utilisation de bioénergies
 - Simplification des itinéraires techniques sur un maximum de surfaces (80 % de semis direct pour les surfaces qui ne sont pas en agriculture biologique)
 - Isolation des bâtiments et bonnes pratiques d'économie d'énergie (20 %)

- **Produire des bioénergies a minima à hauteur des besoins du secteur**
 - Production de bioénergies pour répondre à la consommation estimée à 2050, intégrant l'énergie indirecte (minimum de 70 TWh), idéalement 100 TWh (consommation actuelle estimée)
 - A cela s'ajoute un potentiel de déploiement des panneaux photovoltaïques que ce soit sur les bâtiments ou les champs (agrivoltaïsme) (non comptabilisé dans le travail de projection)

- **Réduire les volumes d'engrais azotés minéraux tout en respectant l'équilibre du bilan azoté, afin de réduire les émissions de N₂O et de CO₂ lié la fabrication et à l'utilisation des engrais minéraux**
 - Généralisation des légumineuses en cultures principales, cultures associées (multiplication x 2,31 des surfaces en protéagineux et x 3,70 du soja spécifiquement) et dans les couverts végétaux (x 2,78 des surfaces en cultures fourragères légumineuses c'est-à-dire en prairies temporaires à dominante légumineuses)
 - Maximisation du recyclage de l'azote, y compris par la méthanisation et les couverts

- **Limitier le report sur les engrais de synthèse lié à la moindre disponibilité de la fertilisation organique**
 - Développement significatif des surfaces en légumineuses : x 2,78 des surfaces en légumineuses fourragères, x 2,31 en autres protéagineux, x 3,70 spécifiquement sur le soja
 - Limitation de l'intensification de la fertilisation des prairies
 - Développement du recyclage local des nutriments, idéalement à proximité des gisements (polyculture-élevage ou coproduits)

- **Favoriser les systèmes d'élevage efficaces énergétiquement et résilients**
 - Maintien de 90 % des surfaces de prairies permanentes
 - Développement significatif des surfaces de légumineuses fourragères (x 2,78)
 - Augmentation significative des systèmes pâturants pour les ruminants : 80 % de systèmes bovins viande « plus pâturants » contre 60 % dans la situation initiale ; choix d'un scénario « beaucoup plus de pâturage » pour les systèmes bovins lait (70 % de systèmes à dominante pâturage vs. 40 % dans la situation initiale)
 - Augmentation de l'autonomie protéique et fourragère : diminution de 40 % des surfaces en maïs ensilage, multiplication par 3,70 des surfaces en soja et par 2,31 des surfaces en autres protéagineux

- Concernant l'adaptation de l'agriculture aux aléas climatiques et écosystémiques, il ne nous a pas été possible de définir d'hypothèses quantitatives compte-tenu du périmètre utilisé pour la modélisation (échelle nationale, rendements moyens), de la granulométrie des hypothèses d'entrée (grandes catégories de productions) et de la logique d'équilibrage du modèle (plusieurs objectifs à atteindre via une approche itérative). Néanmoins les hypothèses sur les assolements (augmentation des surfaces en légumineuses, maintien des prairies permanentes) et sur les systèmes d'élevage peuvent contribuer à une meilleure adaptation (allongement des rotations, diversification des assolements, meilleure autonomie des élevages). Les hypothèses portant sur le développement des puits de carbone (agroforesterie, haies, couverts végétaux) contribuent également à une plus forte robustesse vis-à-vis des aléas climatiques et écosystémiques.

Résilience énergétique : diminution de la consommation d'énergie et production d'énergie

Consommation énergétique (en GWh)	Situation actuelle (2020)	Scénario de conciliation (2050)
Énergie directe	54 129	42 967
ED : Carburant (ou biocarburant)	31 625	8 351
ED : Electricité	10 484	13 593
ED : Gaz (ou biogaz)	11 613	17 403
ED : Biomasse solide (bois etc)	407	3 621
Énergie indirecte	44 346	20 272
EI : fabrication engrais azotés	26 641	7 154
EI : autres intrants	10 459	6 858
EI : fabrication du matériel	7 246	6 260

Tableau 20 : Consommations énergétiques du secteur agricole (situation actuelle et scénario de conciliation)

Production énergétique (GWh)	Situation actuelle (2020)	Scénario de conciliation (2050)
Production totale	56 427	161 720
Biogaz	3 104	86 005
Biocarburants liquide	39 803	58 174
Biomasse solide (hors forêt)	13 521	17 540

Tableau 21 : Production énergétique par le secteur agricole (situation actuelle et scénario de conciliation)

La partie précédente portant sur l'objectif de décarbonation a permis d'illustrer les résultats liés aux évolutions de consommation et de production d'énergie en termes d'émissions de GES. Présentés en termes de **contribution à la résilience énergétique** (moins dépendance), les résultats obtenus sont les suivants :

- Réduction des consommations d'énergie : 21 % sur l'énergie directe et 46 % sur l'énergie indirecte
- Production d'énergie : multiplication par 28 de la production de biogaz (atteignant 86 TWh) et augmentation de 46 % de la production de biocarburants (atteignant 58 TWh).

Au global, la production d'énergie apparaît significativement supérieure (x 2,5) à la consommation d'énergie : 161,7 TWh produites pour une consommation estimée à 63,2 TWh.

Par ailleurs, au-delà des ressources utilisées pour la production de biocarburants et de biogaz, les ressources en bois-énergie en très forte augmentation (développement significatif de l'agroforesterie et des linéaires de haies) ne sont pas chiffrées ici.

D. Contribuer à la résilience globale de la société

L'objectif de résilience globale se traduit par les hypothèses suivantes :

- **Assurer une fourniture d'énergie et de ressources régulière, en quantité soutenable pour les agroécosystèmes et limitant les concurrences avec l'alimentation humaine**
 - Maintien d'un cheptel de ruminants permettant la valorisation de surfaces non concurrentielles avec l'alimentation humaine (ralentissement du rythme de baisse des effectifs, et maintien de 90 % des surfaces en prairies permanentes*)
 - Maximisation de la valorisation de coproduits par les monogastriques et diminution des effectifs pour limiter la concurrence avec l'alimentation humaine (- 20 % d'effectifs)
 - Valorisation des excédents potentiels de biomasse à des fins énergétiques

- **Préserver et restaurer la biodiversité, conserver des espaces naturels ouverts et des terres susceptibles de servir de zones d'expansion des crues tout en assurant une protection physique des sols**
 - Maintien d'un maximum de surfaces en prairies permanentes (90 %), y compris avec baisse du taux de chargement si nécessaire
 - 75 % des surfaces en grandes cultures en agriculture intégrée, 25 % en agriculture biologique, d'où une diminution de 50 % de l'usage des produits phytosanitaires
 - Développement significatif de l'agroforesterie et des haies : 10 % des terres arables, 5 % des prairies
 - Allongement des rotations et diversification des assolements (légumineuses fourragères et autres protéagineux, couverts végétaux)

- **Favoriser la sobriété des usages de l'eau**
 - Maîtrise de la hausse de la demande en irrigation (diversification des assolements avec des cultures plus sobres en eau, doublement des surfaces en fruits et légumes mais diminution de 40 % des surfaces en maïs grain)

a. Bilan des surfaces et usages non alimentaires de la biomasse : non concurrence d'usages

Surfaces allouées à l'alimentation animale (kha)	Situation actuelle (2020)	Scénario de conciliation (2050)
Total des surfaces allouées à l'alimentation animale	18 878	14 171
Surfaces de prairies permanentes	9 317	8 327
Surfaces de cultures fourragères (dont ensilage de maïs et prairies temporaires ou artificielles)	4 586	2 601
Surfaces de cultures de graines	4 975	3 243

Tableau 22 : Surfaces allouées à l'alimentation animale (kha) (situation actuelle et scénario de conciliation)

La conjugaison des hypothèses actionnées sur les systèmes d'élevage (diminution des cheptels, valorisation pour l'alimentation animale de biomasse non concurrentielle avec l'alimentation humaine, maintien des surfaces de prairies permanentes*, diminution des surfaces en maïs ensilage) **permet une diminution globale des surfaces allouées à l'alimentation animale de 25 %**. Dans le même temps, les cheptels diminuent certes du même ordre de grandeur, mais la production de l'alimentation animale est relocalisée sur le territoire (facteur d'importation divisé par 4).

Hors prairies permanentes, les surfaces dédiées à l'alimentation animale passeraient de 52 % des surfaces de terres arables (32 % de la SAU) en 2020 à 32 % de terres arables en 2050 (20 % de la SAU).

** Notre première intention était de conserver 98 % des prairies permanentes : or le modèle utilisé établit une réallocation des surfaces par rapport aux hypothèses d'assolement saisies en entrée, et intègre potentiellement une corrélation mathématique avec la diminution de cheptels et les scénarios d'élevage considérés. En sortie de modèle, ces résultats aboutissent à une réduction de 10 % de leur surface.*

Usages non alimentaires de la biomasse	Situation actuelle (2020)	Scénario de conciliation (2050)
Quantités de biomasse disponibles pour des usages non alimentaires en méthanisation (ktMS)	1 182	29 623
Fumier méthanisé	972	3 887
Lisier méthanisé	155	731
Résidus de culture méthanisés	0	6 065
CIVE méthanisée	56	14 540
Herbe méthanisée	0	24
Fourrages méthanisés	0	4 405
Production de biogaz à partir de biomasse non alimentaire (TWh PCs)	3	82
Production de biogaz - déjections	3	11
Production de biogaz - CIVE	0	49
Production de biogaz - résidus de culture	0	11
Production de biogaz - herbe	0	0
Production de biogaz - fourrages	0	11
Quantités de biomasse disponibles pour d'autres usages non alimentaires (ktMS)	90 311	90 011
Résidus de culture utilisés en combustion	831	0
Résidus de culture utilisés en carburant 2G	831	6 065
Résidus de culture utilisés comme matériau	831	3 032
Résidus de culture utilisés en litière	6 305	3 455
Résidus de culture laissés au champ	74 284	42 032
Cultures intermédiaires laissées au champ	7 229	35 426

Tableau 23 : Usages non alimentaires de la biomasse (méthanisation et autres usages non alimentaires) (situation actuelle et scénario de conciliation)

Par ailleurs, la quantité de biomasse disponible pour des usages non alimentaires en méthanisation est multipliée par 25, grâce aux excédents de fourrages, de couverts végétaux et à l'augmentation significative des volumes de déjections méthanisées. La quantité de biomasse disponible pour d'autres usages non alimentaires est au global maintenue mais avec une répartition qui s'inverse : la part des résidus de cultures valorisés vers les biocarburants de 2ème génération et les biomatériaux augmente, mais est compensée par une augmentation de la part des cultures intermédiaires laissés aux champs, ce qui vise à garantir le maintien des équilibres minéraux dans les parcelles agricoles.

b. Limitation de la hausse de la demande en irrigation

Surfaces et volumes d'eau pour l'irrigation	Situation actuelle (2020)	Scénario de conciliation (2050)
Surfaces irriguées (kha)	1 518	1 907
Céréales hors maïs	347	444
Maïs	557	371
Légumes, fruits	487	1 048
Volumes d'eau pour l'irrigation (M m³)	1 870	2 475
Maïs	720	626

Tableau 24 : Surfaces et volumes d'eau pour l'irrigation (situation actuelle et scénario de conciliation)

Le modèle propose une estimation des besoins en eau sur la base des assolements : **les surfaces irriguées⁴⁸⁰ augmentent de 25 % tandis que les volumes augmentent de 32 %**. Le scénario Conciliation, par sa réduction des surfaces en maïs, permet de contenir l'impact de la hausse de la demande en eau pour cette production (de 1293 m³/ha à 1687 m³/ha en 2050, soit une hausse de 30 %/ha), cependant, les surfaces en légumes et céréales conduisent à une hausse des besoins totaux en eau dans ce scénario.

Ce résultat reste sujet à discussion car, faute de régionalisation du modèle, nous n'avons pas fait d'hypothèses sur les besoins d'irrigation de chaque culture par unité de surface à horizon 2050. Il permet néanmoins de constater un enjeu clé, à savoir que la production de légumes conduit à une hausse des surfaces irriguées (condition nécessaire à la sécurisation de la production légumière), et les effets du climat sont susceptibles de générer également une hausse de la demande. Cet enjeu lié à la quantité d'eau disponible pour l'irrigation n'a pas été approfondi dans le cadre de ce rapport, mais est un sujet majeur pour l'adaptation aux changements climatiques.

⁴⁸⁰ Surfaces irriguées = nécessitant des infrastructures d'irrigation, mais non nécessairement en fonctionnement sur une campagne agricole

5. Synthèse du scénario de conciliation

A. Contribution des différents leviers à l'objectif de décarbonation

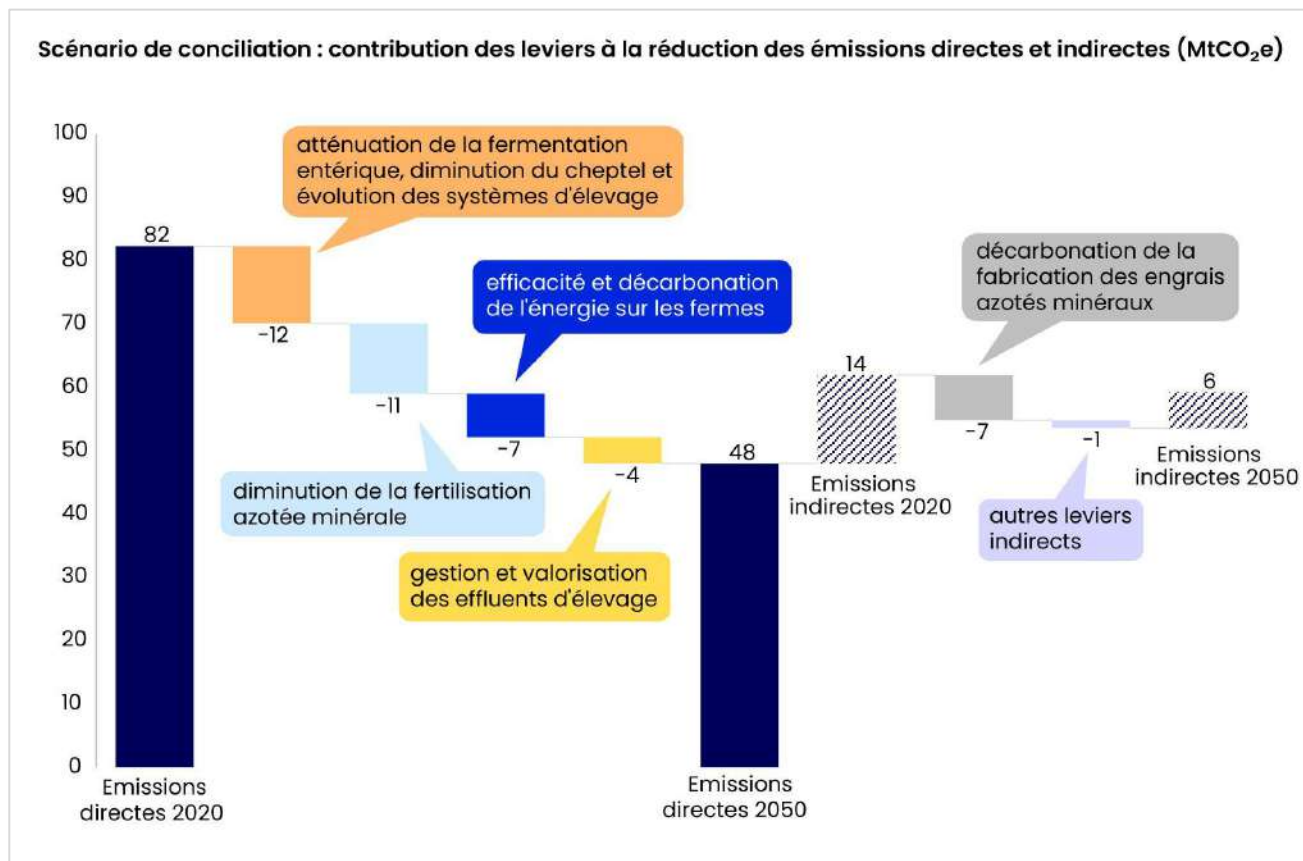


Figure 55 : Contribution des différents leviers de décarbonation dans le scénario conciliation à horizon 2050 (ktCO₂e)

La visualisation de la contribution des différentes familles de leviers de décarbonation envisagés dans le scénario de conciliation fait apparaître d'une part celles dont l'impact est le plus significatif et donc intéressantes à mobiliser, d'autre part met en lumière le fait que d'autres concernent les émissions indirectes avec néanmoins des potentiels d'atténuation significatifs. Par ailleurs, la plupart de ces familles de leviers présentent d'autres co-bénéfices sur les enjeux environnementaux (résilience, biodiversité, contribution aux autres secteurs), renforçant l'intérêt de leur mobilisation.

Ainsi, si le levier d'atténuation de la fermentation entérique et de diminution du cheptel est le premier poste d'atténuation dans ce scénario, il est suivi de près par la diminution de la fertilisation azotée minérale, englobant plusieurs leviers dont en particulier le développement des légumineuses, et par la décarbonation de la fabrication des engrais minéraux azotés dont le potentiel est intéressant à soulever.

Comme attendu, la part de CO₂ dans les émissions de GES du secteur agricole étant faible, l'efficacité énergétique et la décarbonation de l'énergie sur les fermes n'intervient qu'en troisième position en termes d'atténuation des GES, mais représente un potentiel significatif en termes de résilience énergétique pour les agriculteurs, de la même façon que la gestion et la valorisation des effluents d'élevage qui ont par ailleurs pour intérêt de réduire les émissions de CH₄ à fort pouvoir réchauffant.

Note : dans le modèle utilisé pour la modélisation des différents scénarios étudiés, et notamment du scénario de conciliation, la décarbonation de la fabrication des engrais n'est pas poussée au maximum de la décarbonation possible, la technologie considérée étant celle de la catalyse simple. Les calculs réalisés a

posteriori de l'exercice de modélisation en utilisant une technologie décarbonante indiquent un potentiel d'atténuation supplémentaire de 1,5 MtCO₂e sur ce poste.

B. Vision dynamique de l'activation des leviers à horizon 2050

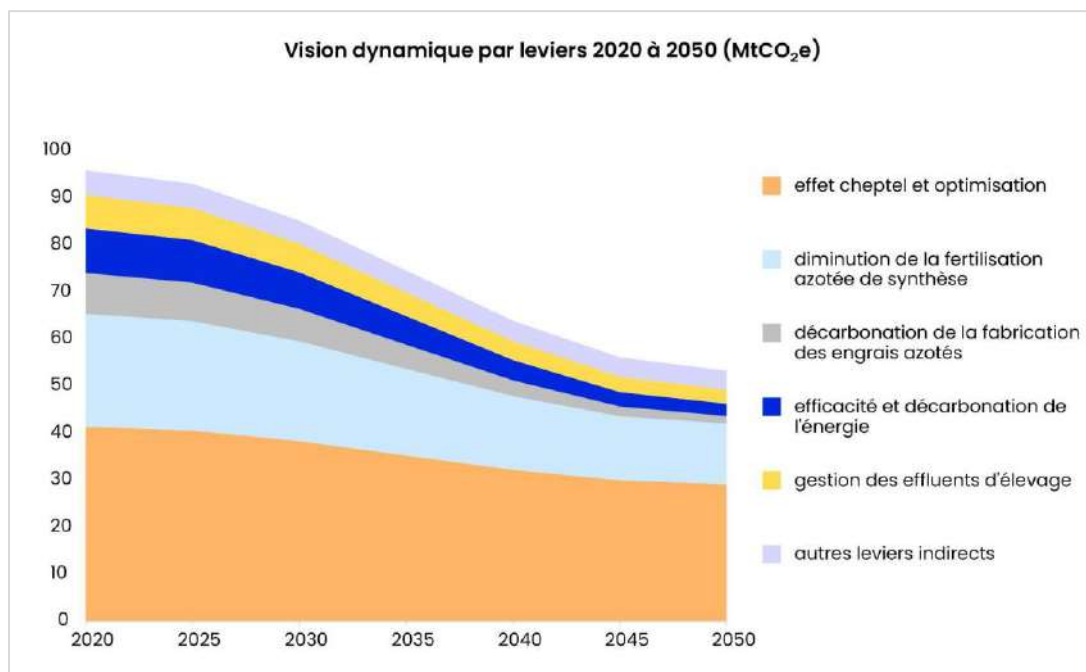


Figure 56 : Vision dynamique des leviers mobilisés dans le scénario de conciliation

Source : The Shift Project

Certains leviers techniques ne pourront entrer en vigueur qu'après un certain délai (par exemple, la génétique animale bas méthane étant une recherche en cours, avec des délais de sélection importants, elle ne pourra avoir d'effet que progressivement à partir de 2030-2035) d'autres sont liés au temps de renouvellement (investissement dans un parc machines décarboné par exemple).

La modélisation dynamique proposée par MoSUT vise à illustrer cette dynamique d'adoption des leviers par une fonction sigmoïde (courbe en S) intégrée directement dans le modèle. Cette dynamique inhérente au modèle MoSUT nous conduit à estimer le point de passage à 2030 en léger décalage avec les objectifs de la SNBC2 tels que portés par le SGPE, qui fixe les émissions en 2030 à 68 MtCO₂e là où notre scénario fait porter plus d'efforts sur la partie 2030-2040, en passant sur cette période de 73,7 à 56,5 MtCO₂e.

C. Quel impact d'aléas aigus sur cette projection ?

Les projections proposées dans le présent rapport, et notamment celle du scénario de conciliation, présentent un certain nombre de limites liées à l'exercice de modélisation à horizon 2050.

a. Impact d'aléas climatiques aigus

Il est particulièrement complexe d'estimer de manière quantitative et sur un assolément moyen à l'échelle France les vulnérabilités du système de production face aux aléas climatiques aigus et donc les impacts sur les rendements. Il est d'autant plus complexe d'estimer les impacts sur les productions animales qui sont liés à la fois aux effets sur les cultures destinées à l'alimentation animale mais également aux effets sur les animaux eux-mêmes et leur productivité.

Nous limitons donc cet exercice aux productions végétales uniquement, pour lesquelles les experts sollicités indiquent un ordre de grandeur de l'impact d'une « mauvaise année » de l'ordre de 20 % de perte de rendements moyens, à une fréquence d'environ 1 année sur 5.

Simulation d'aléas climatiques sur le potentiel nourricier à 2050 des productions végétales	Situation initiale 2020 sans aléa	S4 Conciliation 2050 sans aléa	S4 Conciliation 2050 avec aléa -20 % de rendements
Productions végétales			
Énergie (Gcal végétales)	129 591 083	92 568 184	74 054 547
Protéines (t de protéines végétales)	2 173 599	1 576 293	1 261 035
Potentiel nourricier selon les ARQ (nombre de personnes nourries par an)			
Potentiel nourricier selon l'énergie végétale	101 441 161	72 460 418	57 968 334
Potentiel nourricier selon les protéines végétales	59 550 658	43 186 116	34 548 893
Potentiel nourricier selon les BMQ (nombre de personnes nourries par an)			
Potentiel nourricier selon l'énergie végétale	131 497 801	93 930 171	75 144 137
Potentiel nourricier selon les protéines végétales	113 429 825	82 259 268	65 807 415

Tableau 25 : Simulation d'aléas climatiques sur le potentiel nourricier des productions végétales (situation actuelle et scénario de conciliation)

Une mauvaise année telle que celle-ci affecterait les productions végétales à hauteur d'environ 18 millions de gigacalories végétales et 315 milliers de tonnes de protéines végétales produites en moins, qui ne seraient plus disponibles pour l'alimentation humaine ou animale. Ainsi, uniquement sur le périmètre des productions végétales, le potentiel nourricier de l'année considérée pourrait diminuer, selon l'indicateur retenu (énergie ou protéines), d'un ordre de grandeur de **8 à 15 millions de personnes nourries en moins selon les ARQ, tout en restant supérieur aux besoins de la population française en BMQ.**

b. Impact de crises énergétiques

Concernant la vulnérabilité du système productif face à la disponibilité en gaz (donc en engrais) et en pétrole, les effets potentiels sur les rendements seraient également significatifs. Cependant nous avons d'ores et déjà considéré dans notre scénario de conciliation une très forte baisse de la dépendance énergétique (division par 4 des engrais azotés minéraux, décarbonation du matériel et des engins agricoles et production d'énergies renouvelables). Les engrais azotés minéraux résiduellement utilisés pourraient être produits à partir d'électricité ; **la vulnérabilité vis-à-vis de la disponibilité en énergie, si elle portait sur une assiette significativement moindre, resterait particulièrement critique. Elle inciterait à viser une stabilité des rendements interannuelle plutôt que l'optimisation annuelle. Ainsi, pour produire cette part d'engrais résiduelle, la dépendance énergétique porterait donc sur de l'électricité, secteur sur lequel de fortes concurrences d'usage sont attendues à horizon 2050.**

D. Points d'arbitrage et conditions de mise en oeuvre

Ce scénario permet d'identifier la nécessité de :

- **Développer de manière très significative les productions végétales à bas niveau d'intrants** (et en particulier les légumineuses), aux multiples intérêts vis-à-vis des objectifs poursuivis : atténuation des

émissions, moindre dépendance à la fertilisation azotée minérale, meilleure autonomie fourragère et protéique des élevages français, diversification des assolements et allongements des rotations, donc plus globalement une meilleure résilience des systèmes ;

- **Réduire les dépendances de la France aux importations** de protéines végétales et de fruits et légumes, pour accroître la résilience énergétique et climatique de l'alimentation.
- **Planifier l'évolution du secteur de l'élevage** afin de permettre la réalisation de l'effort nécessaire en termes de réduction des émissions de méthane (surtout entre 2030 et 2050), en mobilisant à la fois les leviers d'optimisation mais également en planifiant l'évolution (mesurée) des effectifs et en favorisant les systèmes les plus autonomes et économes ;
- **Mettre en oeuvre la décarbonation de l'énergie directe et indirecte** dont dépend le secteur (en particulier concernant l'électrification des engins et matériels agricoles et la décarbonation de la fabrication des engrais) ;
- **Organiser et partager les voies de valorisation de la biomasse** : si le système agricole peut être autonome énergétiquement, il convient de favoriser l'autoconsommation énergétique au sein du secteur avant d'envisager la décarbonation pour d'autres usages ;
- **Développer massivement les pratiques de stockage et de stockage additionnel de carbone** afin de maximiser les potentiels d'atténuation des émissions résiduelles du secteur : cela passe par le maintien des pratiques stockantes sur les surfaces actuelles (notamment les prairies) et par le développement de pratiques stockantes sur de nouvelles surfaces.

6. Limites méthodologiques

A. Limites liées au périmètre du projet et de la prospective

Les principales limites méthodologiques de cet exercice de prospective portent tout d'abord sur le périmètre d'étude. Celui-ci se limitant au secteur agricole (sortie de ferme), nous n'avons **pas fait d'hypothèses d'évolution de la demande et des régimes alimentaires**. Les résultats produits permettent donc de visualiser si les volumes de biomasse produite permettent d'atteindre les équilibres fixés par les objectifs des différents scénarios (potentiel nourricier selon deux régimes journaliers moyens, bilan fourrager), mais sans intégrer de potentielles évolutions de l'offre et de la demande. Cet exercice aura ainsi nécessairement vocation à être complété et amendé lors de la phase suivante du projet, débutant à partir de 2025.

Par ailleurs, **notre raisonnement est mené à l'échelle France et il n'est pas possible à ce stade de pousser la réflexion à l'échelle des territoires, et encore moins des fermes**, pour en imaginer une répartition géographique et typologique détaillée. Or la dimension territoriale est également nécessaire pour rendre compte de l'impact concret de ces scénarios-tests sur le territoire.

De plus, les principaux résultats analysés portent sur le **périmètre inventaire sur le territoire national** (CITEPA), car il s'agit du périmètre sur lequel sont fixés les objectifs officiels de décarbonation dans la SNBC2. Ces objectifs n'intègrent ainsi pas à ce stade un certain nombre d'émissions « importées », en particulier celles liées à l'alimentation animale (et *a fortiori* liées aux importations d'alimentation humaine dont le périmètre dépasse à nouveau celui du secteur agricole). Il convient donc de rappeler que les résultats obtenus dans notre exercice de modélisation du scénario de conciliation sur l'atténuation des émissions hors territoire national ne peuvent être intégrés aux résultats globaux sous format ClimAgri. La SNBC3 en cours de définition devrait intégrer des objectifs sur certaines émissions hors territoire, permettant de mettre en avant et limiter les effets contre-productifs dans le cas d'une diminution des émissions nationales qui serait contrebalancée par une augmentation des émissions importées (cas de l'alimentation animale et de la viande notamment).

Certains sujets majeurs pour garantir une transition agricole à la hauteur des enjeux n'ont pas pu être suffisamment approfondis et intégrés de manière quantitative dans la prospective. En particulier, si les enjeux d'atténuation sont quantifiés et les hypothèses d'atténuation quantifiables, l'adaptation et la résilience dépendent d'un nombre de variables encore plus conséquent, que nous n'avons pu intégrer dans le modèle :

- **Concernant l'adaptation des systèmes de production aux évolutions climatiques chroniques, nous n'avons pu définir d'hypothèses suffisamment précises à l'échelle de chaque culture.** La mise en place de systèmes de production adaptés aux évolutions climatiques sera nécessairement dépendante des conditions locales (filières existantes, besoins du territoire, complémentarité entre productions végétales et animales), il est donc très complexe de définir des assolements "adaptés" à horizon 2050 et dans une logique de « moyenne France ».
- **Concernant la résilience de l'agriculture, il est là encore peu aisé de définir des hypothèses quantitatives en termes d'assolements et de cheptels.** Nous avons considéré que l'évolution des systèmes d'élevage, la diversification des assolements et l'allongement des rotations permettent d'envisager une meilleure résilience à horizon 2050. Au-delà de la résilience climatique et écosystémique, la résilience énergétique est en revanche abordée au travers de nos hypothèses de consommation et de production énergétique par l'agriculture.
- Enfin, **les impacts d'aléas climatiques ou énergétiques aigus sont complexes à modéliser** à nouveau du fait de manques de connaissances à horizon 2050 sur un assolement français moyen. En effet, les impacts seront hautement dépendants des cultures et territoires considérés, avec des gains et des pertes en fonction des filières (voir partie II.2.D). Nous avons dû limiter ce projet de "stress test" à l'impact d'une année climatiquement extrême (voir partie IV.5.C).

Ces limites font ressortir le **besoin d'une modélisation territorialisée**, qui prendrait en compte de manière plus fine :

- les équilibres en termes de besoins de biomasse et d'azote à l'échelle locale,
- les impacts du changement climatique sur les aires biogéographiques et les rendements de chaque production à l'échelle locale (liés à la modification des sommes de degrés jours et de la disponibilité en eau).

Enfin, les enjeux spécifiquement liés à l'**eau et à la biodiversité** n'ont pu faire l'objet d'une quantification :

- Sur l'eau, nous avons dû limiter la modélisation à un objectif qualitatif de maîtrise de la hausse de la demande en irrigation, à défaut de pouvoir déterminer quel serait l'état de la ressource en eau utilisable par l'agriculture à horizon 2050.
- Les enjeux liés à la biodiversité et aux produits phytosanitaires sont abordés de manière indirecte dans la modélisation, encore une fois à défaut de pouvoir les quantifier : les modalités d'agriculture (75 % agriculture intégrée, 25 % agriculture biologique, soit une moyenne de - 50 % d'usage de produits phytosanitaires), la diversification des assolements, l'allongement des rotations, le maintien des prairies, la plus grande part de systèmes d'élevage herbagers, les moindres pertes d'azote dans les milieux et le développement significatif des pratiques de stockage de carbone permettent néanmoins d'envisager un impact positif sur ces enjeux environnementaux.

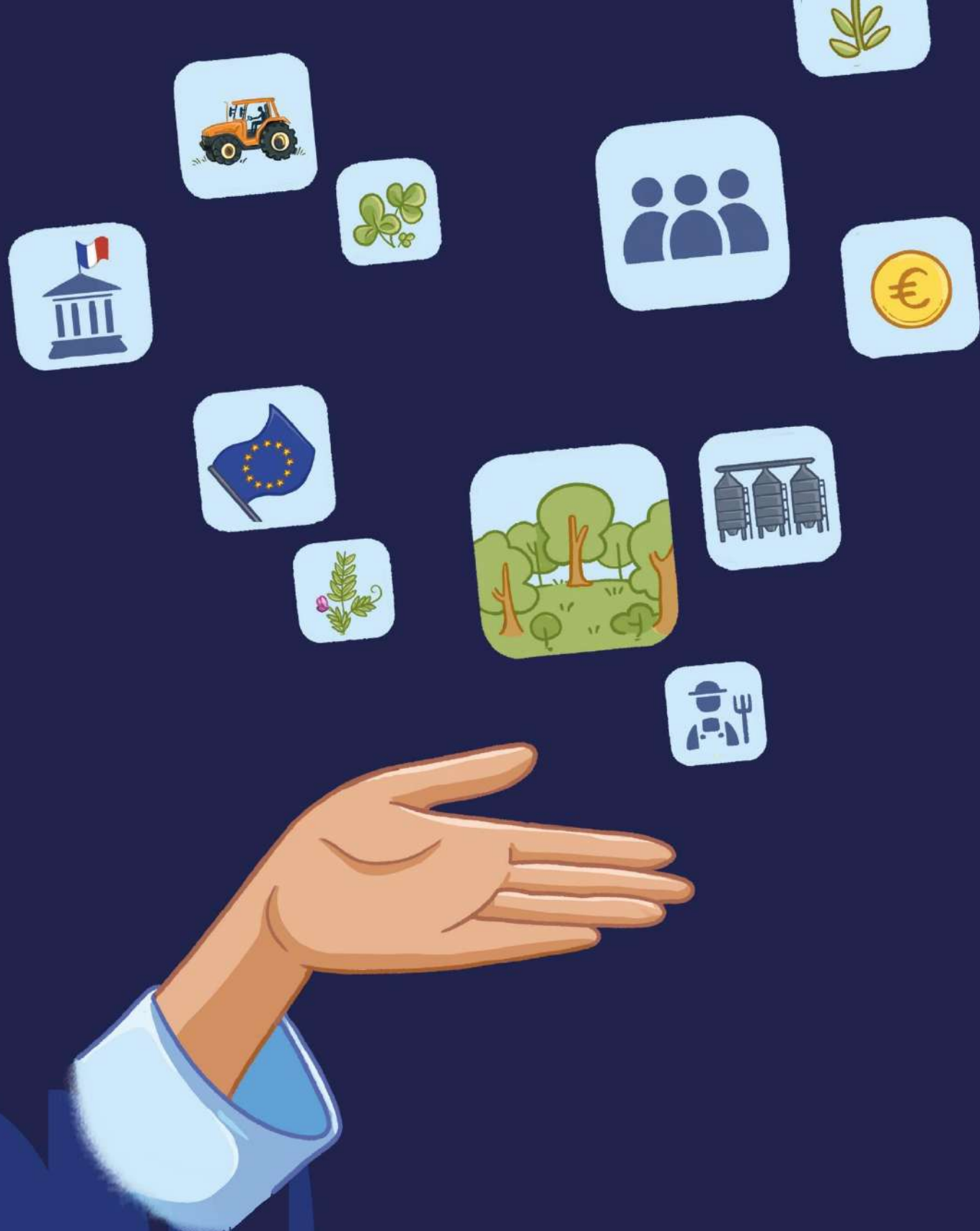
B. Limites sur les hypothèses et la modélisation

Des limites de modélisation sont également à mettre en avant :

- **Concernant les hypothèses de modélisation, leur granulométrie n'a pas toujours pu être suffisamment fine.** Nous avons dû utiliser un nombre réduit d'hypothèses, nous permettant par ailleurs de gagner en fluidité d'utilisation (itérations plus faciles et plus nombreuses en vue d'atteindre de manière simultanée plusieurs objectifs : production, émissions directes et indirectes de GES, stockage de carbone, consommations et production d'énergie).
 - Sur les assolements et les cheptels, les productions sont approchées par des grandes catégories (céréales, protéagineux, bovins viande, bovins lait...). Nous avons fait varier les catégories d'intérêt, l'impact sur les autres catégories se faisant « par défaut ».
 - Sur les systèmes, de la même manière, nous avons dû simplifier l'approche pour les élevages de ruminants, nous limitant à choisir des scénarios-types (scénario « herbager », scénario « beaucoup plus de pâturage », etc.). Une plus grande précision de répartition des types d'élevages aurait pu conduire à des objectifs de réduction de cheptels différents.
 - Sur les évolutions de rendements, celles-ci étant très spécifiques des cultures et des régions, nous avons uniquement pris en compte une évolution tendancielle de rendements des céréales de - 5 %.
 - Sur les hypothèses techniques (coefficients énergétiques ou GES par unité de production), notre approche s'est fondée sur une évolution tendancielle sauf exception, à défaut de meilleures connaissances. Les coefficients que nous avons néanmoins été en mesure de modifier étaient notamment ceux liés à l'efficacité énergétique de l'agriculture (machines, engins, bâtiments), et à l'amélioration de la gestion des effluents (couverture des fosses).
- Le modèle utilisé étant un modèle externe, cela implique nécessairement une **limite de visibilité sur des calculs intermédiaires**.
- Enfin, **concernant les résultats, une analyse plus fine serait pertinente notamment sur le bouclage du bilan azoté**, la quantité d'azote minéral nécessaire étant une sortie du modèle MoSUT. Aussi, conscients que les valeurs retenues ici sont en rupture forte avec les utilisations actuelles, il serait utile par la suite d'approfondir le travail de modélisation de l'azote dans les systèmes agricoles, en intégrant plus précisément les enjeux de recyclage des matières organiques. En effet, les leviers mobilisables sont nombreux, les interactions complexes, et les enjeux énergétiques importants.

Cet exercice ne vise pas à épuiser le sujet, mais montre que les arbitrages sont délicats et que les contreparties ont des conséquences lourdes, quelle que soit la voie retenue. Notre conclusion est qu'**il est urgent de faire un choix de société dès aujourd'hui et décider quelle agriculture nous souhaitons en 2050**, pour initier les changements dès maintenant, permettre aux parties prenantes d'inscrire leurs choix dans une trajectoire fiable, et accompagner les acteurs qui auront le plus d'efforts à fournir. **Les enjeux sont trop importants et ne pas arbitrer dès aujourd'hui est un luxe que nous ne pouvons plus nous permettre.** C'est aussi l'opinion des agriculteurs, qui sont 86 % à demander à ce que les objectifs nationaux pour le secteur agricole français soient clarifiés⁴⁸¹.

⁴⁸¹ Résultats de la Grande Consultation des Agriculteurs 2024, <https://theshiftproject.org/article/resultats-grande-consultation-des-agriculteurs/>



Recommendations

V. Recommandations

Pour répondre aux multiples objectifs qui lui sont assignés, **le système agricole doit aujourd'hui affronter un quintuple défi climatique et énergétique** :

- s'adapter rapidement à de nouveaux contextes pédoclimatiques et énergétiques,
- atténuer ses émissions de GES,
- s'organiser pour consommer moins d'énergies fossiles,
- augmenter le stockage de carbone dans les sols et les éléments boisés des parcelles agricoles,
- produire de la biomasse en quantité suffisante pour répondre à différents usages et contribuer à la décarbonation des autres secteurs économiques.

Ces objectifs ne pourront être atteints durablement sans assurer la viabilité économique et la prospérité des fermes, en garantissant un revenu suffisant aux producteurs et en les protégeant de la concurrence internationale. Il est difficile en effet de demander aux agriculteurs actuels d'assumer seuls la triple responsabilité des conséquences de choix politiques passés (et l'organisation du système qui va avec), de l'adaptation de leurs pratiques et leurs productions au changement climatique et de la prise de risque financière associée, sans **leur garantir un niveau de revenu suffisant. Cette garantie de revenus passe par des prix rémunérateurs, dont il faut accepter qu'ils soient plus élevés pour des niveaux de qualité et de garantie d'origine augmentés.**

De nombreux leviers de transformation des systèmes agricoles existent, dont le déploiement permettrait d'atteindre les objectifs climatiques nationaux et la résilience du secteur. Comment assurer l'extension des pratiques des pionniers au plus grand nombre ? Comment planifier et accompagner les transformations structurelles du secteur ? Comment orienter la recherche ?

1. Recommandations à destination des pouvoirs publics

A. Un besoin de clarification stratégique et politique

Les difficultés actuelles du secteur agricole incombent pour partie à des incohérences politiques et économiques par rapport aux attentes qui lui sont adressées par la société et les pouvoirs publics, à l'échelon national mais aussi européen. Le nouveau mandat européen et les discussions actuelles relatives à la prochaine PAC sont l'occasion de clarifier les priorités et de penser un nouveau contrat entre la société et le secteur agricole. Pour plus de 86 % des agriculteurs, clarifier les objectifs nationaux pour l'agriculture française serait pertinent pour accélérer la transition environnementale de l'agriculture française⁴⁸².

a. Clarifier les objectifs stratégiques et politiques assignés au secteur agricole

Les politiques actuelles de transformation de l'agriculture portent largement sur la production, sans viser à la mettre en adéquation avec la consommation nationale, au risque de priver des filières de débouchés et mettre en péril les exploitations ayant fait le choix d'un modèle plus vertueux (par exemple : faibles débouchés en légumes secs, crise du bio face à une faible évolution de la demande, notamment hors domicile). D'autres freins concernent les difficultés d'accès au foncier face au besoin d'installer de nouveaux agriculteurs.

⁴⁸² Résultats de la Grande Consultation des Agriculteurs 2024, <https://theshiftproject.org/article/resultats-grande-consultation-des-agriculteurs/>

De plus, poursuivre des objectifs d'atténuation et de résilience tout en maintenant un certain niveau de productivité agricole ne pourra se faire sans arbitrages. Quelle perte de rendements, qui résulterait notamment d'une réduction de la consommation d'engrais, sera-t-on prêt à accepter, planifier et accompagner pour répondre à nos objectifs environnementaux, notamment si les besoins globaux en biomasse augmentent ? Comment arbitrer entre la réduction de consommation de carburants, et donc des émissions énergétiques, via des techniques culturales simplifiées, et l'utilisation d'herbicides, à productivité constante et en contexte météorologique incertain (désherbage mécanique contre désherbage chimique) ? Comment arbitrer entre la réduction de l'utilisation de produits phytosanitaires aux impacts sur la biodiversité et le maintien d'une production de biomasse satisfaisante ?

Les controverses sur ces sujets résultent de divergences d'intérêts ou d'idées de la part des différents acteurs en présence, qui empêchent d'avancer sur les réponses techniques nuancées qui permettraient le meilleur compromis entre différents enjeux. Or, un cadre clair, qui tienne compte de toute la complexité du sujet, et qui accepte la nuance dans la réponse apportée, est nécessaire pour permettre aux acteurs de se projeter.

Recommandations :

- **Accélérer la planification** : définir une politique agricole claire, dotée d'objectifs de long terme chiffrés et compatibles entre eux, avec des jalons intermédiaires, afin d'offrir un horizon stable aux acteurs, établir une stratégie et des plans d'actions cohérents avec la PAC et les nouvelles conditions affirmées par les conclusions du Dialogue stratégique⁴⁸³.
- **Tenir compte de la planification des autres secteurs économiques** (voir I.3).
- **Définir et assumer des arbitrages** sur les techniques de production, en acceptant une part d'incertitude et le besoin d'avancer en recherche sur ces sujets.
- **Assurer en cohérence avec cette planification des politiques de maîtrise de l'artificialisation des sols afin de préserver un potentiel agricole résilient** partout sur le territoire et en particulier à proximité des centres urbains, et alléger la fiscalité foncière agricole.
- **Mettre en place des stocks agricoles et alimentaires stratégiques, répartis sur le territoire**, afin d'assurer un approvisionnement alimentaire suffisant même en cas d'aléas climatiques ou énergétiques extrêmes (tout en pouvant contribuer à limiter les fluctuations de marchés).

b. Donner des perspectives claires au monde de l'élevage

Le secteur fait face à un double enjeu : d'une part gérer une nécessaire baisse des émissions liées à l'élevage, qui passe en partie par une baisse des volumes de production et/ou des effectifs, à organiser sur certaines filières, mais qui doit s'accompagner d'une mise en adéquation de la demande pour ne pas se traduire pas plus d'importations ; et d'autre part assumer des choix de modes de production afin de valoriser les plus vertueux au regard des objectifs climatiques, de biodiversité et de résilience. Des problématiques spécifiques concernent les ruminants (prairies permanentes, méthane), d'autres les monogastriques (importations de soja, concurrence alimentation animale/humaine, concurrence internationale). Or la puissance publique semble hésiter entre ces objectifs et les défis politiques, et n'assumant pas de choix clair, ne propose pas d'accompagnement à la hauteur du défi. Cela ne fait que retarder l'action et laisser s'aggraver des problèmes qui deviennent structurels. Dans un contexte soumis à des demandes contradictoires, les acteurs du secteur, agriculteurs, filières ou territoires, peuvent difficilement se projeter, investir et prendre les bonnes décisions, y compris en matière de transmission des exploitations.

Par ailleurs, les activités d'élevage à l'herbe sont insuffisamment valorisées économiquement, au regard de leurs externalités positives. Or un ralentissement du rythme actuel de baisse des effectifs de ces élevages est une hypothèse compatible avec des objectifs de décarbonation (voir scénario de conciliation). De même, pour les protéines végétales, les approvisionnements en aliments d'origine française sont contraints par des prix

⁴⁸³ https://agriculture.ec.europa.eu/common-agricultural-policy/cap-overview/main-initiatives-strategic-dialogue-future-eu-agriculture_fr

supérieurs aux graines et tourteaux importés, alors que la faiblesse des prix n'encourage pas les céréaliers à prendre le risque de cultiver plus de légumineuses.

Recommandations :

- **Mettre en œuvre des politiques fortes sur l'alignement de la demande et de l'offre nationales en produits animaux**
 - Inclure des objectifs de réduction des émissions liées à l'élevage hors territoire national dans la SNBC3
 - Agir sur l'évolution de la demande afin qu'elle ne se reporte pas sur des produits importés, notamment auprès de la restauration hors domicile.
- **Accélérer la planification de la transformation de l'élevage**
 - en proposant **un soutien aux élevages décarbonés et résilients, et des solutions de transition aux autres élevages,**
 - en **déclinant les objectifs par territoire et par modes d'élevage,** selon les potentialités et capacités du milieu, en visant l'équilibre en fertilisation et la limitation du transport des matières organiques,
 - **avec un horizon clair, des jalons et des modalités d'accompagnement du secteur.**
- **Aligner les politiques d'installation de nouveaux actifs en systèmes d'élevage** avec ces objectifs.
- **Décliner les feuilles de route de décarbonation par la planification (aujourd'hui à 2030) à l'horizon 2050,** au vu de l'effort important restant à consentir entre ces deux jalons, et de façon concertée et cohérente entre filières.
- **Encourager l'approvisionnement français, voire local,** pour l'alimentation des animaux, en permettant l'information du consommateur par l'affichage de cette origine :
 - viser un déploiement plus ambitieux des chartes et cahiers des charges orientés sur la limitation voire la suppression de l'alimentation animale importée et la valorisation des coproduits nationaux,
 - créer une filière Soja France ou Légumineuses France, avec un prix véritablement incitatif pour les producteurs de grandes cultures, compensation financière du surcoût aux éleveurs, meilleure valorisation des débouchés lait et viande le long de la chaîne de valeur, en lien avec d'éventuels mécanismes d'encadrement ou de soutien des marchés,

c. Soutenir des modes de gestion sobres et durables de l'azote

L'azote est dans le même temps l'un des piliers indispensables de la production agricole et une source de pollution des écosystèmes et d'émissions de GES, que ce soit lors de la fabrication des engrais ou lors de la fertilisation des parcelles. La perte d'azote dans les milieux constitue un manque à gagner en termes de fertilité et d'efficacité des systèmes agricoles. De plus, stockage de carbone et fertilisation des cultures sont deux enjeux fortement corrélés, le stockage additionnel de carbone via la matière organique mobilisant également de l'azote dans le sol.

Recommandations :

- **Finaliser un plan de souveraineté en engrais,** avec une vision systémique, qui mise autant sur les ressources organiques que sur la sobriété et assure la résilience du système agricole en cohérence avec la planification écologique des autres secteurs économiques, en fixant un cap à la consommation d'engrais azotés minéraux à un certain horizon par types de cultures et de territoires.
- **Soutenir financièrement le développement et la viabilité des filières de légumineuses et de cultures économes en azote** et à bas niveau d'intrants (sélection génétique, adaptation des silos de collecte, sécurisation des débouchés, promotion de la consommation).
- **Faire évoluer la réglementation concernant le recours à de nouveaux fertilisants organiques (biodéchets, excréta humains).**
- **Réfléchir avec les professionnels agricoles à de nouvelles modalités de suivi de l'azote dans les sols, en visant de passer d'objectifs de moyens à des objectifs de résultats.**

d. Accompagner la décarbonation des installations et engins agricoles

Les machines agricoles représentent aujourd'hui un poste crucial de dépendance aux énergies fossiles du secteur, mais leur décarbonation totale est possible. **La transition des pratiques vers l'agroécologie, intégrant en particulier la réduction du travail du sol, réduit la demande d'énergie nécessaire pour la traction, contribue à faciliter cette décarbonation, car compatible avec l'électrification ou le passage au biogaz.** Les impacts des évolutions des engins agricoles doivent être anticipés et planifiés en tenant compte des enjeux extra-agricoles (infrastructures énergétiques adaptées, entretien et compétences spécifiques, effets rebonds et autres impacts systémiques non désirés, etc.). Les aspects fiscaux et économiques sont structurants pour le parc de machines français (aides, fiscalité de l'énergie et des investissements).

Les installations (bâtiments d'élevage, serres chauffées, matériel d'irrigation, séchoirs, etc.) qui consomment de l'énergie doivent également être décarbonées et plus économes en énergie. Les délais de renouvellement de ces installations et infrastructures impliquent que les enjeux énergétiques soient pris en compte dès la conception pour tous les nouveaux projets et dans le cadre des renouvellements et rénovation de ces infrastructures.

Recommandations :

- **Favoriser fiscalement une part d'autoconsommation de l'énergie décarbonée produite sur les fermes quand c'est possible et opportun** (biogaz pour les fermes à proximité des infrastructures de méthanisation, électricité, etc.), dans la perspective de la sortie de la fiscalité avantageuse du GNR.
- **Favoriser fiscalement la mutualisation, le partage, ou le recours à la prestation** pour les tracteurs et machines qui sont « sous-utilisées » dans les fermes.
- **Revoir la fiscalité et mécanismes de cotisations des entreprises agricoles pour favoriser les épargnes de précaution plutôt que l'investissement** lors des bonnes années, et limiter les achats "opportunistes" non nécessaires.

Nous renvoyons également le lecteur au rapport dédié à la place de la technologie dans la transition agricole⁴⁸⁴.

B. Un besoin de sécurisation économique et de rentabilité

Le verrou financier constitue le principal frein à l'adoption de pratiques agroécologiques par les agriculteurs. La sécurisation de leur revenu et l'encouragement au déploiement de telles pratiques par des mesures incitatives plus que punitives doivent permettre de les massifier.

d. Lever les freins économiques au déploiement des pratiques agroécologiques

Les pratiques agroécologiques rassemblent un ensemble de solutions, inspirées par le fonctionnement des écosystèmes naturels, assurant des gains environnementaux multiples (lutte contre l'érosion des sols et le ruissellement, biodiversité, stockage de carbone...). L'agroforesterie présente en particulier un fort potentiel en termes d'atténuation comme de résilience et biodiversité. Or les freins à l'adoption de ces pratiques sont nombreux et souvent financiers : prise de risque sur les rendements les premières années, assumée uniquement par les agriculteurs, coûts liés à l'implantation de couverts végétaux sans garantie de réussite selon les conditions météorologiques, coût des investissements en matériel parfois élevés, manque d'attractivité des cultures de diversification (coûts de production trop élevés face aux prix de vente, manque de débouchés, manque de variétés adaptées), etc.

⁴⁸⁴ Rapport « Quelles technologies pour une agriculture bas carbone, résiliente et prospère », The Shift Project, Novembre 2024

Selon la Grande Consultation des Agriculteurs⁴⁸⁵, **81 % des agriculteurs citent le verrou financier comme frein à l'adoption de nouvelles pratiques agricoles durables.** « 80 % du pas en avant fait par les agriculteurs sera par une incitation financière. J'ai des convictions mais elles ne me feraient pas vivre. »

77 % des agriculteurs pensent que renforcer les aides financières de la PAC sur les pratiques agricoles durables serait pertinent pour accélérer la transition environnementale de l'agriculture française.

« Donnons de la valeur à l'azote fabriqué dans les champs, aux haies...rémunérons la régularité de la photosynthèse sur une surface. Et laisser les agris libres d'utiliser leur intelligence pour mettre les bonnes stratégies pour aller dans la bonne direction. »

« Stop les interdictions, passons à la carotte. »

Recommandations :

- **Encourager la diversification des cultures⁴⁸⁶ et la préservation de parcelles de taille raisonnable en créant un bonus associé (à l'image du bonus Haies lui-même à renforcer).**
- **Augmenter les aides couplées aux légumineuses et cultures à bas niveau d'intrants pour les rendre plus incitatives.**
- **Soutenir les prix de l'agriculture biologique par la demande**, en particulier faire respecter la loi EGalim et l'obligation d'une part d'approvisionnement local ou biologique dans la restauration collective.
- **Reconnaître les services écosystémiques de l'agriculture de conservation des sols.**
- **Créer les conditions pour que les activités d'élevages autonomes et résilients bénéficient d'une rentabilité attractive** (via des mécanismes publics avec des prix garantis et/ou privés).
- **Soutenir massivement l'agroforesterie** en imaginant la création d'un Fonds national spécifique dédié.
- **Préserver les dispositifs de financement des risques liés au changement de pratiques** (mesures de compensation des surcoûts et manques à gagner type MAEC).et garantir leur paiement effectif et rapide.
- **Proposer des Contrats de Transition Agroécologique** pluriannuels accessibles à tous les agriculteurs, les engageant dans une transformation globale de leur système, combinant financement des risques liés au changement de pratiques et soutien aux investissements matériels et immatériels nécessaires.
- **Développer les dispositifs de rémunération des agriculteurs pour les services environnementaux** rendus par leurs activités, notamment pour le stockage de carbone (Label Bas Carbone et autres mécanismes similaires),
- **Développer des mécanismes de couverture assurantielle** pour la mise en place de pratiques agroécologiques (via des mécanismes publics avec des prix garantis et/ou privés).

⁴⁸⁵ Résultats de la Grande Consultation des Agriculteurs 2024, <https://theshiftproject.org/article/resultats-grande-consultation-des-agriculteurs/>

⁴⁸⁶ Voir par exemple le programme européen DiverImpacts <https://www.diverimpacts.net/fr/resources/policy-briefs.html>

Les crédits carbone : un financement possible du stockage de carbone par l'agriculture

Le secteur agricole est l'un des rares à pouvoir stocker du carbone naturellement dans les sols et la biomasse. Il n'est pas soumis au marché du carbone obligatoire, mais un marché du carbone volontaire propose divers dispositifs de rémunération des agriculteurs pour la mise en œuvre de pratiques stockantes et de réduction des émissions de GES.

Créé par le Ministère de la Transition Écologique, le Label Bas Carbone⁴⁸⁷ assure depuis 2019 un cadre de certification de projets au service de la mise en œuvre de la SNBC. Pour le secteur agricole, il permet de récompenser les acteurs s'engageant dans la réduction de leur bilan carbone, combinant leviers de stockage du carbone dans les sols et la biomasse et de réduction des émissions des GES. Différentes méthodologies ont été validées par le MTE pour les projets agricoles : CarbonAgri, Plantation de Vergers, Méthode Grandes Cultures, Méthode Haies, Ecométhane, ..., pour un potentiel de réduction d'émissions de 2 MtCO_{2e} (sur 5 MtCO_{2e} tous secteurs confondus). Puisqu'il ne se résume pas à une comptabilité carbone, mais intègre aussi des critères socio-économiques et relatifs à la biodiversité, le Label Bas Carbone français figure en bonne place parmi les standards internationaux de compensation carbone⁴⁸⁸.

Ces projets labellisés doivent cependant trouver des financeurs (entreprises, collectivités, associations, ...) qui s'avèrent aujourd'hui insuffisants, par manque de connaissance des projets, par habitude d'achat de crédits carbone à l'international, ou encore parce que le Label Bas Carbone n'est valide qu'en France. Les progrès récents dans la construction d'un cadre européen de certification d'absorptions de carbone devraient contribuer à clarifier les démarches pour les acheteurs. Le déploiement d'un consortium international de recherche et d'innovation sur le carbone du sol (projet ORCaSa⁴⁸⁹) doit permettre également d'affiner les méthodologies d'évaluation des émissions de GES et de stockage de carbone agricoles, qui présentent aujourd'hui des niveaux de précision variables.

Il existe également des cadres de certification privés (Agoterra, Rize ag, Soil Capital, ...), avec des durées d'engagement, des scopes (biodiversité, ...) et des modalités de comptabilité variables.

Selon les changements de pratiques mis en œuvre, une exploitation peut viser de 0,5 à 3 crédits carbone par hectare et par an, vendus à un prix unitaire compris entre 25 € et 50 € selon les programmes en 2024. S'ils ne sont pas un but en soi, les crédits carbone offrent cependant une contrepartie rémunératrice intéressante.

En complément de ces démarches de compensation carbone se développent également des programmes de « primes filière » accordées par les acteurs de l'aval au sein des chaînes de valeurs agroalimentaires ou non alimentaires (insetting), permettant de compenser en partie les bonnes pratiques agricoles de durabilité mises en place.

Source : MTE, AgrIdées

e. Protéger les agriculteurs français de la concurrence internationale

Les exigences sociales et environnementales adressées aux producteurs français les placent en situation de distorsion de concurrence évidente vis-à-vis d'autres pays producteurs, tout particulièrement ceux avec lesquels des accords de libre-échange sont signés, mais aussi au sein de l'Union européenne. Or les orientations actuelles vont dans le sens d'une demande accrue d'exigences environnementales (que nous soutenons dans ce rapport) envers les agriculteurs, sans leur proposer davantage de protection vis-à-vis de concurrents qui ne sont pas soumis à ces règles, ni aux mêmes coûts de main-d'œuvre. La situation est d'autant

⁴⁸⁷ <https://label-bas-carbone.ecologie.gouv.fr/>

⁴⁸⁸ https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/Santards-compensation_MTE.pdf

⁴⁸⁹ <https://www.inrae.fr/actualites/lancement-du-projet-horizon-europe-orcasa-coordination-mondiale-recherche-innovation-autour-du-carbone-sols>

moins soutenable qu'elle concerne des filières pour lesquelles la souveraineté n'est pas assurée (fruits et légumes, noisettes, poulets, ovins...).

Selon la Grande Consultation des Agriculteurs⁴⁹⁰, pour **88 % des agriculteurs, protéger les agriculteurs de la concurrence internationale serait pertinent pour accélérer la transition environnementale de l'agriculture française**

« Il faut une garantie sur les prix, une protection du marché français vis à vis des imports. »

« Il y a une incohérence entre les exigences réglementaires, celles des consommateurs et ce qu'on laisse entrer sur le marché. Je ne peux pas faire mieux et plus vertueux si le même produit est importé moins cher. »

Recommandations :

- **Assumer de mettre en oeuvre des mécanismes protectionnistes** : taxer les échanges aux frontières afin de protéger le marché intérieur européen, mettre en place et garantir le respect de clauses-miroir (y compris à l'intérieur du marché européen), mettre en place des quotas / normes aux importations, voire interdire les importations de produits aux conditions de production trop défavorables à l'environnement.
- **Créer des aides couplées spécifiques pour les productions concernées** non soutenues aujourd'hui, en particulier en fruits et légumes.

f. Alléger l'impact de la volatilité des marchés sur la rentabilité des fermes

La viabilité économique des fermes est très aléatoire, d'une année à l'autre et entre systèmes de production. Certains secteurs cumulent conjoncture économique difficile et aléas climatiques récurrents. Dans ce contexte, qui est voué à être de plus en plus instable, l'adoption de nouvelles pratiques ou de nouvelles productions ne peut être envisagée par les agriculteurs qu'avec des garanties de rentabilité et sur les risques qui accompagnent ces transformations à l'échelle de la ferme. La volatilité des marchés des matières premières agricoles, en particulier des céréales et oléagineux, est exacerbée par le contexte géopolitique incertain, mais aussi par la fixation des cours en référence à un prix mondial arbitré sur des marchés à terme dont le principe vertueux initial ne peut s'exercer, faute d'en avoir réservé l'accès aux professionnels des filières agricoles. Cela accroît les incertitudes des producteurs et bloque les initiatives en les exposant à des prix bas qui ne garantissent pas la rentabilité des fermes.

Toujours selon la Grande Consultation des Agriculteurs, pour **51 % des agriculteurs, une condition pour engager la transition environnementale de leur ferme est la mise en place de politiques sécurisant des débouchés et des prix rentables pour les exploitations.**

« Les cours sont devenus très volatiles sur une même journée ce que les paysans à la retraite n'ont pas connu dans le passé ; on a des problématiques qu'eux n'avaient pas pour les choix stratégiques et économiques qui sont bien plus risqués qu'autrefois. »

Recommandations :

- Proposer d'améliorer le dispositif des aides PAC par des soutiens contracycliques : interventions de stabilisation des revenus, plafonnées en fonction de l'emploi dans les exploitations.
- **Réfléchir à définir un certain volume de production à retirer des marchés** pour la consommation domestique pour les productions les plus sensibles à cette volatilité.
- Étendre les possibilités de **contractualisation pluriannuelle équilibrée** avec l'aval des filières à toutes les productions, en veillant à garantir des prix rémunérateurs intégrant réellement les coûts de production.

⁴⁹⁰ Résultats de la Grande Consultation des Agriculteurs 2024, <https://theshiftproject.org/article/resultats-grande-consultation-des-agriculteurs/>

C. Un besoin de compétences et de connaissances

a. Capitaliser sur l'intelligence collective des agriculteurs

Les agriculteurs sont plus enclins à mettre en œuvre des pratiques dont ils savent qu'elles ont donné de bons résultats sur le terrain, en particulier dans leur région, et les échanges entre pairs sont un bon moyen de diffusion des connaissances et de nouvelles pratiques par petites régions agricoles. Fins connaisseurs de leur terroir, les plus engagés tentent régulièrement des expériences et mènent des essais pouvant déboucher sur des innovations parfois reprises ensuite par les instituts techniques avant d'être popularisées. Il faut reconnaître la valeur de ces innovations techniques ou agronomiques ("traquées" ensuite par le monde de la recherche sans contrepartie financière). Globalement, il existe un besoin de mieux connecter la recherche et l'activité des agriculteurs, mais aussi celle des coopératives qui jouent un grand rôle d'accompagnement de leurs adhérents.

Dans l'échantillon des 7 711 agriculteurs de la Grande Consultation des agriculteurs⁴⁹¹, **36 % des agriculteurs sont membres d'associations, de collectifs ou d'autres groupements.** « À plusieurs on s'éclaire collectivement, on avance plus vite, quand on est tout seul le nez dans le guidon, et puis c'est plus entraînant, c'est plus encourageant. »

Recommandations :

- **Offrir la possibilité de mener des expérimentations à la ferme** avec une souplesse dans les déclarations annuelles d'assolement (pourcentage de la SAU en parcelle expérimentale).
- **Créer et développer le statut de paysan-chercheur**, notamment en facilitant l'accès aux crédits d'impôt recherche aux agriculteurs expérimentateurs.
- **Faciliter la transmission de connaissances entre agriculteurs**, en imaginant des modalités de rémunération de leur temps quand ils partagent leurs savoirs et leurs expériences.
- **Valoriser plus de résultats de la recherche sur le terrain.**
- **Mener plus d'expérimentation terrain en partenariat avec les agriculteurs** en tant que parties prenantes, en les rémunérant pour le temps passé, les parcelles mobilisées et les risques pris.

b. Faciliter et intensifier la formation des professionnels sur la transition agroécologique, l'atténuation et l'adaptation au changement climatique, et la résilience du secteur

Particulièrement concernés par le changement climatique, les professionnels du secteur (agriculteurs, représentants, conseillers techniques, etc.) doivent être plus largement formés à la transition agroécologique et à l'adaptation et l'atténuation au changement climatique. Ces sujets relèvent de compétences techniques à appréhender de façon transversale et systémique. En particulier, le secteur du conseil technique agricole des coopératives doit être particulièrement ciblé (tout en ayant en tête une antinomie possible entre objectifs de chiffre d'affaires de vente d'intrants et adaptation des pratiques).

Toujours selon la Grande Consultation, 33 % des agriculteurs mettent une condition de formation et d'accompagnement technique pour s'engager dans la transition environnementale de leur ferme.

« On pourrait imaginer un mécanisme de reconnaissance de la R&D dans le plan comptable de l'exploitation »

« On a besoin d'un soutien en conseils et de fermes expérimentales qui poussent à l'extrême des concepts : par exemple sur les questions énergétiques, comment on fait tourner une ferme sans gasoil ? »

⁴⁹¹ Résultats de la Grande Consultation des Agriculteurs 2024, <https://theshiftproject.org/article/resultats-grande-consultation-des-agriculteurs/>

Recommandations :

- **Initier un grand plan de formation à la transition écologique**, avec un volet agricole bénéficiant d'un portage politique fort et de moyens à la hauteur de l'ambition.
- **Intégrer les compétences de la transition agroécologique dans les formations** initiales et continues (assurer la réalisation effective des objectifs du plan Enseigner à produire autrement).
- **Développer la formation continue** sur ces sujets, auprès des agriculteurs et des conseillers techniques..
- **Libérer du temps des agriculteurs** et faciliter leur remplacement afin qu'ils puissent se former et participer aux rencontres informelles entre pairs.

Pour plus de détails sur ces propositions, consulter le rapport « Quels emplois et compétences pour une agriculture bas carbone, résiliente et prospère »⁴⁹².

c. Approfondir la recherche sur certains sujets-clés : hypothèses de rendements, systèmes d'élevage bas carbone, stockage de carbone, effet d'atténuation de la couverture végétale

Malgré les recherches en cours, certains sujets d'importance pour l'horizon 2050 méritent d'être encore plus documentés, notamment les hypothèses d'évolution du rendement de l'agriculture au regard des aléas climatiques et énergétiques à venir, et le potentiel puits de carbone agricole à cette échéance, qui pourrait contribuer à compenser les émissions résiduelles du secteur au sein même des systèmes agricoles. Dans le domaine des systèmes d'élevage, les principaux leviers de réduction des émissions de méthane entérique à l'échelle de l'animal, du troupeau et du système sont bien connus, mais on manque de connaissances sur leur niveau d'additivité lorsque les leviers sont combinés et sur leurs effets sur le long terme. L'étude des échanges gazeux entre le sol et l'atmosphère (processus biogéochimiques) et les interactions entre les caractéristiques du sol et le climat (processus biogéophysiques) doit être intensifiée pour permettre d'établir un cadre scientifique clair et convaincant sur les objectifs à atteindre. Les modalités de *monitoring* du stockage de carbone sont à approfondir, pour permettre de quantifier et piloter avec plus de précision l'impact des pratiques mises en œuvre par les agriculteurs. L'effet d'atténuation des différents couverts agricoles par effet d'albédo doit également être investigué.

Recommandations :

- **Financer plus de recherche** sur ces sujets
- **Développer des outils** permettant de contribuer aux quantifications des pratiques de stockage (ex : suivis satellitaires ou aériens)

⁴⁹² Rapport « Quels emplois et compétences pour une agriculture bas carbone, résiliente et prospère », The Shift Project, Novembre 2024

2. Recommandations à destination des acteurs territoriaux

Définir des politiques de transformation, d'adaptation et d'atténuation en agriculture implique d'articuler un ensemble de problématiques liées (biomasse, eau, énergie, biodiversité, etc.) qu'il est pertinent et nécessaire de penser à un échelon régional ou territorial représentatif de la géographie et des contextes pédoclimatiques locaux. Ces politiques concernent aussi des dynamiques démographiques spécifiques à chaque territoire. De plus, les instruments relatifs à la transition agroécologique sont pour l'essentiel aujourd'hui pensés à l'échelle de la parcelle ou de l'exploitation agricole alors que l'action serait plus efficace en étant organisée collectivement à l'échelle du paysage ou du territoire⁴⁹³. Ainsi, les collectivités locales, les filières, les coopératives, les Chambres d'agriculture et tous les acteurs de terrain ont un rôle majeur à jouer dans l'accompagnement de la transition de l'agriculture locale.

A. Planifier la transformation agricole à l'échelle du territoire

Chaque territoire offre une palette agricole spécifique et originale. Chacun est affecté de façon particulière par le changement climatique. L'organisation et l'adaptation des systèmes agricoles locaux, particulièrement urgente sur les territoires les plus exposés ou à risque face au changement climatique (grand quart Sud-Ouest, Méditerranée, littoraux, montagne, zones inondables...) demande de l'anticipation et des moyens organisationnels conséquents.

Recommandations :

- **Décliner les objectifs de planification agricole et alimentaire nationaux à l'échelle territoriale**, avec une réflexion particulière sur l'autonomie alimentaire, les équilibres de fertilisation et les vulnérabilités au changement climatique propres au territoire.
- **Rendre cette planification aussi opérationnelle que possible au regard des compétences des acteurs territoriaux impliqués** (politique d'installation cohérente, commande publique...)
- **Intégrer un critère de potentiel agronomique des sols dans les zonages des plans d'urbanisation** afin de préserver les sols les plus fertiles.
- **Contribuer à la diffusion de connaissances** et de pratiques adaptées au contexte du territoire :
 - **Faciliter le lien entre la recherche et les filières de productions régionales.**
 - **Faciliter l'accès aux formations des Chambres d'Agriculture** sur les pratiques agroécologiques adaptées au contexte et objectifs du territoire pour les professionnels du secteur (agriculteurs, conseillers, enseignants).

Pour 77 % des agriculteurs ayant répondu à la Grande Consultation des Agriculteurs⁴⁹⁴, permettre aux acteurs des territoires d'adapter les réglementations nationales et européennes aux spécificités locales serait pertinent pour accélérer la transition environnementale de l'agriculture française

« Il faut un réel appui politique et un déploiement local, un double appui national et un relais régional »

⁴⁹³ Benoît Grimonprez. L'action collective territoriale : chaînon manquant politique de la transition agroécologique. 2023 <https://hal.science/hal-04401740/>

⁴⁹⁴ Résultats de la Grande Consultation des Agriculteurs 2024, <https://theshiftproject.org/article/resultats-grande-consultation-des-agriculteurs/>

B. Favoriser les systèmes agricoles résilients et la reconnexion des productions végétales et animales sur le territoire

Recommandations :

- **Soutenir les productions permettant une meilleure autonomie alimentaire** territoriale (fruits et légumes, élevage si nécessaire à l'équilibre du territoire, etc.) en renforçant les Plans alimentaires territoriaux.
- **Accompagner l'arrêt de cultures et productions à risque climatique** et soutenir le développement de cultures plus adaptées au climat futur attendu et de cultures non irriguées.
- **Soutenir des modes d'élevages économes et autonomes**, plus résilients, avec une stratégie de planification territoriale (répartition des élevages en nombre et types selon les potentialités et capacités du milieu, lien avec les surfaces nécessaires à l'alimentation animale sous la forme d'une polyculture-élevage territoriale, meilleure organisation de la valorisation des coproduits céréaliers pour les monogastriques).
- **Développer la sélection variétale locale**, en associant les différentes parties prenantes (recherche, semenciers, réseau de semences paysannes) et **soutenir et/ou créer des conservatoires dynamiques locaux des ressources biologiques** (végétales et animales).
- **Favoriser le déploiement de la collecte et la mise à disposition de fertilisants organiques locaux** (biodéchets et excréta).

C. Organiser les arbitrages à mener sur les usages de la biomasse et des ressources en eau

L'intermittence attendue de production de biomasse en contexte climatique variable et soumis à des événements extrêmes récurrents impliquera des arbitrages entre ses différents usages. A quelle échelle géographique faut-il les déterminer ? Avec quelle gouvernance ? Comment choisir entre les exportations de biomasse agricole et la nécessité d'en retourner suffisamment au sol pour en conserver la fertilité et la résilience ? Comment arbitrer la concurrence entre usages des ressources en eau (alimentation en eau potable, irrigation, production d'énergie...) ? Ces sujets difficilement tranchés créent un contexte d'incertitude pour les agriculteurs et les filières et des tensions dans la société qui bloquent l'évolution du système.

Recommandations :

- **Soutenir les activités des observatoires régionaux de la biomasse**
- **Organiser le dialogue et les arbitrages par la coopération** au sein et entre les territoires par le développement de l'ingénierie de coopération sur les territoires, à l'image par exemple du projet de démonstrateur de bioéconomie territoriale Cyclorganic⁴⁹⁵ sur le territoire pilote du Grand Reims.
- **Bien documenter les enjeux liés à la ressource en eau** (volume, qualité, usages) à court, moyen et long terme à l'échelle du territoire, définir les priorités d'usages en concertation avec les parties prenantes et **assurer une gouvernance équilibrée et légitime** de cette ressource .
- Conditionner tout développement d'infrastructure d'irrigation lourde à une **étude d'impact rigoureuse**.
- **Faciliter le déploiement de CUMA d'irrigation ou d'autres formes collectives** pour faciliter la transition vers des systèmes sobres en eau et adaptés aux spécificités pédoclimatiques locales.
- **Mettre en place des dispositifs de soutien (type MAEC systèmes)** pour valoriser et soutenir financièrement les pratiques sobres en matière d'irrigation.

⁴⁹⁵ <https://www.terrasolis.fr/projets/cyclorganic-demonstrateur-de-bioeconomie-territoriale/>

D. Accompagner les coopératives locales ou les agriculteurs dans la structuration de filières nouvelles ou l'adaptation de filières existantes

La diversification des productions nécessite d'anticiper et planifier la structuration de nouvelles filières (besoins d'infrastructures, de services, de compétences, de débouchés sécurisés...), afin de lever tous les verrous sociotechniques qui pourraient en bloquer le développement. Certaines cultures en particulier nécessitent des outils de transformation plus conséquents, à échelle industrielle, tel le chanvre et ses applications industrielles variées.

Recommandations :

- **Soutenir les coopératives ou les agriculteurs dans la création de nouvelles filières de légumineuses, de cultures à bas niveau d'intrants ou d'élevages plus résilients et à plus haute valeur ajoutée.**
- **Adapter les équipements des coopératives à la diversification** de la collecte (ex. : équiper les silos de trieurs multi-espèce).
- **Soutenir financièrement le maintien de certains équipements ou services à « effet de seuil »**, nécessaires à la préservation des filières locales (ex. : outils de transformation, etc.).

3. Recommandations à destination des agriculteurs

Rappelons que les décisions de l'agriculteur sont fortement dépendantes du contexte socio-économique et politique et que les recommandations ci-dessous ne se conçoivent pas sans l'évolution et la clarification de ce contexte afin de créer les conditions idoines pour l'évolution des pratiques. À l'échelle de la ferme, la mise en œuvre de pratiques agroécologiques, dans une vision systémique de son environnement (biodiversité, lutte contre l'érosion et la dégradation du sol, gestion de l'eau...), contribue à la résilience et à la sécurisation du système de production. Elle vise à permettre la préservation de la fertilité des sols à moyen et long terme en même temps que l'adaptation et l'atténuation du changement climatique. Cependant, ces pratiques peuvent conduire à une baisse des rendements et il n'est pas juste que ce soit à l'agriculteur de supporter seul les risques et les coûts de l'évolution de ses pratiques qui bénéficient à la collectivité.

A. Participer à la diffusion des connaissances sur les enjeux écosystémiques, climatiques et énergétiques

Les besoins de connaissances dépendent du profil de chacun et de son degré d'information sur les enjeux climatiques, énergétiques et écosystémiques. Les capacités et les envies de formation sont différentes selon les situations, mais l'Intelligence collective des agriculteurs est source d'une grande richesse pour découvrir, progresser et imaginer les meilleures solutions adaptées à son contexte, tout autant que pour partager ses échecs et difficultés.

Recommandations :

- **S'engager dans des collectifs d'agriculteurs ou des associations** promouvant les pratiques agroécologiques et assurant un conseil technique indépendant des intérêts économiques.
- **Se former tout au long de sa carrière** de façon formelle et informelle (se documenter, échanger avec ses pairs, suivre des formations...).
- **S'informer sur la situation de la ferme et la vulnérabilité comme les opportunités de son système** par rapport aux enjeux climatiques et énergétiques, en établissant un diagnostic (agroécologie, bilan carbone, indice de régénération...).

B. Engager sa ferme dans des pratiques agroécologiques

L'engagement dans des pratiques agroécologiques contribue à la résilience du système de production et à son adaptation, à l'atténuation du changement climatique et à la préservation de la biodiversité. Un ensemble de leviers sont activables à l'échelle des fermes, en productions animales comme végétales (voir partie III.).

De façon globale, ils passent par la diversification des cultures ou productions, dans la mesure des possibilités agronomiques, commerciales et de main d'œuvre disponible, par l'adaptation des espèces et races à l'évolution du contexte climatique, et par la recherche d'une synergie cultures/élevage, au sein de la ferme ou entre fermes sur un même territoire. Ils reposent aussi sur la préservation ou la reconstitution d'un taux de matière organique du sol suffisant en combinant couverture végétale et recours accru aux fertilisants organiques. La préservation ou l'implantation d'infrastructures paysagères et l'optimisation de la gestion de l'eau sur le parcellaire (aménagements, keyline design...), ainsi que l'insertion de plantations agroforestières ou de cultures pérennes sont favorables à la biodiversité tout en offrant la possibilité de stocker du carbone de façon naturelle et autonome.

Annexes

Annexe 1 : Indicateurs de bilan français des principales filières agricoles et agroalimentaires en volumes

	Taux d'auto-approvisionnement	Évolution du Taux d'auto-approvisionnement sur 10 ans	Taux de couverture de la consommation par la production nationale'	Capacité d'exportations	Dépendance aux importations
	Production / Consommation		(Production - exportations) / Consommation	Exportations / (Production + importations)	Importations / Consommation
	moyenne 3 dernières années	Différence entre moyenne 2019-2021 et moyenne Triennale 10 ans avant (souvent 2009-2011)	moyenne 3 dernières années	moyenne 3 dernières années	moyenne 3 dernières années
Blé tendre	195%	4%	99%	49%	1%
Blé dur (yc pâtes et semoule)	144%	-42%	36%	54%	55%
Orges	292%	47%	95%	67%	2%
Mais	142%	-34%	89%	35%	8%
Riz	8%	-9%	0%	8%	100%
Crème	103%	-14%	64%	28%	36%
Fromage	120%	-16%	64%	36%	36%
MGS (beurre)	78%	-7%	60%	15%	40%
Poudre de lait écrémé	265%	97%	74%	66%	26%
Poulet	81%	-24%	58%	19%	42%
Viande porcine	103%	0%	74%	23%	26%
Ovins	53%	9%	47%	5%	53%
Viande bovine	95%	1%	79%	13%	21%
Soja	48%	33%	32%	14%	67%
Colza	95%	-21%	63%	24%	34%
Tournesol	116%	4%	76%	29%	23%
Féveroles	106%	-196%	78%	22%	20%
Pois	139%	-28%	86%	36%	6%
Fruits tempérés	82%	-14%	63%	16%	37%
Légumes frais	84%	-3%	67%	15%	33%

Source : Agriculture Stratégies, « Souveraineté alimentaire : un éclairage par les indicateurs de bilan », Mars 2023. D'après France Agrimer

Annexe 2 : Comparaison du potentiel attaché aux cultures jugées résilientes (Sources : INRAE, Idele, Terres Inovia)

1^{ère} partie (soja, prairies multi-espèces, chanvre, pistache)

Comparaison du potentiel attaché aux cultures résilientes	Soja	Prairies multi-spécifiques (avec légumineuses)	Chanvre	Pistache
Principaux atouts	Richesse protéique (entre 36 et 42 %) / Forte capacité de fixation symbiotique	Valorisation de complémentarités entre espèces fourragères / Production d'un fourrage équilibré et enrichi en MAT / Résilience climatique / Économies d'intrants (engrais minéraux, eau, ...)	Faibles besoins en phytosanitaires / Culture très favorable à la biodiversité fonctionnelle (arthropodes prédateurs) / Bonne résistance à la sécheresse et aux maladies / Très bon précédent (sol propre et meuble)	Forte résistance à la sécheresse / Faibles besoins en intrants (eau, phytosanitaires, carburants fossiles, ...)
Principales fragilités	Vulnérabilité à la sécheresse et aux excès d'eau	Équilibres parfois difficiles à trouver entre espèces / difficultés au semis et à la récolte (rythmes de développement et d'arrivée à maturité différents selon les espèces)	Légère vulnérabilité aux défauts du sol (semelle de labour, compaction localisée, ...)	Vulnérabilité aux maladies fongiques se développant avec l'excès d'humidité (alternaria alternata, verticilliose, ...)
Substitutions envisagées	Maïs ensilage, blé et autres céréales à pailles	Prairies temporaires et permanentes uniquement couvertes de graminées	Maïs ensilage, blé, colza	Vergers de fruitiers à noyau (abricotiers, pêchiers, ...) / Céréales à pailles / Oliviers
Débouchés envisagés	Alimentation humaine (tofu, jus de soja, huiles, ...), alimentation animale (tourteaux de soja), bioénergies (biodiesel)	Fourrages de qualité en contextes défavorables / Débouchés en méthanisation	Alimentation humaine (chènevis, huiles) / Alimentation animale (plante entière utilisable dans les rations bovines) / Multiplicité de secteurs extra-agricoles (construction, textile, cosmétique, plasturgie, papèterie, literie, ...)	Alimentation humaine (pistaches apéro, pâtisserie confiserie, ...)
Besoins prioritaires en termes de planification	Structuration de filières (usines de trituration, ...)	Besoin d'outils d'optimisation pour la conception des mélanges / Efforts attendus en matière de diversité variétale sur les espèces fourragères (notamment les légumineuses)	Besoins d'infrastructures et de compétences métiers spécifiques en lien avec la multiplicité de débouchés industriels	Sécuriser des débouchés suffisants / Développement du tissu infrastructurel pour les étapes post-récolte de pistache (traitement, séchage, stockage, ...)

2^{ème} partie (tournesol, sorgho, méteil, pois chiche)

Comparaison du potentiel attaché aux cultures résilientes	Tournesol	Sorgho	Méteil (mélange céréales – légumineuses)	Pois chiche
Principaux atouts	Résistance à la sécheresse / Précédent cultural de qualité / Haute teneur en protéines / Peu d'interventions mécaniques nécessaires	Besoins en eau moindres que ses cultures concurrentes (maïs)	Rupture du cycle des adventices et des bioagresseurs / Fourrages enrichis en MAT / Faibles besoin en intrants (eau, engrais minéraux, ...)	Faibles besoins en intrants (eau, engrais minéraux) / Résistance à la sécheresse / Haute teneur en protéines
Principales fragilités	Vulnérabilité aux maladies fongiques / Instabilité des rendements	Risques basses température (en dessous de de 12°C) / Vulnérabilité aux maladies fongiques (fusariose, ...)	Difficulté dans la récolte (maturité différente selon les espèces incluses dans le mélange)	Vulnérabilité aux maladies fongiques / Délais de retour consécutifs (6 ans)
Substitutions envisagées	Maïs, colza	Maïs grain irrigué / Introduction sous forme de CIPAN	Céréales à pailles, maïs ensilage	Cultures de printemps, colza
Débouchés envisagés	Production d'huiles alimentaires et industrielles / Alimentation animale (tourteaux riches en protéines) / Biocarburants et biomatériaux	Fourrages dans les zones sèches / Biocarburants / Alimentation humaine (aliments, bières, ...)	Alimentation animale (production d'un fourrage riche en MAT et équilibré) / Rôle de fertilisation des sols	Alimentation humaine (aliments, farines, ...) / Intégration dans les rations animales
Besoins prioritaires en termes de planification	Manque de diversité variétale / Structuration de filières pour valoriser les débouchés multiples	Manque de diversité variétale / Structuration de filières pour valoriser les débouchés multiples	Efforts d'optimisation des mélanges (besoin d'outils et de formation) / structuration de filières	Besoin d'infrastructures de stockage et de tri adaptées

Annexe 3 : Potentiel des principales légumineuses à graines

Comparaison du potentiel des espèces de légumineuses	Soja	Lentille	Haricot	Féverole
Principaux atouts	Richesse protéique (entre 36 et 42 %) / Forte capacité de fixation symbiotique	Belle capacité d'association avec le blé / Qualité nutritionnelle	Belle capacité d'association avec le maïs / Résilience au changement climatique	Belle capacité d'association (céréales, autres légumineuses) / Concentré protéique et énergétique (azote)
Principales fragilités	Vulnérabilité à la sécheresse et aux excès d'eau	Faiblesse des rendements + sensibilité aux coups de chaleur (seuil des 28°C)	Moindre effet fertilisant que les autres légumineuses	Sensibilité aux bioagresseurs (bruches) et aux coups de chaleur (seuil des 25°C)
Sole actuelle et potentiel d'expansion	156 400 ha (2023) / x4 ou x5 envisageable	34 900 ha (2021) / x2 à x4 envisageable	29 400 ha (2022) / x4 à x6 envisageable	80 000 ha (2023) / x2 à x4 envisageable
Zones biogéographiques favorables (à horizon 2050)	Bassin parisien et Alsace	Grand Est, Hauts-de-France et Massif Central	Toute la France hexagonale	Grand Est, Hauts-de-France et Massif Central
Profil nutritionnel	Substitut « complet » aux protéines animales / Richesse en acides aminés essentiels et en nutriments (calcium, potassium)	Richesse en fer, en folates et en fibres / Faiblesse en méthionine (besoin d'être complété par des céréales)	Richesse en fibres, en potassium, en fer et en antioxydants / Bénéfique pour la digestion et la santé cardiaque	Apport élevé en fibres, en fer et en magnésium / Bénéfique pour la digestion et la santé cardiaque

Sources : *Pellerin S. et al., 2013, Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? Potentiel d'atténuation et coût de dix actions techniques. Synthèse du rapport d'étude, INRA (France), 92 p. + Rapport de l'IDELE (<https://idele.fr/detail-article/eleavage-peut-il-se-passer-du-soja-importe>) + dires d'expert (Marie-Hélène Jeuffroy).*

Annexe 4 : Jeux d'hypothèses pour des scénarios de réintroduction des légumineuses à horizon 2050

Dans le cadre d'une réflexion parallèle spécifique sur les légumineuses, l'outil de calcul ClimAgri@ conçu par Solagro a été mobilisé pour effectuer des simulations de leur réintroduction à grande échelle dans les assolements.

7 principales sorties quantitatives sont livrées par le calculateur à l'échelle de la ferme France : un bilan fourrager, un bilan des flux d'azote, un potentiel nourricier (protéines animales et végétales), un bilan énergétique (consommation de carburants fossiles et autres intrants énergétiques), un bilan GES (avec une distinction par gaz impliqué), un bilan environnemental (émissions d'ammoniac et d'oxyde d'azote), un potentiel en termes de production de bio-énergies (biométhane, bioéthanol, biodiesel, ...).

Le potentiel d'atténuation unitaire (incluant les émissions directes et indirectes liées à l'exploitation) par hectare de légumineuse implanté est :

- pour les légumineuses à graines, estimé à **636 kgCO₂e/ha/an**,
- pour le soja, estimé à **636 kgCO₂e/ha/an**,
- pour les légumineuses fourragères, estimé à **284 kgCO₂e/ha/an**.

Base de départ (état de référence fondé sur l'année 2022) : sole de légumineuses à graines et de légumineuses prairiales estimée respectivement à 0,4 et à 1,7 Mha (source Agreste et SEMAE).

Jeux d'hypothèses par scénario	Projection 1	Projection 2	Projection 3	Projection 4
Assiette retenue	8 Mha	6 Mha	7,2 Mha	6,8 Mha
Substitutions culturelles pratiquées	Soja et légumineuses à graines en substitution de céréales (blé, orge, avoine, ...) Forte hausse des légumineuses fourragères en substitution de graminées	Hausse des légumineuses à graines en substitution du maïs ensilage et de céréales à pailles à vocation fourragère (triticale, avoine, ...) Légère hausse des légumineuses prairiales en substitution de graminées	Forte hausse du soja en substitution de céréales à pailles (blé, orge, avoine, ...) et de maïs grain Forte hausse des légumineuses prairiales en substitution de graminées	Croissance la plus forte (tout scénario confondu) des légumineuses à graines en substitution du maïs ensilage et des céréales à pailles Accroissement significatif des légumineuses prairiales en substitution de graminées
Pouvoir d'atténuation GES	11,4 %	11,1 %	14,1 %	12,8 %
Pouvoir d'atténuation N₂O	35,2 %	30,2 %	33,6 %	32,9 %
Besoin d'engrais minéraux	0,96 Mt	1,08 Mt	0,99 Mt	1,04 Mt
Fixation symbiotique	1,20 Mt	0,95 Mt	1,08 Mt	1,02 Mt

Sources : [Pellerin S. et al., 2013, Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? Potentiel d'atténuation et coût de dix actions techniques. Synthèse du rapport d'étude, INRA \(France\), 92 p. + données pré-inscrites ClimAgri \(Planète GES 2007, Recensement agricole 2022\) + Rapport de l'IDELE \(<https://idele.fr/detail-article/lelevage-peut-il-se-passer-du-soja-importe>\) + dires d'expert \(Marie-Hélène Jeuffroy, Gaëtan Louarn, Bernadette Julier\).](#)

Annexe 5 : Potentiel des légumineuses fourragères

Comparaison du potentiel des espèces de légumineuses fourragères	Soja	Luzerne	Trèfle	Sainfoin
Principaux atouts	Forte richesse protéique et en lysine / Multi-usages (débouchés fourragers, énergétiques et alimentaires)	Rendement très élevé / Résilience aux stress hydriques / Forte richesse protéique et en lysine / Amélioration de la qualité du sol	Rendement élevé pour certaines variétés (trèfle blanc) / Très adapté au pâturage / Haut potentiel d'expansion en prairies permanentes	Pas de caractère météorisant (à la différence de la luzerne) / Forte richesse protéique / Propriétés thérapeutiques (tanins) / Adapté aux sols pauvres et calcaires
Principales fragilités	Vulnérabilité à la sécheresse et inversement aux excès d'eau	Moins adaptée au pâturage que les graminées / Risque de lixiviation après fauche	Faible résistance à la sécheresse et aux excès d'eau / Enracinement moins profond que les luzernes / Enjeu maladies (puçerons)	Effet fertilisant moindre que les autres légumineuses prairiales (différentiel de fixation symbiotique) / Faible résilience aux excès d'eau
Potentiel d'expansion	x3 à x5 envisageable	x2 à x6 envisageable	x2 à x6 envisageable	x2 à x4 envisageable
Modalités de réimplantation	Diversité de registres (cultures pures, associations avec maïs ensilage)	Principalement en prairies temporaires et possibilités en STH	En prairies temporaires et permanentes (au travers d'associations avec du ray grass)	En prairies temporaires (en association avec luzerne ou autre légumineuse prairiale)
Cheptels et autres débouchés visés	Cheptels monogastriques et ruminants (dans une moindre mesure) / Débouchés alimentaires et énergétiques	Cheptels ruminants en systèmes extensifs / Méthanisation (haut potentiel méthanogène)	Cheptels ruminants en systèmes extensifs / Méthanisation dans une moindre mesure	Cheptels ruminants en systèmes extensifs
Profil nutritionnel	Substitut « complet » aux protéines animales / Richesse en acides aminés essentiels et en nutriments (calcium, potassium)	Richesse en lysine, en calcium, en vitamine K et en fibres. Profil « complet » en acides aminés (fourrage de haute qualité)	Richesse en lysine, en calcium et en antioxydants	Richesse en fibres, en nutriments (calcium, magnésium) et en tanins condensés (baisse de la charge parasitaire)

Sources : *Pellerin S. et al., 2013, Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? Potentiel d'atténuation et coût de dix actions techniques. Synthèse du rapport d'étude, INRA (France), 92 p. + Rapport de l'IDELE (<https://idele.fr/detail-article/lelevage-peut-il-se-passer-du-soja-importe>) + Louarn et al., 2016, Dynamique de l'azote dans les associations graminées -légumineuses : quels leviers pour valoriser l'azote fixé ? Fourrages, 226, pp.135-142 + dires d'expert (Marie-Hélène Jeuffroy, Bernadette Julier).*

Annexe 6 : Deux indicateurs permettant d'apprécier le degré de résilience des systèmes irrigués (source Arvalis)

Analyse comparée de la dépense énergétique des dispositifs d'irrigation

Analyse comparée des dispositifs d'irrigation	Canons enrouleurs	Pivots / rampes (aspersion)	Systèmes de couverture intégrale	Systèmes de goutte-à-goutte (micro-irrigation)
Dépense énergétique	0,6 kWh/m ³	0,4 kWh/m ³ (0,3 voire 0,2 en contextes favorables)	0,4 kWh/m ³ (0,3 voire 0,2 en contextes favorables)	Entre 0,1 et 0,2 kWh/m ³
Principales cultures ciblées	Maïs, céréales	Maïs, soja	Maraîchage, cultures légumières de plein champ	Maraîchage vignes, pommes de terre
Souplesse du système	Systèmes mobiles et ajustables	Non déplaçables	Mobiles et facilement réparables	Fixes (dispositifs enterrés) ou mobiles (matériel en surface)

Analyse comparée des besoins en eau et de l'efficacité d'utilisation de l'eau pour les principales cultures irriguées

Analyse comparée des cultures irriguées	Maïs	Blé (blé tendre / blé dur)	Sorgho	Pommes de terre	Orge de printemps
Besoins en eau (en mm)	500	435	415	360	280
Efficacité d'utilisation de l'eau (en q/ha/10 mm)	Entre 3 et 4	2,5 (blé tendre) / entre 2 et 3 (blé dur)	Entre 3 et 4	Entre 6 et 8	Environ 2

Sources : Arvalis (article paru dans la revue Perspectives agricoles) -> : <https://www.perspectives-agricoles.com/conduite-de-cultures/modelisation-des-besoins-en-eau-combien-consomment-les-cultures>

Point d'attention sur le niveau de pression nécessaire à l'acheminement de l'eau d'irrigation

Une attention doit être portée au niveau de pression nécessaire pour acheminer l'eau sur la parcelle, qui est fonction de la profondeur à laquelle doit s'effectuer le pompage (1 bar⁴⁹⁶ de pression pour 10 mètres de dénivelé) ; un paramètre source de disparités énergétiques selon les zones irriguées.

⁴⁹⁶ Unité de pression égale à 10⁵ pascals, qui correspondent à une mesure de la pression exercée par une force d'un newton appliquée normalement et uniformément sur une surface d'un mètre carré.

Annexe 7 : Emissions de GES des systèmes d'élevage français

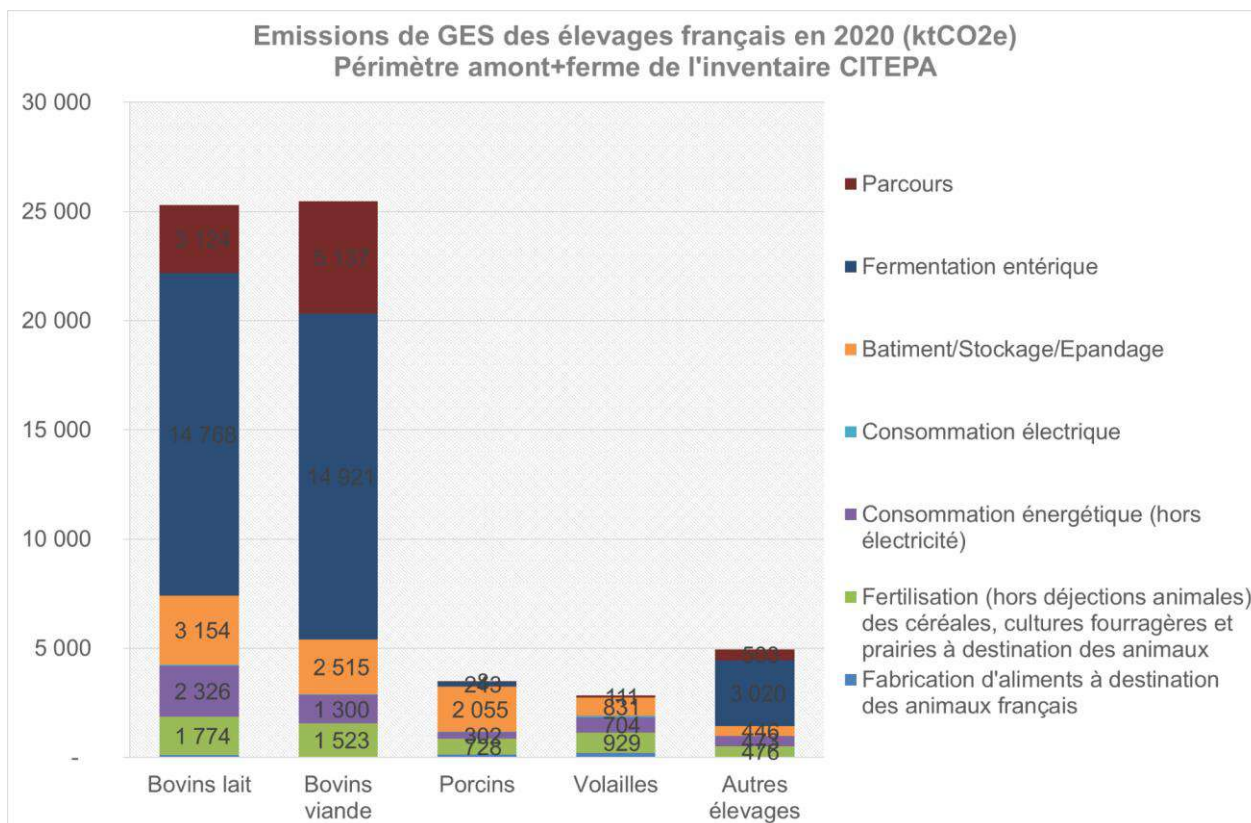
D'après l'inventaire Floréal 2022 (données 2020)⁴⁹⁷, dernier inventaire disponible, **les émissions de GES des élevages français se répartissent entre les bovins laitiers (42 %), les bovins viande (40 %), les porcins (6 %), les volailles (5 %) et les autres élevages (8 %)**. Pour rappel, ces différents décomptes n'intègrent pas les émissions importées, et en l'occurrence celles de l'alimentation animale importée, mais se situent sur un périmètre inventaire (émissions liées à la fabrication d'aliments sur le territoire national, à la fertilisation des surfaces du territoire national à destination des animaux, à la transformation agroalimentaire des produits français et de produits importés).

Sur le périmètre d'inventaire restreint à l'amont et à la ferme (donc hors transformation agroalimentaire), **ces répartitions restent quasi identiques (bovins laitiers 41 %, bovins viande 41 %, porcins 6 %, volailles 5 % et autres élevages 8 %)**.

L'essentiel des émissions est lié à la fermentation entérique et aux déjections (bâtiment, stockage, épandage et pâture), avec une hiérarchisation des postes différente selon les élevages. Ainsi, toujours sur le périmètre d'inventaire **restreint à l'amont et à la ferme, hors alimentation animale importée** :

- Concernant les élevages bovins lait et bovins viande, le premier poste d'émissions de GES est celui de la fermentation entérique (respectivement 14,7 MtCO_{2e} soit 58 % et 14,9 MtCO_{2e} soit 59 % du total des émissions respectives de ces élevages sur ce périmètre) ;
- Concernant les élevages porcins, le premier poste d'émissions de GES concerne le bâtiment et les pratiques de stockage et d'épandage des déjections (2 MtCO_{2e} soit 59 % du total des émissions des élevages porcins sur ce périmètre) ;
- Concernant les élevages de volailles, le premier poste d'émissions de GES est celui de la fertilisation des cultures (sur le territoire national) nécessaires à l'alimentation animale, suivi du bâtiment et des pratiques de stockage et d'épandage des déjections (respectivement 0,9 MtCO_{2e} soit 33 % du total et 0,8 MtCO_{2e} soit 29 % du total des émissions des élevages de volailles sur ce périmètre).

⁴⁹⁷ Citepa, 2022. Rapport d'inventaire Floréal – Edition 2022



Émissions de GES des élevages français en 2020 (périmètre amont et ferme de l'inventaire CITEPA)
Source CITEPA⁴⁹⁸

Il est cependant nécessaire de considérer également les émissions indirectes liées à l'alimentation animale importée, notamment au soja (l'alimentation animale produite sur le territoire domestique étant intégrée dans les décomptes présentés ci-dessus) et le niveau de dépendance de chacune des filières d'élevage, ce qui modifie à la fois le niveau d'émissions "total" de chacune des filières d'élevage, et la hiérarchisation des différents types d'émissions au sein de chacune d'entre elle.

En effet, en considérant que les 2,7 Mt de tourteaux de soja sont très majoritairement importées (principalement du Brésil)⁴⁹⁹, avec un facteur d'émission de 1,39 kgCO₂e/kg de soja importé du Brésil⁵⁰⁰, les émissions indirectes du secteur de l'élevage uniquement liées au soja importé peuvent être estimées à environ **3,7 MtCO₂e** d'émissions indirectes. Ce montant paraît cohérent avec l'estimation fournie par le SGPE d'environ **4 MtCO₂e** d'émissions indirectes liées à l'alimentation animale.

En ne considérant que la part des émissions liées au soja, et la consommation de tourteaux de soja dans chacune des filières d'élevages (pour rappel : 44 % par les élevages de volaille, 36 % pour les bovins laitiers et mixtes, 8 % pour les bovins à viande et 6 % pour les porcins⁵⁰¹), les montants d'émissions indirectes pour les différentes filières d'élevage seraient alors les suivants en ordre de grandeur :

- 1,6 MtCO₂e d'émissions indirectes liées au soja importé pour les élevages de volaille,
- 1,3 MtCO₂e d'émissions indirectes liées au soja importé pour les élevages de bovins laitiers et mixtes,
- 0,3 MtCO₂e d'émissions indirectes liées au soja importé pour les élevages de bovins viande,
- 0,2 MtCO₂e d'émissions indirectes liées au soja importé pour les élevages porcins.

⁴⁹⁸ Citepa, 2022. Rapport d'inventaire Floréal – Edition 2022

⁴⁹⁹ <https://www.franceagrimer.fr/fam/content/download/72952/document/MOL-0124.pdf?version=1>

⁵⁰⁰ ECOALIM : une base de données sur les impacts environnementaux des matières premières utilisées en France pour l'alimentation animale 48es Journées Recherches Porcines (FRA), 2-3 février 2016, Paris, p. 49-54

⁵⁰¹ <https://hal.inrae.fr/hal-03128009v1>

Annexe 8 : L'efficacité nette énergétique et protéique, une approche permettant de mesurer et nuancer la compétition entre alimentation animale et alimentation humaine

Si les animaux d'élevage sont considérés comme des convertisseurs peu performants d'énergie (selon la FAO, il faudrait en moyenne 7 kcal végétales pour produire 1 kcal de produits animaux, avec une variabilité forte selon les animaux allant de 3 kcal pour les poulets de chair à 16 kcal pour les bovins viande⁵⁰², ou encore de 2,5 à 10 kg de protéines végétales pour 1 kg de protéines animales⁵⁰³), cette approche n'intègre pas le fait que les matières premières utilisées pour l'alimentation animale ne sont pas toutes consommables en l'état par l'être humain (végétaux riches en fibres tels que les fourrages ou les coproduits issus des industries agroalimentaires ou des bioraffineries), ni les aspects liés à la qualité nutritionnelle des protéines animales (notamment la présence de chaînes longues d'acides gras polyinsaturés, de minéraux et de vitamine B12).

Les besoins alimentaires des humains pouvant être appréhendés par la quantité d'énergie et de protéines, il est possible de quantifier l'efficacité ou au contraire la concurrence sur ces ressources végétales. L'efficacité (énergétique et/ou protéique) est définie comme le ratio entre les produits et les ressources utilisées. L'indice de consommation, son inverse, également utilisé pour évaluer l'efficacité alimentaire, est défini comme la quantité d'aliments ingérés par kg de produit animal.

Deux approches peuvent permettre de mesurer l'efficacité d'un système d'élevage. L'efficacité brute de conversion (des protéines, de l'énergie) prend en compte toutes les protéines ou l'énergie ingérées et produites. **L'efficacité nette, plus proche des flux physiques, ne considère que la part des protéines (ou de l'énergie brute) consommée et produite par l'élevage qui est valorisable en alimentation humaine.** Si cette efficacité est supérieure à 1, le système d'élevage a produit davantage de protéines animales (ou d'énergie) consommables par l'Homme qu'il n'a consommé de protéines végétales consommables par l'Homme. On peut alors le dire « contributeur net » à la production de protéines (ou d'énergie) pour l'alimentation humaine. Si l'indicateur est inférieur à 1, le système est consommateur net (de protéines ou d'énergie).

L'utilisation de cet indicateur d'efficacité nette permet d'éclairer le débat sur la contribution de l'élevage à l'alimentation humaine et sur la concurrence d'utilisation des ressources végétales. **L'élevage apparaît moins en compétition avec l'alimentation humaine que lorsque calculé sur la base de l'efficacité brute.** En effet, l'efficacité protéique nette des systèmes d'élevage étudiés est très supérieure à l'efficacité brute, mettant en avant clairement le rôle de recycleur de biomasse des animaux.

Au niveau mondial, il est considéré que les ruminants produisent 40 % de plus de protéines valorisables par l'homme qu'ils n'en consomment, les monogastriques consommeraient quant à eux deux fois plus de protéines valorisables par l'homme qu'ils n'en produisent⁵⁰⁴. **En France, certains systèmes d'élevage de ruminants comme de monogastriques présentent une capacité à contribuer de manière positive à la production de protéines pour l'alimentation humaine, sous réserve qu'ils consomment beaucoup de végétaux non valorisables en alimentation humaine (fourrages, coproduits).** C'est la raison pour laquelle les ruminants ne sont pas nécessairement moins efficaces que les monogastriques.

Concernant les ruminants, l'efficacité protéique nette des systèmes bovins laitiers herbagers et économes en concentrés est supérieure aux systèmes basés sur le maïs-ensilage et les concentrés. Les systèmes de bovins viande ont une efficacité protéique nette plus faible que les systèmes de bovins lait, ce qui s'explique par une vitesse de croissance et une teneur en protéines consommables de la carcasse plus faibles. Les systèmes laitiers herbagers sont par ailleurs les seuls systèmes de production animale pouvant avoir une contribution nette positive à la production d'énergie.

⁵⁰² Bender A., 1992. Meat and meat products in human nutrition in developing countries. FAO Edition. Rome, Italie.
<http://www.fao.org/docrep/T0562E/T0562E00.HTM>

⁵⁰³ Delaby *et al.*, 2014 Origin, quantities and fate of nitrogen flows associated with animal production

⁵⁰⁴ <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2211912416300013>

Concernant les monogastriques, les systèmes porcins et de volailles peuvent atteindre des efficacités protéiques nettes proches ou supérieures à 1 bien que les proportions de protéines consommables par l'humain de leurs rations soient globalement plus élevées que celles des ruminants, ce grâce à une teneur en protéines consommables des carcasses et une vitesse de croissance élevées. L'utilisation plus ou moins importante de coproduits et de maïs influençant fortement l'efficacité nette de ces systèmes, les systèmes porcins utilisant des quantités importantes de maïs, de coproduits de céréales et de tourteaux non valorisables aujourd'hui présentent donc une efficacité nette supérieure à 1⁵⁰⁵.

⁵⁰⁵ <https://productions-animales.org/article/view/2355>

Annexe 9 : Objectifs de décarbonation du secteur de l'élevage dans la SNBC2 et bilan en 2024

Pour le secteur de l'élevage, les objectifs planifiés par le SGPE correspondent à une réduction totale des émissions directes et indirectes de 11 MtCO₂e entre 2020 à 2030, décomposée comme suit :

- Une réduction de 5 MtCO₂e des émissions directes de CH₄ de l'élevage,
- Une réduction de 6 MtCO₂e des émissions indirectes de l'élevage, correspondant principalement à l'alimentation animale importée.

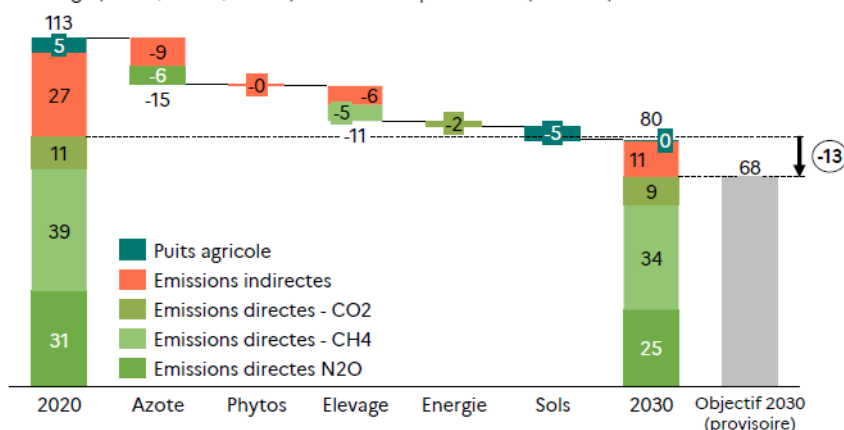
Les principaux leviers considérés dans cette projection sont : des gains d'efficacité dans la conduite des troupeaux (- 1.5 %), une réduction de 50 % des tonnages de soja importé et une poursuite tendancielle de la baisse des cheptels bovins et de la consommation intérieure de 12 %.

En termes d'évolution du système agricole, cela impliquerait notamment :

- Une multiplication par 2 des surfaces cultivées en légumineuses (+ 500 000 ha)
- + 10 % des bovins en pâturage dominant (30 % aujourd'hui)
- Une multiplication par 3 des effluents méthanisés chaque année (2,9 MtMS)
- - 8 % de cheptels porcins et - 12 % de cheptels bovins

Proposition de trajectoire pour 2030 : neutralité carbone des sols, baisse de 13 MtCO₂/an des émissions directes et baisse de 15 MtCO₂/an des émissions indirectes

Projection des émissions de GES sur le périmètre agriculture élargi selon un jeu d'hypothèses convergé (MASA, DGEC, INRAe) de leviers d'optimisation (MtCO₂e)



Azote : -600kt (-30%) de consommation de N minéral en 2030 (vs. -15% depuis 2000), +190ktN par fixation symbiotique, 21% des grandes cultures en AB (6% aujourd'hui); baisse de 40% des émissions de la production d'engrais locale

Elevage : gains d'efficacité dans la conduite des troupeaux (-1.5%), 50% de réduction du soja importé, constat d'une baisse tendancielle des cheptels bovins (et de la consommation intérieure) de 12% d'ici 2030.

Energie : 7% des tracteurs au B100 en 2030, 13% de gains d'efficacité énergétique (idem PL), 12% de taux d'incorporation biocarburants

Sols : moindre retournement des prairies permanentes (- 2,2Mt, 22kha), entretien des haies existantes (-0,9Mt), +5000km/an haies (0,15Mt), x2 surfaces en couverts intermédiaires (0,8Mt) +0,05Mha Agroforesterie (0,05Mt)

Projection des émissions de GES selon le SGPE à horizon 2030

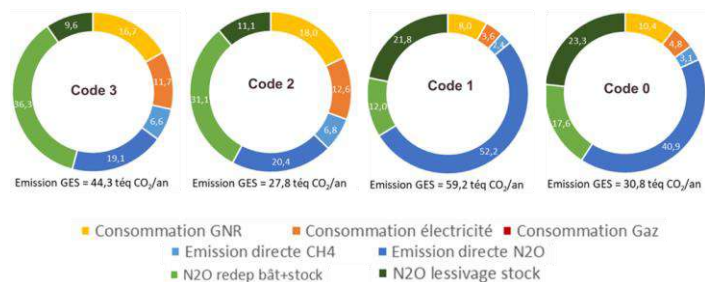
Source SGPE

Le bilan de la stratégie de décarbonation de l'élevage fait état de la maturité des différents leviers à date sur le périmètre des émissions directes uniquement. Ainsi, la décapitalisation tendancielle explique la majeure partie des baisses d'émissions de l'élevage attendues entre 2019 et 2030 ; cependant les mesures sur la méthanisation des effluents, les compléments alimentaires et la conduite des troupeaux restent à sécuriser.

Annexe 10 : Montants et profils d'émissions de GES pour les élevages de volailles (source ITAVI)

Cas des élevages de poules pondeuses

Les montants et profils d'émissions de GES des élevages de poules pondeuses étant très dépendants du type d'élevage (et en particulier du temps de présence en bâtiment et/ou en parcours), les leviers d'action et des potentiels d'atténuation sont spécifiques à chacun.



Répartition en pourcentage des émissions annuelles de gaz à effet de serre de différents ateliers de poules pondeuses dans un périmètre inventaire

Sources : ITAVI⁵⁰⁶

Ainsi les profils d'émission des systèmes code 3 (en cage aménagée) et 2 (au sol) sont très proches, avec une prépondérance de la consommation énergétique au bâtiment alors que les profils d'émissions des systèmes code 1 (plein air) et 0 (biologique) se différencient par une part d'émissions indirectes de protoxyde d'azote beaucoup plus importante, liée à la présence du parcours.

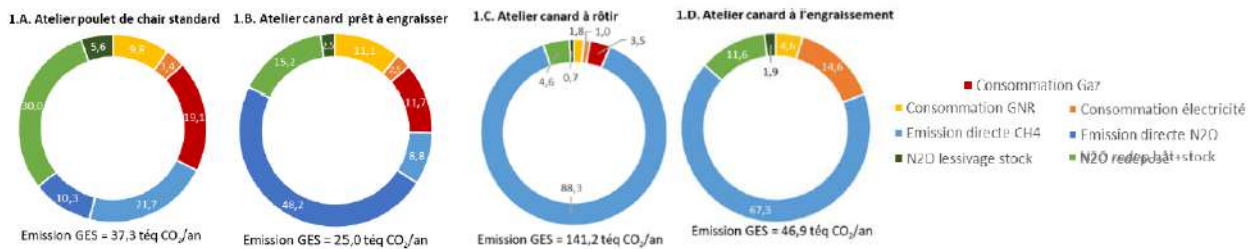
Les potentiels d'atténuation pour les élevages de poules pondeuses de code 3 (en cage aménagée) et 2 (au sol) concernent donc le pilotage et la décarbonation des sources d'énergie utilisées au bâtiment, notamment le GNR (et dépendent ainsi fortement de la décarbonation d'autres secteurs) et la gestion des fientes au bâtiment. Ceci est beaucoup moins vrai pour les élevages de codes 1 (plein air) et 0 (biologique) où les émissions liées au parcours (émissions directes de N₂O) nécessiteraient de mobiliser ces surfaces vers du stockage de carbone additionnel⁵⁰⁷.

Cas des élevages de volailles de chair

De la même manière, les profils d'émissions des différents systèmes d'élevage de volailles de chair sont très distincts (voir graphe ci-dessous). Les systèmes sur lisiers présentent un part importante d'émissions de CH₄ et pas d'émissions directes de N₂O (non générées car le lisier est en conditions anaérobies, générant par ailleurs davantage d'émissions de CH₄), alors que les élevages de poulets de chair et de canards prêts à engraisser présentent respectivement une plus grande part d'émissions de N₂O (en lien avec l'azote excrété au parcours) et une plus forte consommation énergétique.

⁵⁰⁶ <https://hal.inrae.fr/hal-03128009v1>

⁵⁰⁷ ITAVI Elevages de poules pondeuses et décarbonation : quels leviers et quel potentiel ?



Répartition en pourcentage des émissions annuelles de gaz à effet de serre de différents ateliers de volailles de chair dans un périmètre inventaire

Sources : ITAVI⁵⁰⁸

Pour les systèmes sur litière, les potentiels de réduction les plus intéressants sont donc liés aux techniques de réductions de consommations d'énergie fossile (substitution de la consommation de gaz, et dans une moindre mesure échangeur de chaleur et isolation des bâtiments), qui peuvent permettre de 0,1 à 19 % de réduction des émissions. Le compostage des déjections (et son export) peut également permettre de 6 à 14 % de réduction d'émissions.

Pour les systèmes sur lisier, les leviers d'action sont surtout liés à la gestion des effluents où l'export de la phase solide peut permettre d'éviter entre 30 et 50 % des émissions directes et indirectes de N₂O et de CH₄. La réduction des flux d'intrants azotés (et in fine de l'excrétion d'azote) est également un levier.

De manière plus générale, au-delà des leviers techniques proposés, l'aviculture pourrait également bénéficier de la décarbonation des sources d'énergie (secteur des transports et de l'énergie), offrant une marge de réduction d'émission de GES respectivement comprise entre 2 et 11 % (substitution du GNR) et 1 à 14 % (source d'électricité décarbonée) des émissions de GES⁵⁰⁹.

⁵⁰⁸ ITAVI Les élevages de volaille de chair français face à la décarbonation : état des lieux et défis (2024)

⁵⁰⁹ ITAVI Les élevages de volaille de chair français face à la décarbonation : état des lieux et défis (2024)

Annexe 11: Feuilles de route de décarbonation des filières bovins

Filière Bovins viande

En lien avec les travaux de l'Idèle, Interbev a défini et validé sa stratégie de décarbonation. Construite pour atteindre une réduction de 2,43 Mt CO₂e (prorata d'émissions de la filière bovin viande) et intégrant les orientations du cheptel laitier, son objectif est de maintenir la production de viande bovine et la souveraineté alimentaire de la France tout en conservant les surfaces en herbe et les haies essentielles pour la captation du carbone et la préservation de la biodiversité.

Concernant les effectifs, les hypothèses sont ainsi une stabilisation du cheptel de vaches allaitantes entre 2024 et 2030 (après une phase de recul réel entre 2019 et 2024 de - 19 %, soit au global une diminution de 1 % entre 2019 et 2030), et une poursuite de la baisse du cheptel laitier, à un rythme cependant moins soutenu que le rythme réel depuis 2019 (- 9 % entre 2019 et 2024, puis - 4 % entre 2024 et 2030).

L'éventail des leviers techniques de réduction des émissions de méthane est mobilisé :

- Optimisation de la conduite du troupeau
- Evolution des rations alimentaires moyennes des bovins et autonomie alimentaire augmentation de la part d'herbe, du pâturage, des céréales autoconsommées et baisse de la fertilisation azotée
- Usage de "compléments alimentaires" : diminution de la fermentation entérique de l'ordre de 20 % sur les effectifs non pâturants
- Sélection génétique : effet progressif sur le cheptel allaitant car peu d'insémination artificielle. Des gains supplémentaires sont attendus à partir de 2035 et à horizon 2050.
- Développement de la méthanisation en élevage : le potentiel de valorisation d'effluents bovins est estimé à 9 Mt (soit 11,3 % des effluents bovins lait et viande) pour 2000 installations en 2030, soit une valorisation de 1,35 Mt supplémentaires d'effluents issus des élevages viande.

Les trois derniers leviers font partie intégrante du programme Méthane 2030, programme sur 4 ans lancé en 2023 et dont l'ambition est de développer des solutions multi-leviers permettant de diminuer les émissions de méthane de l'élevage de 30 % en 10 ans.

Cette feuille de route impliquerait : une très légère baisse du taux de chargement (1,06 à 1,05 UGB/ha), une augmentation de 3,6 % des surfaces en herbe, une diminution de 43,4 % des surfaces en maïs, et un quasi-doublement des surfaces de céréales autoconsommées.

L'activation de ces leviers techniques permettrait une réduction des émissions de 2,56 Mt CO₂e très majoritairement (à hauteur de 69 %) via les deux premiers leviers correspondant à « l'effet cheptel et productivité », permettant de répondre à l'objectif proratisé 2030, avec un maintien du cheptel et des prairies à partir de 2024. L'effort à consentir à horizon 2050 nécessiterait quant à lui la mobilisation de leviers beaucoup plus ambitieux, d'autant plus à iso-cheptel ou iso-production, dont la maturité n'est pas encore certaine.

Annexe 12 : Valeurs de référence pour le calcul du potentiel nourricier

	Besoins moyens quotidiens (BMQ) d'un individu de référence en...	Apports réels moyens quotidiens (ARQ) d'un Français en...
Energies (Kcal/jour/personne)	2700	3500
Protéines totales (g/jour/personne)	52,5	100
Protéines animales (g/jour/personne)	22,5	69
Sources	<i>Rapport Energy and protein requirements 2008 - FAO</i>	<i>Table de Bilans Alimentaires France 2007 - FAO</i>

Description des Besoins moyens quotidiens et Apports réels moyens quotidiens d'un Français

Source : FAO

Notons que concernant les apports réels quotidiens des Français, d'autres sources, par exemple les données du CREDOC⁵¹⁰, donnent des chiffres différents : une consommation de protéines animales de l'ordre de 54 g/j et une consommation quotidienne totale de 82 g/j. Ces valeurs sont donc indicatives, et la différence entre les BMQ et les apports réels illustre que la consommation moyenne quotidienne des français est deux à trois fois supérieure aux besoins moyens quotidiens en protéines d'origine animale tels qu'estimés par la FAO et bien supérieures en termes d'apport énergétique en calories et en protéines totales.

⁵¹⁰ D'après Perraud, Sconda, Six, Hebel, Mariotti. (2020). Evolutions de la consommation de protéines par sources alimentaires entre 2010 et 2019 selon les profils de consommateurs. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4327397>

Annexe 13 : Scénarios de répartition des systèmes d'élevage bovins dans la modélisation

L'outil de modélisation propose pour les élevages bovins propose de définir l'évolution des systèmes d'élevage selon des scénarios, pour lesquels la répartition des différentes modalités d'élevage est pré-définie.

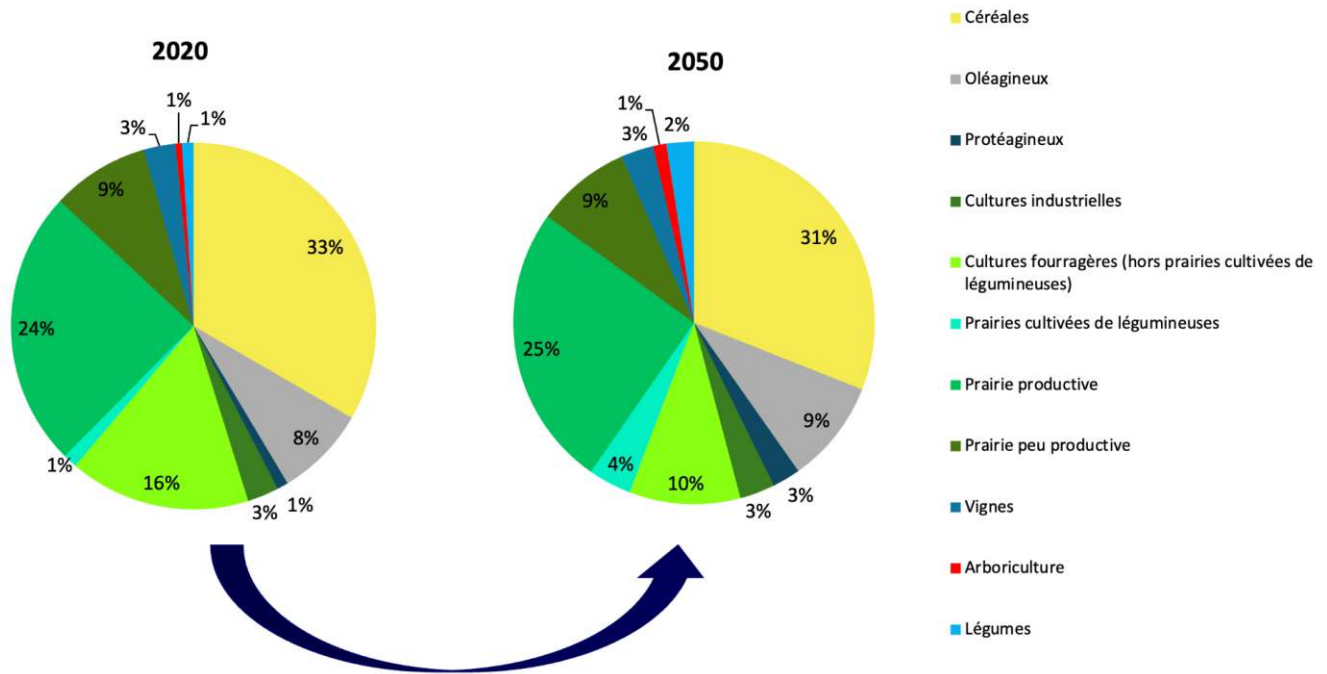
Pour les élevages bovins viande : deux modalités sont disponibles (élevages "plus pâturants et "moins pâturants" par rapport à la situation initiale)

Pour les élevages bovins laitiers : 7 scénarios sont disponibles, avec la répartition suivante des types de systèmes dans chacun de ces scénarios :

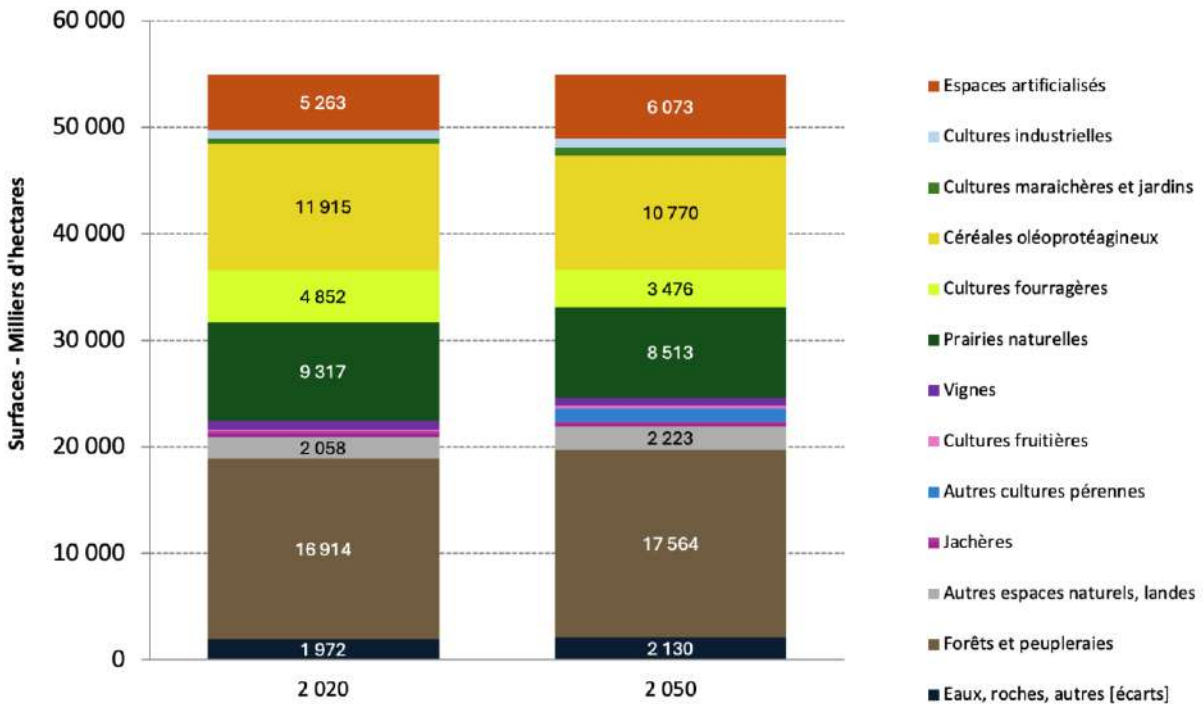
			1	2	3	4	5	6	7
			Faible intensification	Forte intensification	Plus de pâturage	Beaucoup plus de pâturage	Tout herbager	Dual	Zéro maïs
		2 020	2 050	2 050	2 050	2 050	2 050	2 050	2 050
ZP	Zéro pâturage	7 %	13 %	31 %	5 %	1 %	0 %	12 %	0 %
M+	Maïs très dominant	15 %	16 %	25 %	13 %	4 %	1 %	20 %	0 %
M	Maïs dominant	22 %	21 %	20 %	18 %	9 %	6 %	16 %	0 %
I	intermédiaire	12 %	16 %	14 %	14 %	14 %	17 %	5 %	0 %
P	Paturage dominant	33 %	25 %	6 %	26 %	18 %	17 %	22 %	41 %
P+	Paturage très dominant	6 %	5 %	1 %	15 %	24 %	28 %	15 %	28 %
H	Herbe intégral	2 %	1 %	0 %	7 %	28 %	28 %	7 %	28 %
Aut	autres élevages lait	3 %	3 %	3 %	3 %	3 %	3 %	3 %	3 %
		100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %

Annexe 14 : Illustrations spécifiques au scénario de conciliation

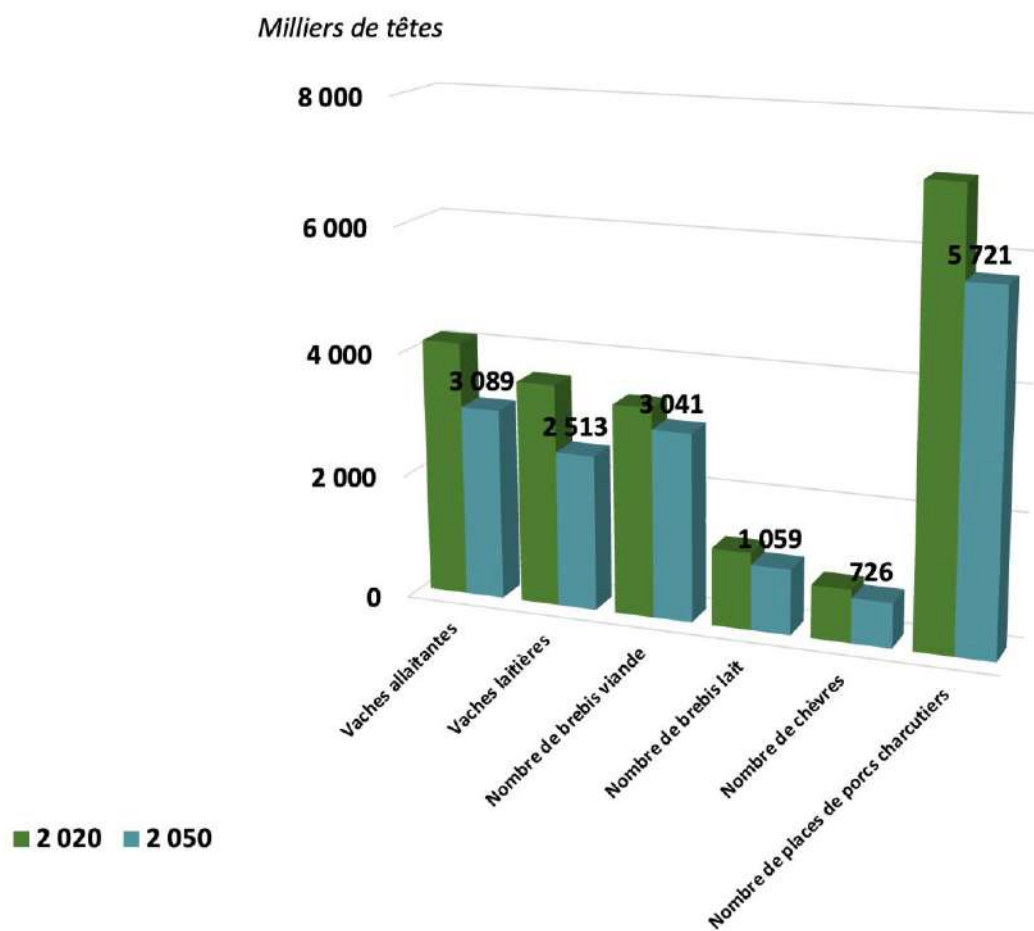
- Variations d'assolement projetées entre 2020 et 2050



- Evolution projetée dans l'utilisation des sols français à horizon 2050



- Evolution des cheptels projetée entre 2020 et 2050



Références

ADEME, 2021. Transitions 2050. Choisir maintenant, Agir pour le climat. Rapport.

ADEME, 2023. Avis d'experts. La méthanisation.

ADEME, A. Deswaziere, S. Sourisseau, A. Pillet, C. Borde, S. Padilla, 2023. Plan de Transition Sectoriel de l'industrie de l'ammoniac en France : Rapport de synthèse. 48 pages.

ADEME, 2024. Chiffres clés du parc d'unités de méthanisation en France au 1er janvier 2024.

ADEME, SOLAGRO, CTIFL, ASTREDHOR, ARVALIS, FNCUMA, IDELE, IFIP, ITAVI, Agriculture et efficacité énergétique : propositions et recommandations pour améliorer l'efficacité énergétique de l'agriculture des exploitations agricoles en France, 2018, 85 pages.

AGRESTE, 2020. Enquête pratiques culturales en grandes cultures et prairies 2017 - Principaux résultats.

AGRESTE, FRANCE AGRIMER, 2023. La consommation de viandes en France en 2022. Synthèses conjoncturelles n°412.

AGRESTE, 2023. Des rendements en grandes cultures inférieurs en agriculture biologique à ceux en conventionnel, Primeur n°2023-8.

AGRESTE, 2023. Statistique agricole annuelle 2022, Chiffres et Données n°19.

AGRESTE, 2024. Graph'Agri 2023.

AGRICULTURE STRATEGIES, 2023. Souveraineté alimentaire : un éclairage par les indicateurs de bilan.

Audrey Alignier, Xavier Solé-senan, Irene Robleño, Bàrbara Baraibar, Lenore Fahrig, et al.. Configurational crop heterogeneity increases within- field plant diversity. *Journal of Applied Ecology*, 2020, 57 (4), pp.654-663.

AND International, pour le compte du MASA, 2022. Étude prospective sur l'estimation des besoins actuels et futurs de l'agriculture biologique en fertilisants organiques et recommandations en vue de son développement

APAD, 2020. Livre blanc. ACS et potentiels de stockage carbone. Chiffres et éclairages scientifiques.

APCA, 2022. Recensement agricole 2020 : 416 054 exploitations agricoles en activité sur le territoire national, Analyses et Perspectives n°2207.

ANSES, 2023. Bilan du suivi de l'antibiorésistance en santé animale et de la vente des antibiotiques à usage vétérinaire.

Aubert, P.-M., Doublet, S., Couturier, C., Malafosse, F. (2023). Biomasse et neutralité climat en 2050 : gérer la rareté pour maintenir des écosystèmes productifs et résilients. Iddri, Document de propositions N°03/23

Ballot Rémi, Cordeau Stéphane, Le Bail Marianne, 2022. Évolution des surfaces de couverts végétaux en France : état des lieux statistique. In : Agronomie, Environnement et Sociétés, 12-1.

Bamière et al., 2023. A marginal abatement cost curve for climate change mitigation by additional carbon storage in French agricultural land. *Journal of Cleaner Production*, 383, pp.135423.

Barbier C., Couturier C., Pourouchottamin P., Cayla J-M, Sylvestre M., Pharabod I., 2019, L'empreinte énergétique et carbone de l'alimentation en France, Club Ingénierie Prospective Energie et Environnement, Paris, IDDRI, 24p.

Barbu Corentin, Aulagnier Alexis, Gallien Marc, Gouy-Boussada Véronique, Labeyrie Baptiste, Le Bellec Fabrice, Maugin Emilie, Ozier-Lafontaine Harry, Richard Freddie-Jeanne, Walker Anne-Sophie, Humbert Laura,

Garnault Maxime, Omnès François, Aubertot JN. « Plan Ecophyto : tout comprendre aux annonces du gouvernement », *The Conversation*, 21 février 2024.

BARLES S., 2018. "Métabolisme urbain, transitions socio-écologiques et relations ville-campagne", *Pour*, 236, 49-54.

Béatrice Béchet, Yves Le Bissonnais, Anne Ruas (pilotes), Anne Aguilera, Hervé Andrieu, Eric Barbe, Philippe Billet, Jean Cavailhès, Marianne Cohen, Sophie Cornu, Laetitia Dabanc, Cécile Delolme, Ghislain Géniaux, Mickaël Hedde, Catherine Mering, Marjorie Musy, Mario Polèse, Christiane Weber, Antoine Frémont, Sophie Le Perchec, Bertrand Schmitt, Isabelle Savini, Maylis Desrousseaux, 2017. Sols artificialisés et processus d'artificialisation des sols : déterminants, impacts et leviers d'action. Synthèse du rapport d'expertise scientifique collective, Ifsttar-Inra (France), 127 p.

Beline et al., 2023. La méthanisation agricole en France, entre opportunité énergétique et transition agroécologique. *Revue SESAME, INRAE*. Article publié le 19 juin 2023.

Beckmann et al., 2019, Conventional land-use intensification reduces species richness and increases production: A global meta-analysis. *Global Change Biology*, 25(6), pp.1941-1956.

Benoit, M. and Mottet, A. (2023) 'Energy scarcity and rising cost: Towards a paradigm shift for livestock', *Agricultural Systems*, 205, 103585.

Berlan J.-P., Bertrand J.-P., Lebas L., Marlon M, 1976. Les conditions de la concurrence internationale entre soja, arachide et colza. In : *Économie rurale*. N°11, Les produits alimentaires stratégiques - deuxième partie, pp. 10-22.

Berthelin et al., 2022. "Séquestration du carbone dans le sol pour atténuer le changement climatique : la limitation de la cinétique de minéralisation des apports organiques a été négligée", *Opinion invitée, European Journal of Soil Science*.

Bouacida, I., Cadiou, J., Rüdinger, A., Aubert, P.-M., Hermine, J.-P., 2024. Potentiel de biométhane en France : une cartographie des controverses pour reconfigurer le débat politique. *IDDR, Décryptage n°02/24*.

BUNCE JA. Carbon dioxide effects on stomatal responses to the environment and water use by crops under field conditions. *Oecologia*. 2004 Jun;140(1):1-10.

Cabral R., 2016, Crop niche modeling projects major shifts in common bean growing areas, *Agricultural and Forest Meteorology*. 218-219. 102-113.

CADIOU Jeanne, 2023. Le déploiement de la politique de méthanisation agricole en France : implications pour la transition agroécologique. Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay.

CANTELAUBE Pierre, Zakeossian Dikran, Muhlberger Sarah & Poméon Thomas, 2023. Construction d'un Zonage agricole multi-enjeux (ZAME) : vers des politiques agro-environnementales plus cohérentes et mieux ciblées ?

Caquet T., Axelos M., Soussana J.-F., Martin E., Renault P., Augusto L., Baumont R., Bernet N., Constantin J., Fillaudeau L., Hamelin L., Korboulewsky N., Marron N., Nesme T., Pellerin S., 2024. Enjeux agronomiques, techniques et économiques d'une mobilisation accrue des différents gisements de biomasse et de leur transformation en bioénergies. *INRAE*.

Cardinale et al., 2012, Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature*, 486(7401), pp.59-67.

Alain Carpentier, Adelaïde Fadhuile, Mathilde Roignant, Maud Blanck, Xavier Reboud, et al.. Alternatives au glyphosate en grandes cultures. *Evaluation économique*. [0] *INRAE*. 2020, 161 p.

Ceballos et al., 2015, Accelerated modern human-induced species losses : Entering the sixth mass extinction. *Science Advances*, 1 (5).

CESE, 2023. Quels besoins de gouvernance pour les différents usages de la biomasse ?

CGAAER, 2022. Rapport n°21040. Evolution du revenu agricole en France depuis 30 ans, facteurs d'évolution d'ici 2030 et leçons à en tirer pour les politiques mises en œuvre par le Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation.

CGAAER, 2022. Rapport n°21045. Parangonnage sur les techniques et pratiques innovantes de gestion de l'eau en agriculture.

CGAAER, 2022. Rapport n° 21065. Décarboner 100 % de l'énergie utilisée en agriculture à l'horizon 2050 : c'est possible !

CGAAER, 2023. Rapport n°22058. Tirer les leçons des crises d'influenza aviaire - Quelle organisation de l'État pour gérer les crises de santé animale à l'époque de la globalisation des échanges et du changement climatique ?

Challet François, Fourny Arthur. La biomasse : une énergie intermittente à horizon 2050 ? Mémoire de troisième année du Corps des Mines sur les usages de la biomasse provenant de l'agriculture et de la forêt. Sciences de l'environnement. 2023.

Chambres d'Agriculture – 2022. RECENSEMENT AGRICOLE 2020 Chiffres clés.

CITEPA, 2022. Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France – Format Secten.

CITEPA, 2022. Rapport d'inventaire Floréal – Edition 2022.

CITEPA, 2023. Gaz à effet de serre et polluants atmosphériques. Bilan des émissions en France de 1990 à 2022. Rapport Secten éd. 2023.

CITEPA, 2023. Rapport OMINEA – 20ème édition

CITEPA, 2024. Rapport Secten – Emissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques 1990-2023..

Conseil National de l'Industrie, 2021. Feuille de route de décarbonation de la chimie.

Cour des Comptes, 2021. La politique de développement des biocarburants, Observations définitives.

Cour des Comptes Européenne, 2024. Les plans relevant de la politique agricole commune. Plus verts, mais en deçà des ambitions climatiques et environnementales de l'UE.

Dallaporta B., Gentil-Sergent C., Lacarce E., Cisowski, F., Vidal R., Sautereau N., 202. Note synthétique. Quantification des externalités de l'Agriculture Biologique, 2024, ITAB, 4p

Danino-Perraud, Raphaël. « Phosphates et agriculture : de la géologie à la géopolitique », Sébastien Abis éd., *Le Déméter 2021*. IRIS éditions, 2021, pp. 95-113.

Daviron B., 2019. Biomasse : une histoire de richesse et de puissance. Versailles, Éditions Quæ, 392 p. (coll. Synthèses).

Demay J., Ringeval B., Pellerin S et al. (2023). Half of global agricultural soil phosphorus fertility derived from anthropogenic sources. *Nature Geoscience*. 5 January 2023.

Desriers M., 2007, « L'agriculture française depuis cinquante ans : des petites exploitations familiales aux droits à paiement unique », *INSEE Références. L'agriculture française et l'Europe*, p. 17-30

Marc-Olivier Déplaud (7 juin 2019). Naissance de l'élevage hors-sol en Bretagne : le regard d'un géographe. *Transhumances*. Consulté le 2 novembre 2024 à l'adresse <https://doi.org/10.58079/tr7g>

Devienne, S. 2018. Les révolutions agricoles contemporaines en France. In Chouquer, G., & Maurel, M. (Eds.), *Les mutations récentes du foncier et des agricultures en Europe*. Presses universitaires de Franche-Comté.

Diego Garcia-Vega, 2024, Should we value biodiversity in agriculture? The case for biodiversity as a production factor. *Sciences Po*.

Duru M. et Therond O., 2023. Quel usage des terres pour une agriculture nourricière et durable ?, Société Française d'Ecologie et d'Evolution, Regard 116.

Emonet E., Virginie Seguin, M. Rougier, Sonia Ramonteu, L. Sagot, et al.. La réintroduction de l'élevage dans un territoire spécialisé en grande culture est-elle durable ? Evaluation multicritère de scénarios de recouplage.. *Innovations Agronomiques*, 2019, 72, pp.163-179

Fabien Ferchaud, Claudine Thenail, 2006. Analyse d'expériences locales sur l'agriculture et la biodiversité et recommandations pour l'organisation d'un réseau national [Rapport final]. [Rapport Technique] Ministère de l'Agriculture et de la Pêche.

Philippe Fleury, C. Seres, Laurent Dobremez, Baptiste Nettier, Y. Pauthenet. Conception et mise en oeuvre de la mesure agri-environnementale prairies fleuries entre expertises agro-écologiques et dynamiques collectives. Colloque INRA "Écologisation des politiques publiques et des pratiques agricoles", Jun 2011, Avignon, France. pp.7.

Fondation pour la Recherche sur la Biodiversité, Guillaume Sainteny et Louise Dupuis, 2022 . La taxation des terres agricoles en Europe : approche comparative.

Fondation pour la Recherche sur la Biodiversité, 2024. Les indicateurs de biodiversité, pour qui, pour quoi ?

FRANCE AGRIMER, 2021. L'Observatoire National des Ressources en Biomasse. Évaluation des ressources agricoles et agroalimentaires disponibles en France – Edition 2020.

FRANCE AGRIMER, 2022. Etudes Biocarburants, Proposition d'une méthodologie de calcul de la SAU allouée à la production de biocarburants.

FRANCE AGRIMER, 2022. Ressources en biomasse et méthanisation agricole : quelles disponibilités pour quels besoins ? Analyse des données théoriques de l'ONRB.

FRANCE AGRIMER, 2023. Marché des oléo-protéagineux – Campagne 2023-2024 – Statistiques novembre et décembre 2023

FRANCE AGRIMER, 2023. Souveraineté alimentaire, Un éclairage par les indicateurs de bilan.

Giambastiani, Y.; Biancofiore, G.; Mancini, M.; Di Giorgio, A.; Giusti, R.; Cecchi, S.; Gardin, L.; Errico, A. Modelling the Effect of Keyline Practice on Soil Erosion Control. *Land* **2023**, *12*, 100

Garambois N. et Devienne S. 2012. Les systèmes herbagers économes. Une alternative de développement agricole pour l'élevage bovin laitier dans le Bocage vendéen ?, *Économie rurale*, 330-331.

Josette Garnier, Julia Le Noë, Audrey Marescaux, Alberto Sanz-Cobena, Luis Lassaletta, et al.. Long-term changes in greenhouse gas emissions from French agriculture and livestock (1852–2014): From traditional agriculture to conventional intensive systems. *Science of the Total Environment*, 2019, 660, pp.1486-1501.

GEVES, 2023. La Biodiversité cultivée en France.

GIS Sol, 2011. L'état des sols de France.

Goffaux R., Goldringer I., Bonneuil C., Montalent P. & Bonnin I., 2011. Quels indicateurs pour suivre la diversité génétique des plantes cultivées ? Le cas du blé tendre cultivé en France depuis un siècle. Rapport FRB, Série Expertise et synthèse, 44 pages.

Gouleau, A., Gauffreteau, A., This, P., Tailliez-Lefebvre, D., Gombert, J., Gouache, D., Bakan, B., Cordeau, S., Enjalbert, J., Laperche, A., Leclère, V., Lheureux, F., Mazza, V., Moquet, F., Wagner, A., Bernicot, M.-H., Fontaine, L., Bertoux, V., & Huyghe, C., 2021. Saisine du Comité Scientifique CTPS - Quelles variétés pour l'agroécologie ? INRAE.

Griffon, Michel. « Vers une septième révolution agricole », *Revue Projet*, vol. 332, no. 1, 2013, pp. 11-19

Grimonprez B., 2023. .L'action collective territoriale, chaînon manquant politique de la transition agroécologique.

Harchaoui S. & Chatzimpiros P., 2018. "Energy, Nitrogen, and Farm Surplus Transitions in Agriculture from Historical Data Modeling. France, 1882–2013", *Journal of Industrial Ecology* 23(2), pp. 412-425.

HAUT CONSEIL POUR LE CLIMAT, 2024. Accélérer la transition climatique avec un système alimentaire bas carbone, résilient et juste.

IDELE, IFIP, IDDRI-ASCA, Académie d'Agriculture de France, 2022. L'élevage peut-il se passer du soja importé ? Évaluation de la réduction de la dépendance de l'élevage européen et français au tourteau de soja importé, Collection Résultats.

IDELE, CNE, 2023. Bovins 2023, Productions lait et viande, Les Chiffres Clés du GEB.

IDELE, CNE, 2023. Ovins 2023, Productions lait et viande, Les Chiffres Clés du GEB.

I4CE, 2023. Transition de l'élevage : gérer les investissements passés et repenser ceux à venir.

I4CE, 2024. Estimation des dépenses publiques liées aux crises agricoles en France entre 2013 et 2022.

INRA-CNRS-IRSTEA, 2014. Valorisation des matières fertilisantes d'origine résiduaire sur les sols à usage agricole ou forestier, Synthèse de l'expertise scientifique collective.

INRAE, 2023. Étude concernant l'actualisation, la définition et les exemples de valorisation des races locales, rustiques, menacées, Volet 1, Races menacées.

INRAE, 2023. Propositions d'hypothèses pour le scénario AMS de la SNBC 3 pour le secteur Agriculture.

INRAE, 2024. Enjeux agronomiques, techniques et économiques d'une mobilisation accrue des différents gisements de biomasse et de leur transformation en bioénergies.

INSEE, 2020. Les agriculteurs : de moins en moins nombreux et de plus en plus d'hommes. INSEE Focus n°212.

Institut de la Ferme du Bec Hellouin, 2023. Programmes de recherches à la Ferme du Bec Hellouin 2023 - 2024.

INTERCEREALES, 2023. Des chiffres et des céréales, L'essentiel de la filière, Édition 2023..

IPCC 2019, 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, "Volume 4, Agriculture, Forestry and Other Land Use", Calvo Buendia, E., Tanabe, K., Kranjc, A., Baasansuren, J., Fukuda, M., Ngarize S., Osako, A., Pyrozhenko, Y., Shermanau, P. and Federici, S. (eds). Published: IPCC, Switzerland.

ITAB, 2024. Quantifications des externalités de l'agriculture biologique, Note synthétique.

Jarvis S., Hutchings N. et al., 2011. Nitrogen flows in farming systems across Europe. In Sutton M.A., Howard C.M. et al. (ed.), *The European Nitrogen Assessment*, Cambridge University Press, 211-227

Launay Camille, 2023. Insertion de cultures intermédiaires énergétiques dans les systèmes de cultures en France : évaluation multi-échelles du potentiel de production et des impacts eau–azote–carbone. Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay.

Lin et al., 2011, Resilience in agriculture through crop diversification: adaptive Management for Environmental Change. *Bioscience* 61, pp. 183–193.

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

Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire, Centre d'Etudes et de Prospective, 2016. Vers une gestion durable du phosphore, ressource critique pour l'agriculture, Analyse n°93.

Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire, Centre d'Etudes et de Prospective, 2018. Les exploitations d'élevage économes et autonomes en intrants, créatrices de valeur ajoutée, Analyse n°126.

Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire, Centre d'Etudes et de Prospective, 2022. Géographie économique des secteurs agricole et agroalimentaire français : quelques grandes tendances, Document de travail n°15.

Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire, Centre d'Etudes et de Prospective, 2022. Prospective des matières fertilisantes d'origine résiduaire (MAFOR) à l'horizon 2035, Analyse n° 176.

Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire, Centre d'Etudes et de Prospective, 2023. La lutte contre les maladies animales dans le contexte du changement climatique - Analyse n° 184.

Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire, Centre d'Etudes et de Prospective, 2023. Estimation des besoins actuels et futurs de l'agriculture biologique en fertilisants organiques, Analyse n°195.

Ministère de la Transition Ecologique, 2018. Stratégie Nationale de Mobilisation de la Biomasse.

Ministère de la Transition Ecologique, 2020. Bilan annuel des transports en 2019.

Ministère de la Transition Ecologique, 2020. Eau et milieux aquatiques, Les chiffres clés, Édition 2020.

Ministère de la Transition Ecologique, 2020. Panorama 2020, Biocarburants incorporés dans les carburants en France.

Ministère de la Transition Ecologique, 2020. Stratégie Nationale Bas Carbone, La transition écologique et solidaire vers la neutralité carbone

Ministère de la Transition Ecologique, DGEC, 2022. Etude comparée des standards de compensation existants.

Ministère de la Transition Ecologique, 2023. Importations françaises de matières premières visées par la Stratégie nationale de lutte contre la déforestation importée entre 2012-2021, Vers une empreinte terre de la France, Collection Etudes.

Ministère de la Transition Ecologique, 2024. L'irrigation des surfaces agricoles : évolution entre 2010 et 2020.

Ministère de la Transition Énergétique, 2023. Stratégie Française pour l'Énergie et le Climat.

Marceau Minot. Traits biologiques et facteurs environnementaux structurant les mouvements locaux et la dispersion des libellules (Insecta, Odonata) dans les réseaux de mares.. Ecologie, Environnement. Normandie Université, 2020.

Morel Kevin, 2016. Viabilité des microfermes maraîchères biologiques. Une étude inductive combinant méthodes qualitatives et modélisation.. Sciences agricoles. Thèse de l'Université Paris Saclay.

Mueller et al., 2012, Closing yield gaps through nutrient and water management. *Nature*, 490(7419), pp.254-257.

Newbold et al., 2016a, Has land use pushed terrestrial biodiversity beyond the planetary boundary? A global assessment. *Science*, 353(6296), pp.288-291.

Nowak B., 2013. Diminuer la dépendance aux engrais de synthèse par le recyclage local des éléments minéraux : analyse des stratégies d'approvisionnement en éléments minéraux des exploitations agricoles biologiques, Thèse de doctorat, Université de Bordeaux, 165 pages.

Observatoire de la Formation du Prix et des Marges des produits alimentaires, 2024. Rapport au Parlement 2024.

Observatoire National sur les Effets du Changement climatique, 2009. Changement climatique : coûts des impacts et pistes d'adaptation. Rapport au Premier Ministre et au Parlement.

Pochon André, 2008. Agronomes et paysans : un dialogue fructueux, Sciences en Question, Quae.

Poux, X., Aubert, P.-M. (2018). An agroecological Europe in 2050: multifunctional agriculture for healthy eating. Findings from the Ten Years For Agroecology (TYFA) modelling exercise, Iddri-AScA, Study N°09/18, Paris, France, 74 p.

Rogelj J., Schleussner C.-F., 2019. Unintentional unfairness when applying new greenhouse gas emissions metrics at country level. *Environ. Res. Lett.*, 14, 114039.

SAILLEY, M., CORDIER, C., COURTONNE, J.-Y., DUFLOT, B., CADUDAL, F., PERROT, C., ... BAUMONT, R. (2022). Quantifier et segmenter les flux de matières premières utilisées en France par l'alimentation animale. *INRAE Productions Animales*, 34(4), 273–292.

Sánchez-Bayo et al., 2019, Worldwide decline of the entomofauna: A review of its drivers. *Biological Conservation*, 232, pp.8-27.

Schlatter et al., 2017, Disease Suppressive Soils: New Insights from the Soil Microbiome. *Phytopathology*, 107(11), pp.1284-1297.

Sylvain Pellerin et Laure Bamière (pilotes scientifiques), Camille Launay, Raphaël Martin, Michele Schiavo, Denis Angers, Laurent Augusto, Jérôme Balesdent, Isabelle Basile-Doelsch, Valentin Bellassen, Rémi Cardinael, Lauric Cécillon, Eric Ceschia, Claire Chenu, Julie Constantin, Joël Darroussin, Philippe Delacote, Nathalie Delame, François Gastal, Daniel Gilbert, Anne-Isabelle Graux, Bertrand Guenet, Sabine Houot, Katja Klumpp, Elodie Letort, Isabelle Litrico, Manuel Martin, Safya Menasseri, Delphine Mézière, Thierry Morvan, Claire Mosnier, Jean Roger-Estrade, Laurent Saint-André, Jorge Sierra, Olivier Thérond, Valérie Viaud, Régis Gâteau, Sophie Le Perchec, Isabelle Savini, Olivier Réchauchère, 2019. Stocker du carbone dans les sols français, Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût ? Synthèse du rapport d'étude, INRA (France), 114 p.

Secrétariat Général à la Planification Écologique, 2023a. La planification écologique dans l'agriculture - 9 juin 2023 – Point d'étape.

Secrétariat Général à la Planification Écologique, 2023b. La planification écologique dans l'énergie - 12 juin 2023 – Document de travail.

Secrétariat Général à la Planification Écologique, 2024. Bouclage biomasse : enjeux et orientations, Juillet 2024.

SOLAGRO, 2016. Le scénario AFTERRRES2050.

SOLAGRO, 2022. La face cachée de nos consommations, Quelles surfaces agricoles et forestières importées ?

Strohmeier, L., Collet, L., Andréassian, V., Corre, L., Rousset, F. & Thirel, G. 2024. Köppen–Geiger climate classification across France based on an ensemble of high-resolution climate projections. *CR Geosciences*, sous presse.

Syndicat des Energies Renouvelables, 2023. Panorama des Gaz Renouvelables en 2023.

Thomas Starck, Tanguy Fardet, Fabien Esculier. Fate of nitrogen in French human excreta: current waste and agronomic opportunities for the future. *Science of the Total Environment*, 2024, Nitrogen in agro-food systems and the environment, 912, pp.168978

Tailleur A. et Gac A., 2020. GES'TIM+ Référence méthodologique pour l'évaluation de l'impact des activités agricoles sur l'effet de serre, la préservation des ressources énergétiques et la qualité de l'air. Version 1.2. 517p

UNIFA, 2021. Dossier de presse, Mieux nourrir les plantes pour mieux nourrir les hommes.

UNIFA, 2021. Les Livraisons d'engrais minéraux en France métropolitaine, Campagne 2020-2021.

Vaitilingom, Gilles, Mouloungui, Zéphirin, Benoist, Anthony, Broust, François, Daho, Tizane, et Piriou, Bruno. Vers une génération plus « verte » de biodiesel. *OCL* 28 (2021): 2

O. van Hal, I.J.M. de Boer, A. Muller, S. de Vries, K.-H. Erb, C. Schader, W.J.J. Gerrits, H.H.E. van Zanten, Upcycling food leftovers and grass resources through livestock: Impact of livestock system and productivity,

Journal of Cleaner Production, Volume 219, 2019, Pages 485-496

Van Groenigen et al., 2014, Earthworms increase plant production: a meta-analysis. *Scientific Reports*, 4(1).

Verret V., Emonet E., Claquin M., Rougier M., Sagot L3, Mischler P., Gautier D., Avec la collaboration de : Lescoat P, Havet A., Levavasseur F., Péchoux S., Wolgust V., 2020. Recoupler grandes cultures et élevages ovins par le pâturage, en vue de systèmes économes en Île-de-France. Projet POSCIF, Agrof'Île.

Vincent, Bernard. « Principes techniques et chiffres du drainage agricole. De la tuyautique à l'hydro-diplomatie », *Sciences Eaux & Territoires*, vol. 32, no. 2, 2020, pp. 8-15.

Wetzel et al., 2016, Variability in plant nutrients reduces insect herbivore performance. *Nature*, 539(7629), pp.425-427.