



Propositions d'hypothèses pour le scénario AMS de la SNBC 3 pour le secteur Agriculture

Jean-François Soussana, Thierry Caquet, René Baumont, Nicolas Bernet, Philippe Debaeke, Xavier Fernandez, Christophe Gouel, Jean-Louis Peyraud, Edwige Quillet, Sylvie Recous, Louis-George Soler

Avril 2023

Table des matières



INRAE	1
Avant-propos	3
Introduction – Eléments de contexte	3
1. Quel niveau d’ambition pour le scénario SNBC3 AMS ?	5
2. Démarche suivie.....	7
3. Valeurs des variables clés proposées pour les hypothèses d’un scénario AMS run 2 (2050 vs. 2020)	9
4. Notes thématiques.....	12
4.1. Scénario consommation alimentaire 2050 (Louis-Georges Soler).....	12
4.2. Productions animales : scénario central de baisse de consommation (René Baumont, Xavier Fernandez).....	16
4.3. Principaux leviers pour réduire les émissions de GES, notamment de CH ₄ entérique, des ruminants et des monogastriques (René Baumont, Jean-Louis Peyraud, Edwige Quillet, Jean-François Soussana).....	20
4.4. Trois scénarios pour l’élevage (Jean-François Soussana, Edwige Quillet, Jean-Louis Peyraud, René Baumont).....	23
4.5. Evolutions des rendements (Philippe Debaeke).....	27
4.6. Chocs climatiques, rendements et ressources en eau. Proposition d’une variante du scénario AMS pour 2050 (Jean-François Soussana, Thierry Caquet).....	32
4.7. Potentiel des CIVE (Nicolas Bernet)	36
4.8. Réduction de l’usage des engrais azotés de synthèse à l’horizon 2030 (Sylvie Recous).....	38
4.9. Commerce international et cohérence offre/demande (C. Gouel)	44
5. Conclusions.....	46
Annexe. Tableau de synthèse. Hypothèses du scénario central à 2030 et 2050	47

Avant-propos

Ce texte correspond au travail d'un groupe d'experts INRAE réuni à la demande du MASA. Il précise des hypothèses en vue de la construction du scénario Avec Mesures Supplémentaires (AMS) de la SNBC3 (Stratégie Nationale Bas Carbone), principalement à l'horizon 2050. Le groupe a analysé les évolutions des variables d'intérêt et de leurs incertitudes à l'horizon 2050 et a cherché à mettre en cohérence ces évolutions. Néanmoins, l'analyse proposée n'a pas fait l'objet d'une modélisation quantitative. Il ne s'agit donc pas d'un « scénario INRAE », mais bien d'éléments de réflexion produits par le groupe d'experts en vue de la construction d'un scénario AMS SNBC3. Par ailleurs, ces travaux portent uniquement sur la faisabilité technique et agronomique des évolutions, et non sur les mesures et instruments de politiques publiques qui permettraient la réalisation de cette trajectoire.

Introduction – Éléments de contexte

- SFEC et SNBC 3

La Stratégie Française Energie-Climat (SFEC) constitue la feuille de route de la France pour atteindre la neutralité carbone en 2050 et pour assurer l'adaptation effective de la France au climat futur. Elle est constituée de 4 composantes :

- Loi de Programmation Energie Climat (LPEC) => juillet 2023
- Plan National d'Adaptation au Changement Climatique (PNACC3)
- Programmation Pluriannuelle de l'Energie (PPE) pour 2024-2033
- Nouvelle version de la Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC3)

L'atteinte de la neutralité carbone (= équilibre entre les émissions anthropiques par les sources et les absorptions par les puits de GES), implique une division par 6 des émissions de GES par rapport à 1990, soit 80 MtCO_{2e} en 2050 (pour mémoire, les émissions françaises étaient de 458 MtCO_{2e} en 2015 et 445 MtCO_{2e} en 2018).

Le rehaussement européen du jalon 2030 du paquet « Fit for 55 » implique des progrès plus rapide d'importantes réductions d'émissions supplémentaires, un travail additionnel sur les puits de carbone, le développement des énergies renouvelables, l'amélioration de l'efficacité énergétique...

L'élaboration des scénarios de la SNBC3 à l'horizon 2050 repose notamment sur la mobilisation de divers groupes de travail (GT) sectoriels dont un GT Agriculture et un GT Forêts/Sols.

L'exercice bénéficie d'un double cadrage :

- Socio-économique : stagnation de la population vers 2040-2045 (≈ 69 millions) ; progression un peu moins dynamique du PIB que dans les scénarios précédents (+40%/2018) ; augmentation modérée du prix des combustibles fossiles à l'import (à noter toutefois que ce cadrage a été réalisé dans un contexte pré-guerre en Ukraine).
- Des dynamiques sociales : démographie et structure des ménages ; systèmes productif ; santé et bien-être ; sensibilité environnementale et consommation ; logiques de peuplement ; emploi et organisation des entreprises ; fiscalité et redistribution ; usages du temps, loisirs, tourisme ; usages

du numérique ; cohésion sociale et engagements ; mobilité ; adaptation CC ; émissions reste du monde ; niveau de réchauffement.

Les scénarios de la SNBC3 sont de deux types :

- Scénario « avec mesures existantes » (AME 23), contenant toutes les mesures prévues par les politiques publiques actuelles : loi climat et résilience (option végétarienne dans la restauration collective, taxe engrais azotés etc.) ; loi EGALIM (action sur les prix, étiquetage des produits alimentaires, etc.) ; stratégie protéines végétales ; plan Ecophyto II+ ; 6^e plan d'action nitrates ; France Relance.
- Scénario « avec mesures supplémentaires » (AMS 23), visant à respecter les objectifs énergétiques et climatiques de la France, en particulier l'atteinte de la neutralité carbone à l'horizon 2050. Il mobilise diverses options : mesures UE (nouvelle PAC et PSN 2023/27, RED III, *carbon farming*) ; pratiques (programme ambition bio, nouveau plan agroforesterie, Label Bas Carbone) ; engrais azotés (nouvel arrêté PREPA) ; alimentation (Stratégie nationale de l'alimentation, de la nutrition et du climat, 3^{ème} pacte national de lutte contre le gaspillage alimentaire, renforcement des dispositions relatives aux alternatives végétariennes et à la part du bio dans la restauration collective) ; accompagnement pour l'achat d'engins agricoles à faibles émissions.

Un premier run de modélisation a été réalisé au printemps 2022, suivi d'une mise en débat des résultats par les différents GT en vue de la préparation d'un second run de modélisation.

- Demande du MASA

Par un courrier en date du 20 Mai 2022, la DGPE du MASA a sollicité l'appui d'INRAE pour l'élaboration du run 2 de la SNBC3 :

« Dans la perspective de la préparation de ce Run 2, je sollicite votre appui pour la définition des hypothèses à retenir pour ces différents scénarios, en ciblant en particulier les thématiques suivantes :

- *Évolution des rendements (effets du changement climatique, de la sélection variétale, etc.) ;*
- *Évolution du bilan azoté en fonction des pratiques de fertilisation ;*
- *Alimentation des bovins lait ;*
- *Évolution des cheptels (ruminants et granivores) ;*
- *Evolution des régimes alimentaires au sein de la population française ;*
- *Production de bioénergies (méthanisation, biocarburants, etc.) ;*
- *Décarbonation de l'agriculture (réduction de l'usage des énergies fossiles).*

En complément de la participation d'INRAE aux réunions du groupe de travail « agriculture » de la SNBC3, il serait utile que vous puissiez en amont nous faire part de votre vision et des recommandations sur les différentes thématiques listées ci-dessus à l'horizon 2030, 2040 et 2050. »

- Animation et membres du groupe INRAE

Suite à cette demande, un groupe de travail a été animé par Jean-François Soussana et Thierry Caquet. Il a analysé les principales variables d'intérêt, grâce aux compétences d'une douzaine d'experts scientifiques INRAE :

- Évolution des rendements (effets du changement climatique, de la sélection variétale, etc.) (Philippe Debaeke) ;

- Évolution du bilan azoté en fonction des pratiques de fertilisation (Sylvie Recous) ;
- Alimentation des bovins lait (René Baumont) ;
- Évolution des cheptels (ruminants et granivores) (Xavier Fernandez) ;
- Evolution des régimes alimentaires au sein de la population française (Louis-George Soler) ;
- Production de bioénergies (méthanisation, biocarburants, etc.) (Nicolas Bernet, Christophe Gouel) ;
- Politiques publiques, économie (Christophe Gouel).

Le groupe d'experts s'est attaché à éclairer les évolutions à 2030 et 2050 des thématiques retenues par le MASA (ces deux horizons permettant d'encadrer l'horizon 2040). Il a également souhaité travailler sur la mise en cohérence des différentes thématiques, formulant ainsi des hypothèses révisées pour un run 2 du scénario 'Avec Mesures Supplémentaires' (AMS). Le groupe d'experts n'a pas travaillé sur les hypothèses d'un run 2 du scénario AME ('Avec Mesures Existantes'), estimant que sa valeur ajoutée concernait la définition de cibles cohérentes pour un scénario AMS, mais qu'il n'avait pas la capacité d'évaluer les effets des politiques existantes (scénario AME). Les premiers résultats ont été présentés au MASA lors de réunions de travail qui ont permis de préciser plusieurs hypothèses et de travailler sur les fourchettes d'incertitude de chaque thématique.

Nous présentons dans cette note les réflexions du groupe concernant :

- le niveau d'ambition d'un scénario AMS SNBC3 en matière de réduction des émissions nettes agricoles ;
- la démarche retenue pour la mise en cohérence des thématiques et pour la formulation d'hypothèses ;
- les principales hypothèses du groupe à l'horizon 2050, en explicitant les changements par rapport au run 1 AMS SNBC3 ;
- des analyses sur les principales thématiques ;
- des conclusions soulignant les limites méthodologiques et les étapes complémentaires qui seraient nécessaires pour réduire certaines incertitudes.

Pour chaque thématique, ce rapport précise (cf. section 3) les hypothèses moyennes retenues pour 2050, les variations relatives (2050 par rapport à 2020) et, le cas échéant, les écarts au run 1 de la SNBC3 AMS. Des notes thématiques (cf. section 4) fournissent des éléments détaillés qui viennent en support à l'établissement de ces hypothèses.

1. Quel niveau d'ambition pour le scénario SNBC3 AMS ?

L'examen des résultats du run 1 appelle un premier jeu de commentaires et de propositions :

- **2050.** Le scénario AMS run1 SNBC3 conduit à ce que l'agriculture baisse ses émissions de 40% en 2050 et représente ainsi 57% des émissions résiduelles totales en 2050. C'est une réduction moindre que dans la SNBC2 (-46%). Ici, nous avons retenu d'avoir un **niveau d'ambition supérieur pour le run 2, en visant une baisse de 50% au moins entre 2020 et 2050.**
- **2030.** La baisse en 2030 selon le run 1 n'est que de 17% par rapport à 2015. **D'ici à 2030, le run 1 correspond donc à un scénario tendanciel**, car la réduction des émissions du secteur agriculture a atteint 1,8 % par an de 2018 à 2020.

La mise en œuvre des objectifs du paquet fit for 55 nécessite de revoir à la hausse les réductions d'émissions pour l'ensemble des secteurs, sachant que le règlement ESR (*Effort Sharing Regulation*) demande une réduction de -47,5% des émissions des secteurs bâtiments, transports, petite industrie (hors ETS), agriculture et déchets pour la France en 2030 comparé à 2005. La répartition de cet effort supplémentaire entre secteurs se fait au niveau de chaque Etat Membre en fonction de différents critères (économique, potentiel, etc.) et n'a pas encore été décidée.

A titre provisoire, en juillet 2022, la DGEC avait fourni, lors d'une présentation des premiers résultats du run 1 de la SFEC, des objectifs **si une répartition égale de l'effort entre tous les secteurs était actée**. Cela demanderait une réduction supplémentaire du secteur agricole de -8,4% pour atteindre les objectifs du paquet fit for 55. Cela ne prendrait cependant pas en compte les spécificités de ce secteur, dont les émissions principales sont le CH₄ et le N₂O (processus biologiques), et non le CO₂ (consommation d'énergies fossiles).

Si cette répartition entre secteurs était bien conservée, cela conduirait à -27% pour le secteur agricole en 2030 par rapport à 2015. En 2020, ce secteur émettait 82 MtCO₂eq, soit -6% par rapport à 2015. La réduction serait donc, **a minima, de -21% de 2021 à 2030 pour l'agriculture, soit -2,1% par an, hypothèse retenue ici pour le run 2**. Il faudra veiller aux arbitrages finaux entre secteurs.

Tableau 1. Implications du paquet Fit for 55 (source rapport annuel du HCC, 2022)

PÉRIMÈTRE DES ÉMISSIONS DE LA FRANCE	OBJECTIFS ACTUELS DE LA FRANCE POUR 2030	IMPLICATIONS DU FIT FOR 55 (EN DISCUSSION)
SEQE	-42 % d'ici 2030 par rapport à 1990 (Paquet 3x20) (ou -43 % d'ici 2030 par rapport à 2005)	-61 % d'ici 2030 par rapport à 1990 (ou -61 % d'ici 2030 par rapport à 2005)
Partage de l'effort	-36 % d'ici 2030 par rapport à 1990 (Paquet 3x20) (ou -37 % d'ici 2030 par rapport à 2005)	-47% d'ici 2030 par rapport à 1990 (ou -47,5 % d'ici 2030 par rapport à 2005)
UTCATF	+67 % d'ici 2030 par rapport à 1990 (SNBC2) (ou -40 Mt éqCO ₂ en 2030)	+42 % d'ici 2030 par rapport à 1990 (ou -34 Mt éqCO ₂ en 2030)

Tableau 2. Répartition sectorielle des baisses d'émissions cible en fonction du paquet Fit for 55 (source DGEC, Juillet 2022).

Émissions en MtCO2eq (% réduction par rapport à 2015)	2019 (inventaire)	AMS 2030	Fit for 55 (-8,4% partout)	Résultats run 1 AME	Résultats run 1 AMS
Énergie	42,5 (-7%)	31,3 (-33%)	27,3 (-42%)	28,4 (-32%)	28,5 (-32%)
Industrie	84,2 (-3%)	52,1 (-35%)	46,2 (-43%)	60,9 (-30%)	47,7 (-45%)
Déchets	15,3 (0%)	10,6 (-37%)	9,1 (-45%)	12,2 (-15%)	8,4 (-42%)
Bâtiments	75,1 (-10%)	44,5 (-52%)	36,7 (-61%)	53,4 (-35%)	26,3 (-68%)
Agriculture	83,1 (-5%)	72,9 (-18%)	65,4 (-27%)	76,4 (-12%)	73,8 (-15%)
Transports	135,9 (-2%)	98,8 (-28%)	87,2 (-36%)	89,8 (-33%)	73,1 (-45%)
Total hors UTCATF	436 (-5%)	310,1 (-33%)	272 (-41%)	321 (-30%)	257 (-44%)
UTCATF	-34,5	-40	-34	-10	-29

Le scénario AMS du secteur agricole présenté dans cette note a donc pour cible :

- **50% d'émissions nettes (émissions moins absorptions par le stockage de carbone du sol) du secteur agricole en 2050 par rapport à 2020.**
- **21 % d'émissions nettes en 2030 par rapport à 2021.**

2. Démarche suivie

Plusieurs travaux de prospective ont exploré l'avenir des systèmes alimentaires français et tracent plusieurs transitions possibles¹. Ils prennent en compte différents enjeux, temporalités, changements et trajectoires. Les scénarios les plus débattus en France sont Afterres 2050 de Solagro², Tyfa/Tyfa GES de l'IDDRI³ et Transition(s) 2050 de l'Ademe⁴.

D'autres références ont été utilisées au niveau mondial, en particulier le rapport spécial du GIEC sur le changement climatique et le secteur des terres⁵ (GIEC SRCCL, 2019) qui évalue les projections pour 2050 des modèles intégrés d'évaluation, modèles couplés (aspects biophysiques et socio-économiques) comprenant l'ensemble des secteurs dont l'agriculture.

Enfin, des travaux dédiés à l'évolution du système alimentaire mondial ont été publiés récemment, en particulier ceux de la commission EAT LANCET. Ces différents travaux ont permis de compléter l'analyse du run 1 de la SNBC3 lors des discussions du groupe de travail.

A l'issue de cette concertation, nous avons retenu une démarche en 3 axes interconnectés (Figure 1) :

¹ https://agronomie.asso.fr/fileadmin/user_upload/revue_aes/aes_vol11_n1_juin_2021/pdf/aes_vol11_n1_05_duru-et-al.pdf

² https://afterres2050.solagro.org/wp-content/uploads/2015/11/solagro_afterres2050_version2016.pdf

³ https://www.iddri.org/sites/default/files/PDF/Publications/Catalogue%20Iddri/Etude/201809-ST0918-tyfa_1.pdf ; https://www.iddri.org/sites/default/files/PDF/Publications/Catalogue%20Iddri/Etude/201904-ST0219-TYFA%20GHG_2.pdf

⁴ <https://transitions2050.ademe.fr/>

⁵ IPCC, 2019. Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/11/SRCCL-Full-Report-Compiled-191128.pdf>

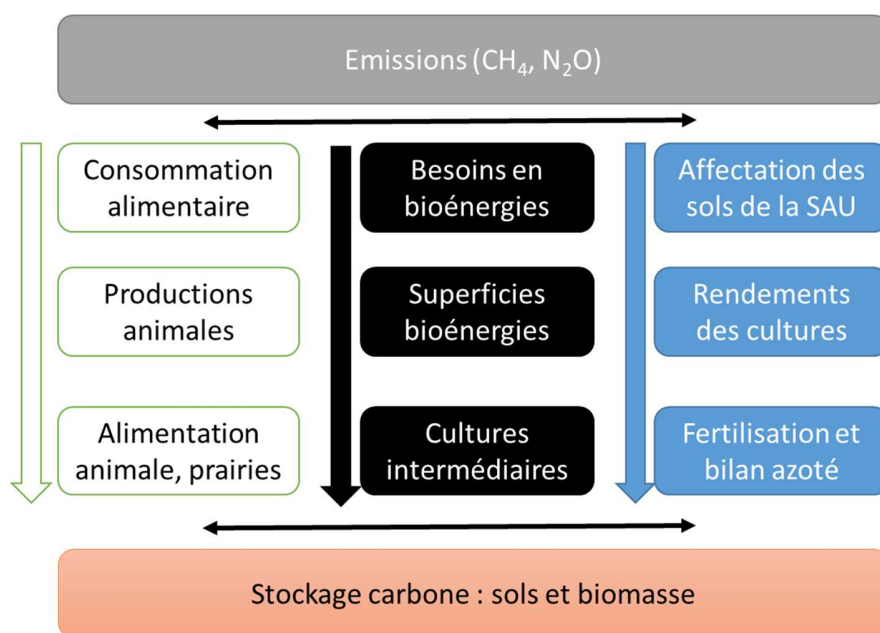


Figure 1. Présentation des principales thématiques étudiées pour la mise au point des hypothèses du scénario AMS. Les flèches verticales indiquent les principaux enchaînements au sein d'un axe. Les flèches horizontales rappellent les interactions entre axes.

Premier axe : consommation alimentaire, productions animales et alimentation animale

- Cibles nutrition revues (dont gaspillages) et arbitrage sur le niveau de baisse des consommations de produits animaux ;
- Cibles productions animales revues à partir des hypothèses de consommation des produits animaux et du commerce international, en distinguant une variante augmentation du taux d'auto-provisionnement ;
- Cibles d'alimentation animale (élevage à l'herbe, maïs fourrage, soja...)

Second axe : bioénergies, affectation des terres et cultures à vocation énergétique

- Cibles pour les bioénergies en fonction des besoins de biocarburants liquides et de biogaz (arbitrages en faveur du biogaz, des biocarburants de seconde génération et stabilité du biodiesel) ;
- Calculs d'affectation des terres précisant l'utilisation des prairies permanentes (PPs), des taillis à courte rotation (TCRs) et des cultures ligno-cellulosiques à vocation énergétique.

Troisième axe : SAU, productions végétales, fertilisation azotée et séquestration de carbone

- Calculs d'affectation de la SAU hors prairies permanentes (PPs) : céréales et oléo-protéagineux (COPs), fruits et légumes, légumineuses, maïs fourrages, prairies temporaires (PTs) ;
- Hypothèses sur les rendements des COPs, en distinguant une variante plus optimiste et une variante plus pessimiste (chocs climatiques).
- Hypothèses sur la superficie des cultures intermédiaires, dont celles à vocation énergétiques (CIVE).
- Principales importations et exportations ;
- Hypothèses sur la séquestration de carbone organique (biomasse et sols) ;

- Hypothèses sur la fertilisation azotée (minérale, organique, pertes d'azote et bilan N).

Les variations relatives des émissions de méthane et de protoxyde d'azote, ainsi que du stockage de carbone dans les sols et la biomasse ont été estimées pour quelques postes. Toutefois, **le scénario n'a pas été quantifié à l'aide d'un modèle**. Les estimations semi-quantitatives des différents postes devront être précisées lors d'une étape ultérieure.

3. Valeurs des variables clés proposées pour les hypothèses d'un scénario AMS run 2 (2050 vs. 2020)

Pour chaque thématique, cette section précise les hypothèses moyennes **retenues pour 2050**, les variations relatives (**2050 par rapport à 2020**) et, le cas échéant, les écarts au run 1 de la SNBC3 AMS. Le tableau en annexe fournit également les variations relatives évaluées pour **2030 par rapport à 2020**.

Alimentation

- Pertes **et gaspillages** : **-50%** (run 1, intégrerait seulement les pertes post-récolte qui sont déjà faibles ; la réduction des gaspillages alimentaires réduit la consommation par habitant).
- Environ 50% de protéines d'origine animale dans l'alimentation, au lieu de 70% en 2020 :
- **-40% pour toutes les viandes « rouges », -20% volailles** (le PNNS recommande une réduction de 33% de la consommation des viandes « rouges » : bovins, porc, ovins, caprins⁶).
- Produits laitiers (lait, beurre/fromages) : **-30%** (le PNNS recommande de réduire la consommation à 1-3 produits laitiers par jour).
- Œufs : **pas de réduction** (compatible régime végétarien).
- **Protéines végétales** : maintien des céréales (privilégier des **céréales complètes**, -10% avec réduction des gaspillages) et augmentation de la consommation de **protéagineux**.
- **Fruits et légumes** : **+40%** (viser 400 g consommation par jour, le double en équivalent primaire) (NB. tension avec objectifs de réduction des phytosanitaires, relance production nécessaire).

Productions animales : scénario central (section 4.2)

Scénario central : tendances socio-économiques et baisse de consommation réduisent les cheptels

Seule cette hypothèse a été chiffrée à ce stade avec ses implications pour les productions végétales

- **Bovins** : réduction des cheptels de vaches allaitantes (-40%), vaches laitières (-30%), **soit une réduction de 35% environ de l'effectif total des vaches**, avec moins d'animaux de renouvellement (=> moins de CH₄).
- Productivité laitière (NB. Bien-être animal et pâturage) **+6%** vs. +15% dans le run 1.
- **Ovins** : **-10%** (la diminution de la consommation de viande ovine ne suivrait pas le taux de diminution des viandes rouges en général⁷).
- **Caprins** : **-40%**, car production peu durable (difficultés de valorisation des chevreaux), mais à noter toutefois le rôle spécifique de ces animaux dans l'entretien de territoires

⁶ Le programme national nutrition santé (PNNS) 2019-2023⁶ recommande au consommateur des régimes limitant la viande « rouge » (bœuf, porc, veau, mouton, chèvre à - de 500 g/semaine, au lieu de 747 g/semaine ou 1,2 kg équivalent primaire en 2020). Il s'agit donc d'une réduction d'un tiers (-33%) de la consommation moyenne de viande « rouge ». Le PNNS recommande également de limiter les produits laitiers (entre 1 et 3/jour) et la charcuterie (- de 150g /semaine).

⁷ La consommation de viande ovine est déjà basse (2,1 kg en 2021) et la viande ovine répond plus à un mode de consommation festif.

- Monogastriques : **poules pondeuses**, pas de variation. **-20% volailles de chair**.
- **Porcins** (l'alourdissement des carcasses a une limite) : cheptel : **-35%**

Alimentation animale

- Alimentation animale ruminants⁸ : plus de PTs (+260% vaches laitières–VLs en système pâturé), moins de maïs ensilé (-73% VLs en système maïs, -64% VLs en système mixte).
- Alimentation animale monogastriques : accord avec run 1, céréales, tourteaux, baisse imports de soja (+protéagineux).

Emissions directes : méthane d'origine entérique et azote excrété par les animaux d'élevage

Dans une variante, on a une faible R&I qui se traduit par une adoption limitée d'additifs alimentaires et d'alimentation multiphase. Dans l'autre, une forte R&I (R&I+) aboutit à une forte adoption d'additifs alimentaires et d'alimentation multiphase, plus des changements de conduite des troupeaux et une sélection génétique centrée sur les objectifs de baisse des émissions directes des ruminants et des monogastriques (section 4.4).

Scénarios alternatifs pour l'élevage

Dans le scénario central, les tendances socio-économiques et la réduction de la consommation de produits animaux pilotent la baisse des émissions directes. Dans le second scénario, un objectif de baisse des émissions directes et indirectes de -40% de chaque filière pilote la baisse de la consommation. Enfin, le troisième scénario vise un compromis entre un objectif de souveraineté alimentaire (augmentation possible du taux d'auto-provisionnement) compatible avec une baisse des émissions directes et indirectes de 40% (section 4.4). Les résultats indiquent que seuls les scénarios de la variante R&I+ permettent d'atteindre l'objectif de réduction de 40% au moins des émissions de l'ensemble des filières d'élevage (hors volailles et œufs) tout en préservant au maximum les productions animales. L'effort de recherche et d'innovation à engager devrait permettre de rendre les baisses des émissions moins dépendantes des évolutions de la consommation de produits animaux, consommation qui demeure intrinsèquement difficile à maîtriser même s'il faut renforcer les politiques de nutrition-santé.

Productions végétales

- Prairies permanentes (PPs) : -8% (de 9,3 à 8,6 Mha) avec TCRs et cultures ligno-cellulosiques.
- Prairies temporaires (PTs) : -54% (de 2,6 à 1,2 Mha, *cohérence évolution cheptels*).
- Maïs fourrages : en cohérence avec systèmes vaches laitières (VLs) -70% (de 1,4 Mha à 0,4 Mha)
- Fruits et légumes : +40% (0,38 Mha à 0,53 Mha, *relance nécessaire*).
- Légumineuses (accord run 1) : de +1 à +2,2 Mha.
- Grandes cultures superficie COP +5,5% : 12,7 à 13,4 Mha (*cohérent avec variations superficie SAU, PTs, Maïs fourrages, Fruits&Lég., légumineuses*).
- Rendements des systèmes conventionnels :
 - Hypothèse par défaut, ne prenant pas en compte l'accélération des chocs climatiques : +0,16% par an (voir note Rendements). Seule cette hypothèse a été chiffrée à ce stade.

⁸ Les quantités de fourrage ingérées prises en compte dans le run 1 intègrent la consommation des autres animaux du troupeau. Toutefois elles paraissent élevées, elles devraient varier avec le niveau de production des VLs, ce qui n'est pas le cas. Même remarque pour les quantités de concentrés.

○ Hypothèse chocs climatiques accrus (voir note Chocs climatiques-ressource en eau). Ces chiffres correspondent à une fourchette basse (variante du scénario AMS à construire) :

+ Cultures d'été : -10 à -20%

+ Cultures d'hiver : -2,5 à -7,5%

- Rendements en bio : 60% puis 70% du conventionnel (à l'échelle de la rotation).
- Estimation production COPs en 2050 : 102% en 2050 vs. 2020.
- Augmentation capacité export céréales, car moindre utilisation pour élevages et pour bioéthanol.
- Cultures intermédiaires (on n'envisage pas de cultures dites en dérobé (ou double culture) cultivées en été et donc dépendant de la ressource en eau d'irrigation). Les rotations simulées donnent une présence additionnelle de C.I. sur 8,5 Mha au total (Etude INRA, 2019). Comme le réchauffement raccourcit le cycle des cultures principales, il serait possible d'augmenter un peu cette superficie. Nous retenons des C.I. en 2050 sur 10 Mha, dont 4 Mha en CIVE (surtout des C.I. d'hiver pour éviter la concurrence pour l'eau)

Affectation des sols

- Artificialisation : 0,3 Mha (réduction tendance -0,5% tous les 10 ans. Arrêt en 2040. Idem run 1).
- Par rapport au run 1, plus de prairies permanentes (PPs) conservées (**réduction de 8% seulement**), une partie fauchées pour production de biogaz.
- Accrus forestiers : **+0,2 Mha** ; TCRs et cultures ligno-cellulosiques : **0,6 Mha**.
- Plus de PTs au sens PAC. En cohérence avec évolutions cheptels (dont petits ruminants et équins), besoin de 0,8 à 1,2 Mha de PTs. Hypothèse : **1 Mha**.
- Moindre réduction SAU (-1% ; conservation PPs et cultures ligno-cellulosiques).

Stockage de carbone dans le sol et la biomasse

- Cultures intermédiaires : 10 Mha, potentiel stockage carbone du sol (rapport INRA 2019) atteint. **NB.** Avec recyclage des digestats, la méthanisation ne semble pas diminuer le stockage C du sol.
- Agroforesterie : idem run 1.
- Haies : +1600 ha, ambition accrue par rapport au run 1.

Engrais N de synthèse

- Extension agriculture biologique sur 25% de la SAU : -330 kt N
- Mesures agroécologiques et optimisation fertilisation N : -426 kt N
- Augmentation des légumineuses dans la SAU : -128 kt N
- Réduction des pertes par volatilisation des épandages d'azote de synthèse : -18 kt N
- Réduction des pertes par volatilisation d'azote des effluents d'élevage : -42 kt N
- **Total : -944 kt N de synthèse, soit une économie potentielle de -46% d'azote minéral**

Bouclage N

- 2020 : 50% N de synthèse, 50% N organique et N issu de la fixation biologique par les légumineuses
- 2050 : réduction des pertes d'azote vers l'atmosphère : 656 kt N
- Besoin additionnel en N organique cultures après conversion agri-bio : **+330 kt** (+15% N organique total)

- Sources N organique :
 - N effluents élevage : -35 % (à utiliser en proportion croissante en agriculture biologique)
 - N fixation biologique de la SAU (légumineuses) : x4 (généralisation bio+conventionnel)
 - Recyclage d'azote via digestats de méthanisation : x 10

N.B. Le bouclage apparent de l'azote au niveau national masque de fortes disparités entre régions, vu les spécialisations régionales en grandes cultures ou en élevage.

Bioénergies, biocarburants

- Moins de biocarburants 1G. Peu de bioéthanol (1 TWh, en considérant des procédés possibles de conversion de la biomasse en carburant pour jets), stabilité biodiesel à 30 TWh car forte demande de biocarburants liquides (cf. augmentation oléo-protéagineux) pour les flottes de camions
- Plus de biocarburants 2G (cf. TCRs et ligno-cellulosiques, scénario prospective ADEME)
- Plus de biogaz : cf. CIVEs, résidus culture, PPs extensives fauchées, **55 TWh⁹** (contre 40 TWh dans le run 1 : +13 TWh déjections animales et 9 TWh déchets alimentaires)
- Un retour au sol d'une part importante de digestats couvre 10-15% des apports totaux d'azote aux cultures. Une partie de ces digestats est exportée hors de leur région de production pour favoriser le bouclage des cycles.

4. Notes thématiques

4.1. Scénario consommation alimentaire 2050 (Louis-Georges Soler)

La démarche proposée consiste à partir de la consommation moyenne France actuelle pour définir un régime cible à 2050 compatible avec une réduction des émissions de GES de 50% et avec les recommandations nutritionnelles. Environ 70 % des protéines consommées en France pour l'alimentation sont d'origine animale. L'adoption de régimes à base de plantes (peu transformées) pourrait se traduire par des économies de milliards d'euros dans toute l'Europe en coûts de soins de santé. On a estimé qu'en 2020 il y avait 2,4 millions de décès dans le monde, attribuables à une consommation excessive de viande rouge et transformée¹⁰. Parmi 10 recommandations nutritionnelles du WCRFI pour réduire l'incidence des cancers, figure une recommandation¹¹ visant à limiter la consommation de viande rouge (bovins, petits ruminants, porc) à 3 portions par semaine (environ 300 à 500 g après cuisson).

Le programme national nutrition santé (PNNS) 2019-2023¹² recommande au consommateur des régimes limitant la viande « rouge » (bœuf, porc, veau, mouton, chèvre à - de 500 g/semaine, au lieu de 747 g/semaine ou 1,2 kg équivalent primaire en 2020). Il s'agit donc d'une réduction d'un tiers (-33%) de la

⁹ A noter que cette valeur pourrait être considérée comme relativement faible par rapport à des prospectives récentes pour 2050 comme celle de l'ADEME (90 TWh) ou négaWatt (150 TWh). <https://transitions2050.ademe.fr/> ; https://solagro.org/images/imagesCK/files/publications/f108_2021_06_note_la-methanisation-dans-le-mix-energetique_solagro_negawatt.pdf

¹⁰ Plant-based diets and their impact on health, sustainability and the environment. WHO European Office for the Prevention and Control of Non communicable Diseases. WHO/EURO:2021-4007-43766-61591.

¹¹ World Cancer Research Fund International. <https://www.wcrf.org/diet-activity-and-cancer/cancer-prevention-recommendations/limit-red-and-processed-meat/>

¹² https://sante.gouv.fr/IMG/pdf/pnns4_2019-2023.pdf

consommation moyenne de viande « rouge ». Le PNNS recommande également de limiter les produits laitiers (entre 1 et 3/jour) et la charcuterie (- de 150g /semaine) et d'augmenter la part de légumineuses et légumes secs (au moins 2 fois par semaine) et de fruits et légumes (5 par jour), naturellement riches en fibres. Ces recommandations nutritionnelles contribuent à la prévention de maladies chroniques comme le diabète, l'obésité, les maladies cardio-vasculaires et certains cancers tout en réduisant les impacts environnementaux liés à l'alimentation.

- Sources

Plusieurs types d'études sont mobilisables, mais elles reposent sur des bases de données de consommation différentes. Certaines utilisent les données de consommation (en g/j de produits tels que consommés) issues de l'enquête INCA2 (Anses) de 2010 pour TYFA-GHG¹³, Afterres 2050¹⁴ ou Barré *et al.* (2018)¹⁵, et issues de la cohorte Nutrinet pour Seconda *et al.* (2017)¹⁶. Selon les cas, les valeurs d'impact en GES sont associées aux aliments (produits finis rendus au consommateur) ou aux produits avant transformation.

Ces études n'explicitent pas toujours toutes les valeurs par types d'aliments et prennent en compte des mécanismes différents :

- Les études conduites par les nutritionnistes et épidémiologistes ne bouclent généralement pas avec des scénarios de production, mais introduisent parfois certaines contraintes techniques (par exemple, sur la relation lait-viande).
- Les scénarios prospectifs qui intègrent un bouclage avec la production (TYFA, Afterres 2050) mais pas nécessairement un calage nutritionnel très précis.

Les données de référence 2020 de la SNBC et le scénario modélisé reposent sur des données de consommation de différents types de consommateurs, pour lesquels des hypothèses de modification des régimes alimentaires sont définies. Ces hypothèses intègrent une dimension d'optimisation des régimes sur le plan nutritionnel et des hypothèses de changements variables selon les types de consommateurs.

Au total, les résultats des différentes études ne sont pas toujours directement comparables. Globalement, il ressort néanmoins des points de convergence assez clairs sur l'évolution de la consommation des produits végétaux (fruits et légumes, céréales, légumineuses...), mais certaines différences dans l'évolution de la consommation de produits d'origine animale.

- **Résultats pour les viandes**

Dans toutes les études, pour une baisse visée de 40 à 50% des GES, la baisse totale de la consommation de viande se situe entre 40 et 50%, soit une consommation comprise entre 90 et 100g/j en 2050 (c'est-à-dire entre 140 et 160 g/j en équivalent primaire pour un coefficient de 1,6 utilisé par la SNBC).

¹³ Aubert P.M., Schwoob M.H., Poux X., 2019. Agroecology and carbon neutrality in Europe by 2050: what are the issues? Findings from the TYFA modelling exercise. IDDRI, Study N°02/19,

https://www.iddri.org/sites/default/files/PDF/Publications/Catalogue%20iddri/Etude/201904-ST0219-TYFA%20GHG_2.pdf

¹⁴ <https://afterres2050.solagro.org/>

¹⁵ Barré T., Perignon M. *et al.*, 2018. Integrating nutrient bioavailability and co-production links when identifying sustainable diets: How low should we reduce meat consumption? *PLoS ONE*, **13**: e0191767. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0191767>

¹⁶ Seconda L., Baudry J., Alles B., Galan P. *et al.*, 2017. Structure and nutritional quality of french adult diets according to their greenhouse gas emissions - Findings from the Bionutrinet project. *Ann. Nutr. Metab.* **71**, 858.

La valeur AMS run 1 en équivalent primaire est de 193 g/j pour une valeur 2020 de 242 g/j. La valeur proposée SNBC3 2050 en équivalent primaire pourrait être de 150g/j, soit une baisse d'un peu moins de 40% par rapport à 2020 (au lieu de 20%).

L'amplitude de la baisse selon les types de viande varie selon les études :

- Les études centrées sur nutrition et GES privilégient : une forte baisse de la consommation de viande rouge et de charcuterie ; une baisse de la consommation de volaille moins forte. Quand les études intègrent une contrainte technique lait-viande bovine, la baisse envisagée de consommation de viande de ruminants est un peu moins forte et la baisse de consommation de viande blanche un peu plus forte.
- Les études et prospectives qui intègrent plus explicitement une évolution du modèle de production vers l'agroécologie, les interactions animal-végétal, la compétition sur l'usage des sols entre alimentation humaine et alimentation animale, etc. (...) débouchent sur une réduction globale de consommation de viande assez similaire, mais différente dans la part respective des ruminants et des monogastriques. Le scénario TYFA-GHG s'inscrit par exemple dans cette perspective : la prise en compte de la question de la biodiversité (agroécologie, herbe...) conduit à un maintien relatif consommation de ruminants sous réserve d'un basculement sur des systèmes herbagers et une forte baisse de la consommation de monogastriques (à cause de la concurrence sur les céréales entre alimentations humaine et animale).

Le Tableau 3 présente le détail de la composition de la consommation des viandes dans les différentes études mentionnées précédemment.

Dans le cadre de ce travail, l'hypothèse retenue pour le run 2 est celle d'un taux de réduction identique pour ruminants et monogastriques. Cette hypothèse devrait être discutée.

Les nouvelles valeurs proposées, en supposant que le coefficient de passage des données de consommations finales en g équivalent primaire/j est de 1,6, sont présentées dans le Tableau 4.

Tableau 3. Détail de la composition de la consommation des viandes dans différentes études et différentiel entre 2020 et 2050.

En g/j tel que consommé	2010	2050	Δ 2050/2010
TYFA-GHG (Auber <i>et al.</i>, 2019)			
Viande de ruminants	36	29	-20%
Autres viandes	154	61	-60%
Total	183	92	-50%
Etudes nutrition-GES (données de base Nutrinet ; Seconda <i>et al.</i>, 2017)			
Viande bovine	63	26	-59%
Viande blanche (porc-volaille)	96	60	-38%
Total	159	86	-54%
Etude Nutrition-GES avec contrainte technique lait-viande ruminant (Barré <i>et al.</i>, 2018)			
Viande bovine	45	30	-35%
Viande blanche (porc-volaille)	100	40	-60%
Total	140	70	-50%

Tableau 4. Propositions de valeurs de consommation pour les différents types de viandes et comparaison avec les valeurs utilisées dans le run 1.

En g eq. primaire/j	2020	Run 1	Δ	Proposition run2	Δ
Viande bovine	65	48	-26%	39	-40%
Viande ovine, caprins	9	7	-26%	5,4	-40%
Porc	97	69	-29%	58,2	-40%
Volaille	71	69	-2%	42,6	-40%
Viande totale	242	193	-20%	145	-40%

- **Résultats pour les produits laitiers**

- Dans les études « Nutrition-GES » intégrant une contrainte technique lait-viande ruminant (Barré et al., 2018), il ressort une stabilité de la consommation totale de produits laitiers (200 g/j), mais une baisse de la consommation de fromage (-50%) et yaourts (-30%), et une hausse de la consommation de lait (+50%).
- Pour études nutrition-GES (données de la cohorte Nutrinet ; Seconda *et al.*, 2017), il ressort une réduction de 10% de la consommation de lait et de 20% de celle de fromage.
- Dans le scénario TYFA-GHG, la consommation de lait visée est placée à la recommandation nutritionnelle (300g/j), soit une baisse de l'ordre de 40% par rapport au point de départ.

Les données utilisées dans le scénario SNBC ne sont pas facilement reliables aux autres sources. On note une faible baisse dans AMS run 1. Dans les diverses études, les baisses envisagées sont généralement plus fortes, ou quand on note peu de variations, c'est pour des niveaux de consommation au point de départ beaucoup plus faibles.

4.2. Productions animales : scénario central (René Baumont, Xavier Fernandez)

Cette dimension du scénario AMS a fait l'objet de divers commentaires de la part des experts INRAE.

- Remarques préliminaires sur les calculs du run 1 pour les cheptels des ruminants

Cheptels

- Les diminutions sont plus marquées en AMS (- 20% environ) par rapport à AME (- 10%), ce qui semble logique. Toutefois, les tendances AME sont peut-être sous-estimées si on regarde les évolutions et décapitalisations en cheptel rapides depuis 5 ans (-250 000 VL et -250 000 Vall en 5 ans). Les interprofessions estiment qu'on pourrait être déjà à -13% en 2030.
- Le cheptel total de ruminants est réduit en même proportion que les mères, ce qui veut dire que l'on ne change rien sur les animaux de renouvellement. C'est un point important à considérer. Car une hypothèse forte pour un scénario AMS pourrait (devrait ?) être de réduire les animaux « improductifs » en généralisant le vêlage à 2 ans, notamment pour le cheptel allaitant pour lequel c'est encore très minoritaire. Cela constitue un levier important pour réduire les émissions de GES des ruminants.
- Un point difficile à comprendre, même s'il a probablement peu d'impact au final, c'est le -44% des chèvres dans le scénario AMS. On voit en effet sur le terrain un regain d'intérêt pour les installations en chèvres laitières (et brebis laitières). Elles pourraient remplacer, en partie, les cessations en VL.

Alimentation des ruminants

- Les quantités de fourrage ingérées du scénario actuel doivent intégrer la consommation des autres animaux du troupeau, sinon elles n'ont pas de sens. Toutefois, elles paraissent également élevées aux collègues de l'Idèle et elles devraient varier avec le niveau de production des VL, ce qui n'est pas le cas.
- Même question pour les quantités de concentrés : est-ce qu'elles incluent les consommations des autres animaux du troupeau ? Il faudrait avoir plus précisément comment les consommations de fourrages et de concentrés ont été calculées.
- Il serait utile de croiser ces données avec les données de Res'Alim et de l'étude GIS Avenir Elevages sur les flux de matières premières utilisées en alimentation animale, mais il faudrait du temps pour le faire.

- Bovins : cheptels et modes d'élevage

L'examen des tendances en cours (voir Figure en section 5, conclusions) de baisse des cheptels bovins laitiers et allaitants conduit à proposer une poursuite initiale de ces tendances jusqu'en 2030, puis un ralentissement de la décroissance des cheptels bovins à partir de 2030. En 2050, la décroissance des cheptels laitiers atteindrait 26% et celles des cheptels allaitants 45% (Tableau 5). La plus forte décroissance projetée pour les cheptels allaitants implique une augmentation de la part de la production de viande à partir du cheptel laitier, ce qui se traduirait par une plus grande efficacité totale de la conversion des protéines végétales en protéines animales et par des émissions de méthane réduites par kg de viande.

L'augmentation modérée de la productivité laitière par vache s'explique par les niveaux déjà élevés d'intensification réalisés et par un passage à un mode d'élevage herbager dominant (68% des vaches laitières, VL, en 2050). Le mode d'élevage herbager des VL est favorisé par une plus grande quantité d'herbe disponible

par vache et par la montée des préoccupations concernant le bien-être animal et la qualité des produits. A l'inverse, la part des VL en système maïs diminue fortement, les rendements du maïs devenant plus irréguliers (voire plus faibles, cf. section 4.3) sous l'effet du changement climatique et d'une plus faible disponibilité d'eau pour l'irrigation en période estivale. Les fluctuations inter-saisonniers et interannuelles de ressources herbagères devenues abondantes seraient palliées par la constitution de stocks accrus de fourrages et par des zones tampons, utilisées en phase de sécheresse alors qu'elles pourraient être fauchées pour la méthanisation lorsque la production est abondante.

Tableau 5. Projection pour trois horizons de temps des effectifs des cheptels bovins laitiers et allaitants.

Cheptels bovins	% variation 2040/2030	2030	2040	2050	% variation 2050 / 2020
Vaches laitières, milliers de têtes	-9,6%	3 125	2 826	2 556	-26%
Vaches allaitantes, milliers de têtes	-18,3%	3 285	2684	2 193	-45%
Total vaches, milliers de têtes	-14,0%	6 409	5 510	4 748	-30%
Total bovins, milliers de têtes	-14,0%	15 294	13 149	11 304	-29%
VL système herbager, milliers de têtes	53,1%	937	1 435	1 743	260%
VL système mixte, milliers de têtes	-36,8%	687	434	282	-64%
VL système maïs maj. , milliers de têtes	-36,2%	1 500	957	531	-73%
% herbager	70%	30%	51%	68%	
% mixte	-31,8%	22%	15%	11%	
% maïs maj.	-29,2%	48%	34%	21%	
Productivité laitière, kg lait/vache/an	1,4%	7341	7445	7534	

- Productions ovine et caprine

- Les évolutions 2011-2021 montrent une baisse significative du cheptel allaitant (-15% ; 4 239 à 3 578 milliers de têtes)¹⁷ et une quasi-stabilité du cheptel laitier (-2% ; 1 596 à 1 558 milliers de tête). Dans le même temps, la consommation de viande ovine a chuté de 28% (elle est passée de 2,9 à 2,1 kg/habitant), avec un taux d'approvisionnement de 50%.

Pour le run2 de l'AMS, on peut faire deux hypothèses :

- Une hypothèse « haute », avec une évolution du cheptel proche de celle proposé pour le cheptel bovin (-26%), en lien avec une baisse très significative de la consommation de viande ovine, dans la lignée de celle des viandes rouges en général ;
- Une hypothèse basse (-10%) qui reposerait sur le fait que la diminution de la consommation de viande ovine ne suivrait pas le taux de diminution des viandes rouges en général car : 1) la consommation de viande ovine est déjà basse (2,1 kg en 2021) ; et 2) la viande ovine répond plus à un mode de consommation festif, associé à une image de qualité du produit et de gastronomie, ou à des pratiques culturelles.

¹⁷ Agreste, Synthèses conjoncturelles, Mars 2022, N° 387

L'hypothèse « basse » semble la plus probable car la diminution de la consommation, si elle se poursuit, devrait réduire les importations avant d'impacter le cheptel français.

- Pour ce qui concerne les projections du cheptel brebis laitière, elles dépendent de l'évolution de la consommation de produits laitiers, en particulier de fromages de brebis. Si l'hypothèse d'évolution ADEME sur les produits laitiers est globalement stable, on peut imaginer une stabilité du cheptel qui est resté stable ces dernières années et qui est associé à des systèmes d'élevage privilégiant les systèmes herbagers.

- **Propositions**

- Stabilité du cheptel de brebis laitières en cohérence avec la stabilité de consommation des produits laitiers et fromages ; idem pour les caprins.
- Deux hypothèses (haute, -26% et basse, -10%) selon équilibre de la balance commerciale pour le cheptel ovin allaitant.

- Production porcine

- Les hypothèses de réduction du cheptel porcin dans l'AMS 2023 sont de -10% par an. Cela correspond à un doublement de l'évolution constatée de 2000 à 2020, avec -30% de 2020 à 2050.

Il serait nécessaire de voir comment prendre en compte dans les projections de consommation les évolutions possibles de reports de consommation entre viandes (taux de diminution de consommation potentiellement différents entre viandes rouges et blanches) : la projection de -30% du cheptel porcin n'est cohérente que si la projection de la diminution de consommation de viandes est également de -30% pour le porc.

Par ailleurs, si l'hypothèse de réduction du cheptel porcin est dimensionnée à la projection de consommation de viande porcine, est-ce que d'autres critères que le nombre de porcs produits sont pris en compte dans l'AMS 2023 ? Par exemple de 2000 à 2020, le cheptel porcin a diminué de 10% alors que la disponibilité de viande porcine n'a diminué que de 1,2% du fait d'un alourdissement de carcasses.

- L'hypothèse de réduction du nombre de truies dans l'AMS 2023 s'accompagne visiblement d'une augmentation de la productivité numérique (nbre de porcelets sevrés vivants / truie ?) car le ratio nbre de truies/ cheptel total évolue conjointement à la réduction du nbre de truies. Cette hypothèse est discutable.

Même si depuis la moitié des années 2000, grâce en particulier à des changements dans les critères de sélection, la mortalité post-natale des porcelets n'augmente plus aussi vite avec la prolificité, une projection d'augmentation de la prolificité reste associée à une mortalité post-natale élevée (de l'ordre de 20%¹⁸). Quelle est l'acceptabilité à long terme de ces systèmes de production ?

Sur ce point, il faudrait prendre en compte également l'augmentation possible de systèmes d'élevage plein-air qui ne sont pas intégrés actuellement dans le scénario AME/AMS 2023 et qui pourraient

¹⁸ Voir par exemple Le Floc'h N., Boudon A., Montagne L., Gilbert H., Gondret F., Lebreton B., Lefaucheur L., Louveau I., Merlot E., Père M.-C., Meunier-Salaün, M.-C., Prunier A., Quesnel H., 2021. Santé et bien-être de la truie gestante et du porc en croissance. *INRAE Productions Animales*, **34**, 211–226. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2021.34.3.4879>

également influencer la productivité globale des élevages porcins (surtout avec naissage à l'extérieur).

- Cheptel plein air : on peut faire l'hypothèse que ce mode d'élevage au minimum se maintiendra alors que la production conventionnelle baissera.

- **Propositions**

- Hypothèse de réduction de la consommation de viande de porc de -40% (cf. section 4.7).
- Les données de la balance commerciale indiquent, pour 2019, 38% de la production exportée pour 30% de la consommation importée (FranceAgriMer). Une hypothèse extrême d'arrêt des importations, associée à une réduction de 40% de la consommation n'affecterait le cheptel français que de -10%. Une hypothèse plus probable d'équilibre entre baisse des importations et baisse des exportations conduirait à une diminution du cheptel de l'ordre de 20%. Cette baisse ne touchera probablement pas la part du cheptel dans les systèmes autres que conventionnel.

- Productions avicoles

- En 2021, 46% de la viande de poulet consommée en France était importée. L'AMS 2050 prévoit une légère augmentation de la balance commerciale viande de poulet (960 kt en 2050 pour 918 en 2020). Est-ce le résultat d'une baisse des importations (objectif affiché de la filière) ou une prévision d'augmentation des exportations ? Selon les modalités d'évolution de cette balance commerciale, l'impact de la baisse de consommation sur la production peut être variable : une relative stabilité de la consommation de la viande de poulet dans un contexte de baisse des importations de viande peut se traduire par une augmentation significative de la production.
- La baisse du cheptel poulet de chair dans l'AMS 2023 (-1% entre 2050 et 2020) ne paraît pas cohérente avec les prévisions ADEME de chute de la consommation de viande de volaille (-4%). Le poulet représentant 79,6% des viandes de volaille consommées¹⁹, est-ce que cela veut dire que dans les prévisions ADEME, la diminution de la consommation de viande de volaille toucherait proportionnellement plus les autres types de viande (essentiellement dinde et canards) ?
- Il y a, à ce jour, un découplage entre la production de volailles de chair et la production d'œufs. Une diminution de la consommation de viande de volaille n'affectera pas forcément la consommation d'œuf (les poules pondeuses de réforme n'entrent pas dans le circuit de la consommation humaine).

- **Propositions**

- **La consommation d'œufs reste stable (compatible avec les régimes végétariens) = le cheptel de pondeuses ne varie pas.**
- L'hypothèse de baisse de consommation de -40% de la viande de volaille paraît très difficile à atteindre. Si la consommation de la viande bovine et de porc baisse de -40%, il y aura probablement une part de report sur une autre viande blanche (le poulet).

Dans la synthèse proposée dans ce document, nous avons retenu l'hypothèse de base d'une baisse différenciée des principaux cheptels : vaches allaitantes (-42%), vaches laitières (-26%), porcins (-30 à -40% selon les échanges commerciaux), volailles de chair (-20%) et pas de variation pour les poules pondeuses. Ces évolutions tiennent compte des tendances de la consommation (augmentation de la consommation

¹⁹ Agreste, Synthèses conjoncturelles, Juin 2021 N° 373

de volailles de chair, par exemple) et du potentiel d'exportations. Elles nuancent donc les tendances retenues en première étape pour les évolutions de la consommation de protéines animales (Tableau 4).

4.3. Principaux leviers pour réduire les émissions de GES, notamment de CH₄ entérique, des ruminants et des monogastriques (René Baumont, Jean-Louis Peyraud, Edwige Quillet, Jean-François Soussana)

Troupeaux bovins et petits ruminants

En dehors de la réduction du cheptel, déjà amorcée, d'autres leviers liés à la conduite alimentaire et zootechnique existent pour réduire les émissions de méthane du troupeau bovin. Les pistes détaillées ci-dessous amènent aux hypothèses suivantes d'ici à 2050.

-Gestion des troupeaux pour réduire les effectifs à même production (Didier Boichard, Jean-Louis Peyraud)

- Une réduction du format des animaux est souhaitable. Chez les laitières, le format a peu de valeur (autre que subjective) tout en coûtant un entretien élevé (donc de l'ingestion et donc du méthane) tout au long de la carrière. Ce caractère est très héritable et une diminution de 100kg du poids adulte (-1.5 écart type génétique) est un objectif très raisonnable en 10 ans. **Cela induirait une baisse de 5% du méthane émis.**
- Chez les allaitantes, si le format joue davantage sur le produit viande, il coûte cher en méthane, directement par l'ingestion pendant une carrière assez longue des vaches avant leur réforme, et indirectement sur la précocité au premier vêlage (les animaux de grand format sont plus tardifs).
- Vaches laitières. Faire vêler à 24 mois les génisses, alors que les génisses de plus de 24 mois représentent 10% des UGB laitières. La marge est importante même si seulement la moitié des éleveurs la mettent en œuvre.
- Vaches allaitantes. Les génisses de plus de 24 mois représentent 17% des UGB totales du secteur mais on se heurte au manque de précocité de nos races à viande. Des solutions existent avec les races britanniques (Angus, Hereford) et le croisement.
- Allonger les carrières des animaux. Les résultats d'INRAE à l'Unité Expérimentale du Pin montrent que passer d'un taux de renouvellement de 40 à 25% ferait gagner 14% d'émission de méthane/L de lait.
- Le potentiel d'une adoption renforcée des vêlages précoces et d'une carrière allongée est estimé pour les vaches laitières à -10% par kg de lait ou viande ; pour les vaches allaitantes à -2% par kg de viande (du fait de l'absence de potentiel des races françaises pour un vêlage précoce).
- Réduire les effectifs allaitants et faire plus de viande à partir du troupeau laitier (on divise par 2 l'empreinte C du kg de viande) mais cela pose des questions d'organisation de nouvelles filières pour relancer l'engraissement en France avec de l'herbe (y compris des broutards). La prime à l'UGB devrait faciliter le développement de ce type de filière, même si les effets seront sans doute modestes.

- Additifs alimentaires pour réduire le méthane entérique

Ces additifs sont surtout utilisés en élevage laitier et en phase d'engraissement pour la production de viande. Pour l'élevage allaitant à l'herbe, c'est plus difficile car la distribution des additifs nécessite un travail supplémentaire.

- Le 3-nitrooxypropanol (3-NOP, produit DSM) dispose d'une AMM pour la production laitière (produit Bovaer de DSM). Il permet de réduire les émissions de CH₄ de 25-30% sur un pas de temps long sans affecter la production²⁰. Mais son utilisation pose la question de l'acceptabilité de ce type d'additif « chimique », non seulement pour les consommateurs mais aussi pour les éleveurs. Il subsiste par ailleurs des questions sur la génotoxicité possible du 3-NOP et sur l'exposition des consommateurs à l'un des résidus de sa métabolisation par les animaux (acide 3-nitrooxypropionique – NOPA, considéré comme non génotoxique)²¹.
- **Les algues rouges** originaires d'Australie : plusieurs essais (Australie, Suède) donnent des niveaux de réductions des émissions de CH₄ entérique très importants pour les algues séchées, de -50% pour des vaches laitières²². Une filière *Asparagopsis* (principe actif bromoforme, de concentration variable ce qui peut affecter l'efficacité des algues) est développée par l'Australie²³ (Future Feed, distribution en Europe). En France, l'Idèle est en train de tester cette option à la ferme expérimentale des Trinottières (projet Meth'Algues²⁴). Le potentiel de réduction en Australie est particulièrement élevé en phase d'engraissement (-90%) et variable au pâturage (-35 à -75%). Cette forte réduction de la perte d'énergie, s'accompagne d'une croissance accrue des bovins (+10% en engraissement, +5-10% au pâturage). Comme le niveau de TRL est encore faible, il faudrait développer la filière d'approvisionnement en algues rouges tropicales et résoudre les problèmes de distribution du complément alimentaire au pâturage. Cette filière est attractive car elle a un bénéfice économique pour les éleveurs en augmentant l'énergie métabolique disponible pour la croissance et la lactation.
- **Les graines de lin extrudées** sont aussi efficaces pour réduire les émissions de CH₄ entérique²⁵, mais les surfaces à mettre en culture pour les utiliser à l'échelle de l'élevage français ne sont pas réalistes.
- Utiliser des **légumineuses** qui font baisser le méthane (5%/ L lait) mais aussi les émissions de N₂O liées aux engrais.

²⁰ voir par exemple Yu G., Beauchemin K.A., Dong R., 2021. A review of 3-Nitrooxypropanol for enteric methane mitigation from ruminant livestock. *Animals (Basel)*, **11**, 3540, doi: 10.3390/ani11123540 ; Kebreab E., Bannink A., Pressman E.M. Wlaker N. *et al.*, 2022. A meta-analysis of effects of 3-nitrooxypropanol on methane production, yield, and intensity in dairy cattle. *J. Dairy Sci.*, <https://doi.org/10.3168/jds.2022-22211>

²¹ <https://www.efsa.europa.eu/en/efsajournal/pub/6905>

²² voir par exemple Roque B.M., Salwen J.K., Kinley R., Kebreab E., 2019. Inclusion of *Asparagopsis armata* in lactating dairy cows' diet reduces enteric methane emission by over 50 percent. *J. Clean. Prod.*, **234**, 132–138. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.06.193

²³ L. Atallah, V. Hebrail. La stratégie de la filière viande rouge australienne pour la neutralité carbone. Ambassade de France en Australie. Service économique régional de Canberra. Décembre 2022.

²⁴ <https://idele.fr/detail-article/methalgues-des-algues-pour-reduire-les-emissions-de-methane-enterique-chez-la-vache-laitiere>

²⁵ Brunschwig P., Hurtaud C., Chilliard Y., Glasser F., 2010. L'apport de lin dans la ration des vaches laitières : Effets sur la production, la composition du lait et des produits laitiers, les émissions de méthane et les performances de reproduction. *INRA Productions Animales*, **23**, 307–318.

- Sélection génétique bas méthane des troupeaux laitiers et allaitants (Didier Boichard)

La généralisation de la sélection génétique d'animaux à faibles émissions de méthane (mesures directes en station d'élevage) constitue une voie prometteuse, puisqu'il existe une héritabilité de ce facteur^{26,27}. Cette voie a notamment été développée à grande échelle en Nouvelle-Zélande, aboutissant à une réduction prouvée des émissions chez les ovins (taux de réduction²⁸ mesuré expérimentalement sur un lot : 30%). Elle fait l'objet d'un projet soumis par l'IDELE à France 2030 : Méthane 2030.

Pour les bovins lait, coté R&D, les équations de prédiction des émissions entériques de méthane à partir du lait sont disponibles. Avec une évaluation génomique précise, une sélection directe sera possible. Les simulations usuelles annoncent un progrès de l'ordre de 1% par an. Mais **pour atteindre ce niveau, il faut un poids du méthane dans l'objectif de sélection d'au moins 40%**. Il s'agit d'une décision forte, qui dépendra beaucoup des facteurs économiques et politiques. **Dans cette hypothèse, la sélection pourrait apporter 10% de réduction en 10-15 ans**. L'impact sur les composantes de l'émission de méthane dépend du critère utilisé. Avec un critère de type « quantité de méthane par jour », il est difficile aujourd'hui de distinguer la part de la réduction directement imputable à l'efficacité ruminale de l'impact d'autres composantes comme la réduction du format. Cette voie est prometteuse, mais son déploiement chez les bovins lait à l'échelle du cheptel national prendrait 20 ans environ. Néanmoins, sous condition d'une politique ambitieuse d'innovation et de déploiement dans les schémas de sélection, elle pourrait conduire à une réduction additionnelle estimée à 10% des émissions de CH₄ d'origine entérique dans les troupeaux français.

Pour les bovins allaitants, le projet Méthane 2030 prévoit des prédictions NIRS à partir de fécès. La faisabilité en routine à des fins de sélection devra être étudiée. Les mesures par « sniffer » sont également envisageables mais nécessitent que les animaux viennent se faire mesurer. **Au moins dans un premier temps, la priorité doit être mise sur les critères indirects, les plus importants étant la précocité et le format.**

- Monogastriques

Porcs (Hélène Gilbert, Vanille Déru)

La sélection sur l'efficacité alimentaire est réalisée depuis plus de cinquante d'ans chez le porc. L'indice de consommation est le principal critère de sélection pour améliorer l'efficacité alimentaire. Sa pondération dans l'objectif global de sélection est particulièrement élevée et a augmenté ces 10 dernières années, notamment dans les lignées paternelles. Elle a permis de progresser fortement sur ce caractère depuis les années 1970 (Bidanel et al., 2020). En maintenant la stratégie actuelle dans les lignées porcines et d'après des premiers résultats de simulations réalisés avec le package AlphaSimR sous le logiciel R (Gaynor et al., 2021), l'indice de consommation devrait diminuer d'environ 5% d'ici 15 ans.

Avec des simulations de croissance et besoins nutritionnels des porcs en croissance, Saintilan et al. (2012) ont montré que l'azote excrété total était fortement corrélé à l'indice de consommation (corrélation

²⁶ Lassen J, Løvendahl P., 2016. Heritability estimates for enteric methane emissions from Holstein cattle measured using noninvasive methods. *J. Dairy Sci.*, **99**, 1959–1967. doi: 10.3168/jds.2015-10012.

²⁷ Manzanilla-Pech, Coralia Ines Valentina, et al. "Selecting for feed efficient cows will help to reduce methane gas emissions." *Frontiers in Genetics* 13 (2022).

²⁸ <https://www.sciencelearn.org.nz/resources/3076-breeding-low-methane-sheep>

génétique < -0,97 ; Saintilan et al., 2012), contrairement à l'azote excrété dans les fèces (corrélation génétique \approx - 0,50 ; Déru et al., 2021). Avec cette estimation, l'objectif de sélection actuel permettrait d'envisager une baisse des rejets azotés allant jusqu'à 5%.

Le potentiel de réduction des émissions d'azote dans 15 ans pourrait donc varier de 0,8% avec l'objectif de sélection actuel, jusqu'à environ 6.5% pour un schéma de sélection avec un objectif de sélection incluant ce caractère et des animaux nourris avec des régimes alternatifs.

Ces réductions seraient amplifiées si l'on peut généraliser l'adoption :

- de stratégies d'alimentation multiphase et très ajustées en protéines, de façon à rapprocher au plus près l'apport alimentaire des besoins nutritionnels,
- de l'utilisation de co-produits, via la réduction de la production et du transport d'aliments dédiés à la filière porcine (capté par des approches type ACV),

Enfin, il faut souligner que les émissions d'azote des monogastriques sont des sources d'engrais organiques pour les productions végétales dont l'utilisation pourrait être mieux distribuée pour éviter des impacts locaux négatifs (à l'échelle nationale il y a plutôt un manque).

Volailles de chair (S. Grasteau, E. Quillet)

L'indice de consommation est à l'heure actuelle le principal critère de sélection permettant la réduction des émissions azotées chez les volailles. Les tendances actuelles depuis 2010 (chiffres ITAVI) montrent que, si l'on maintient la stratégie de sélection actuelle, l'indice de consommation aura baissé en 15 ans de 6.5% chez le poulet label, 3.7 % chez le poulet certifié, 16.7% chez le poulet standard.

Les données de la littérature convergent sur le fait que la rétention azotée s'améliore plus vite que l'indice de consommation. Compte-tenu du ratio entre indice de consommation et rejets azotés, cela correspond à des baisses de rejets azotés de 12% chez le poulet label, 7% chez le poulet certifié, 31% chez le poulet standard. Il faut noter que le poids mis sur le caractère dans l'objectif de sélection explique probablement une part importante des écarts entre les 3 filières.

Des calculs complémentaires, pondérant ces segments de production, ainsi que le bio, indiquent que l'on peut obtenir 12.8 % sur 15 ans pour l'indice de consommation, ce qui donne, en rejets azotés pour l'ensemble de la filière poulet de chair -24 % en 15 ans.

4.4. Trois scénarios pour l'élevage (Jean-François Soussana, Edwige Quillet, Jean-Louis Peyraud, René Baumont)

Scénarios d'émissions du secteur de l'élevage à l'horizon 2050

Les émissions de l'élevage de la France représentent 39 Mt eqCO_2 en 2020, soit 49 % des émissions de l'agriculture. Selon l'inventaire Floréal (CITEPA, 2022), 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 %). **Le faible poids des volailles dans les émissions de l'élevage explique que l'effort de réduction à engager pour les filières volailles de chair et œufs soit moindre.** L'essentiel des émissions est lié à la fermentation entérique et aux déjections (bâtiment, stockage, épandage et pâture). L'élevage est également responsable d'émissions indirectes comptabilisées dans le sous-secteur des cultures,

principalement au travers de l'utilisation d'engrais épandus sur les sols cultivés, et prairies pour la production végétale destinée à l'alimentation animale (céréales, protéagineux, fourrages). Une part de l'alimentation végétale est importée. C'est notamment le cas pour le soja consommé par les ruminants (37 % du total) et par les monogastriques (45 % du total), pour lequel les importations dépassent d'un facteur 3 environ la production nationale. Pour les céréales, seuls 22 % de la production sont destinés à l'alimentation animale nationale (6 % pour les ruminants, 16 % pour les monogastriques)²⁹. Au total, les émissions indirectes amont et aval, soit hors fermentation entérique, sont estimées à 30,3 Mt éqCO₂ en 2018³⁰ soit presque autant que les émissions des élevages.

Deux hypothèses de recherche et innovation (R&I) sont présentées dans le tableau 1. Elles contrastent une variante de faible R&I (R&I-) se traduisant par une adoption limitée d'additifs alimentaires et d'alimentation multiphase et une variante de forte R&I (R&I+) aboutissant à une forte adoption d'additifs alimentaires et d'alimentation multiphase, plus des changements de conduite et une sélection génétique des troupeaux (faibles rejets de méthane et d'azote excrété).

	R&I-	R&I+	R&I+	R&I+	R&I+
	Baisse unitaire* ligne de base	Baisse unitaire* additifs ou alimentation multiphase	Baisse unitaire* conduite troupeau	Baisse unitaire sélection génétique	Total*** baisse unitaire émissions directes*
Lait (VL)	-15%	-25%	-5%	-10%	-32%
Viande (VA)	-3%	-20%	-5%	-5%	-24%
Viande bovine (VA+VL)**	-7%	-22%	-5%	-7%	-27%
Porc	-4%	-8%	0%	-6%	-11%
Poulet	-2%	-4%	0%	-10%	-11%
Œufs	-2%	-4%	0%	-10%	-11%

*1/2 potentiel technique. Emission par kg de produit : méthane entérique pour les bovins et petits ruminants; azote excrété pour les monogastriques

** Viande bovine issue à 35% de la filière lait

***L'additivité de ces trois options n'étant pas prouvée, la somme est réduite de 20%

Tableau 1. Baisse unitaire (% par kg de lait ou de viande) des émissions directes des principales filières d'élevage. R&I, effort de recherche et d'innovation.

Les valeurs retenues pour ce tableau ont été construites à partir de la section 4.3, mais en considérant de plus des limites à l'adoption de changements de pratiques (additifs alimentaires, alimentation multi-phase, conduite des troupeaux), et au poids donné dans la sélection génétique nationale aux objectifs de réduction

²⁹ Citepa (2020). Rapport Floréal, <https://www.citepa.org/fr/floreal/>

³⁰ Citepa (2020). Données Floréal métropole, <https://www.citepa.org/fr/floreal/>

de format, de réduction des émissions de méthane et d'azote excrété. De plus, l'additivité des effets des changements de pratiques et de la sélection génétique étant mal connue, l'effet total a été réduit de 20% par rapport à la somme des effets de chaque levier pris individuellement.

Les trois scénarios comprennent chacun une variante R&I- et une variante R&I+. Les deux premiers scénarios supposent que les taux d'auto-provisionnement (ratio production/consommation) observés en 2020 ne changent pas. Le troisième autorise une hausse de l'auto-provisionnement.

Tableau 2. Trois scénarios d'évolution des filières d'élevage à l'horizon 2050 visant une baisse des émissions directes de méthane entérique et d'azote excrété (N₂O). Chaque scénario comprend deux variantes de recherche et d'innovation (voir Tableau 1) visant la réduction des émissions unitaires (par kg de lait ou de viande) directes. Les émissions indirectes considérées proviennent des cultures pour l'alimentation animale. On suppose pour les bovins et les monogastriques 20% et 50% d'émissions indirectes, respectivement, dans les émissions totales (direct+indirect). Les chiffres en gras indiquent les cas d'émissions réduites de 40% au moins et parmi ces cas, les niveaux de production les plus élevés en 2050 par rapport à 2020.

Filière	Consommation (2050/2020)	Total baisse unitaire émissions directes	Taux d'auto-provisionnement 2050	Production (2050/2020)	Emissions directes (2050/2020)	Emissions directes +indirectes (2050/2020)	
H1. Baisse de la consommation de produits animaux							
R&I-	Lait (VL)	0.70	-15%	1.1	0.70	0.60	0.62
	Viande (VA)	0.60	-3%	0.87	0.60	0.58	
	Viande bovine (VA+VL)**	0.64	-0.07	0.95	0.64	0.59	0.60
	Porc	0.64	-4%	1.03	0.64	0.61	0.63
	Poulet	0.80	-2%	0.81	0.80	0.78	0.79
	Œufs	1.00	-2%	0.98	1.00	0.98	0.99
R&I+	Lait (VL)	0.70	-32%	1.1	0.70	0.48	0.52
	Viande (VA)	0.60	-24%	0.87	0.60	0.46	
	Viande bovine (VA+VL)**	0.64	-27%	0.95	0.64	0.46	0.50
	Porc	0.64	-11%	1.03	0.64	0.57	0.60
	Poulet	0.80	-11%	0.81	0.80	0.78	0.76
	Œufs	1.00	-11%	0.98	1.00	0.89	0.94
H2. -40% émissions directes+indirectes							
R&I-	Lait (VL)	0.68	-15%	1.1	0.68	0.58	0.60
	Viande (VA)	0.62	-3%	0.87	0.62	0.60	
	Viande bovine (VA+VL)**	0.64	-7%	0.95	0.64	0.59	0.60
	Porc	0.61	-4%	1.03	0.61	0.59	0.60
	Poulet	0.61	-2%	0.81	0.61	0.60	0.60
	Œufs	0.61	-2%	0.98	0.61	0.60	0.60
R&I+	Lait (VL)	0.80	-32%	1.1	0.80	0.54	0.60
	Viande (VA)	0.74	-24%	0.87	0.74	0.56	
	Viande bovine (VA+VL)**	0.76	-27%	0.95	0.76	0.56	0.60
	Porc	0.64	-11%	1.03	0.64	0.57	0.60
	Poulet	0.64	-11%	0.81	0.64	0.57	0.60

	Œufs	0.64	-11%	0.98	0.64	0.57	0.60
H3. auto-apvisionnement complet, jusqu'à +20%, et cible émissions -40%,							
R&I-	Lait (VL)	0.70	-15%	1.10	0.70	0.60	0.62
	Viande (VA)	0.60	-3%	0.87	0.60	0.58	
	Viande bovine (VA+VL)**	0.64	-7%	0.95	0.64	0.59	0.60
	Porc	0.64	-4%	1.03	0.64	0.61	0.63
	Poulet	0.70	-2%	0.81	0.70	0.69	0.69
	Œufs	1.00	-2%	0.98	1.00	0.98	0.99
R&I+	Lait (VL)	0.70	-32%	1.27	0.81	0.55	0.60
	Viande (VA)	0.60	-24%	1.09	0.75	0.57	
	Viande bovine (VA+VL)**	0.64	-27%	1.15	0.77	0.56	0.60
	Porc	0.64	-11%	1.03	0.64	0.57	0.60
	Poulet	0.70	-11%	0.81	0.70	0.62	0.66
	Œufs	1.00	-11%	0.98	1.00	0.89	0.94

Dans le premier scénario (scénario central dans le reste de ce rapport), les tendances socio-économiques et la réduction de la consommation de produits animaux, selon les hypothèses détaillées dans la fiche élevage, pilotent la baisse des émissions directes. Dans le second scénario, un objectif de baisse des émissions directes et indirectes de -40% de chaque filière pilote la baisse de la consommation. Enfin, le troisième scénario vise un compromis entre un objectif de souveraineté alimentaire (augmentation possible de l'auto-apvisionnement) qui doit être compatible avec une baisse des émissions directes et indirectes de 40%.

Dans les deux premiers scénarios, les réductions de production et de consommation sont identiques. Dans le premier scénario en R&I-, malgré des baisses importantes de production la réduction des émissions des filières n'atteint pas 40% (à l'exception de la viande bovine issue d'élevages allaitants). En revanche, en R&I+ elle dépasse 40%, sauf dans le cas des filières poulets et œufs peu touchées par la baisse de consommation.

Dans le second scénario, l'ajustement de la consommation à un objectif de baisse de 40% des émissions directes de chaque filière se traduit en R&I- par une baisse de 32 à 39% de la consommation et de la production des différentes filières. En R&I+, la réduction des émissions de 40% est compatible avec des baisses plus modérées de consommation (et de production) de lait (-20%), de viande bovine (-24%) et de viande de monogastriques (-26%). Dans cette variante, la baisse de la consommation moyenne de viande (ruminants et porc) est toutefois insuffisante au regard des objectifs du PNNS (- 33%)³¹.

Le troisième scénario suppose que la baisse des émissions peut renforcer la compétitivité des filières animales, ce qui permet d'augmenter le taux d'auto-apvisionnement de la France à condition que les émissions directes + indirectes baissent de 40%. En R&I-, la baisse des émissions de 40% est tout juste atteinte pour les filières lait et viande hors volailles, ce qui ne permet pas d'augmenter l'auto-apvisionnement de

³¹ Le programme national nutrition santé (PNNS) 2019-2023³¹ recommande au consommateur des régimes limitant la viande « rouge » (bœuf, porc, veau, mouton, chèvre à - de 500 g/semaine, au lieu de 747 g/semaine ou 1,2 kg équivalent primaire en 2020). Il s'agit donc d'une réduction d'un tiers (-33%) de la consommation moyenne de viande « rouge ». Le PNNS recommande également de limiter les produits laitiers (entre 1 et 3/jour) et la charcuterie (- de 150g /semaine).

ces filières. De même, la baisse insuffisante des émissions des filières poulet et œufs ne permet pas de renforcer l'auto-provisionnement.

En revanche, en R&I+, l'importante baisse des émissions résultant à la fois de la baisse de la consommation et de la baisse des émissions unitaires permettrait en théorie d'augmenter les taux d'auto-provisionnement de 15% pour le lait et de 25% pour la viande bovine. En revanche, pour les filières monogastriques la baisse des émissions n'est pas suffisante pour augmenter l'auto-provisionnement. Ce troisième scénario, variante R&I+, pourrait ainsi permettre d'atteindre des objectifs de nutrition santé (réduction d'un tiers de la consommation de viande de ruminants et de porc, environ 50% de protéines animales), de bas carbone (environ -40% de réduction des émissions directes+indirectes) et de renforcement de la souveraineté alimentaire (augmentation du taux d'auto-provisionnement des filières bovines).

Toutefois, le commerce intra-communautaire domine les échanges des filières animales et la convergence des politiques climatiques au sein de l'UE devrait se traduire par des baisses d'émissions similaires entre pays ce qui devrait contribuer à maintenir une certaine stabilité des échanges. Ce scénario fournit donc un plafond aux évolutions vraisemblablement plus modérées des taux d'auto-provisionnement des filières animales d'ici à 2050. Enfin, il faudrait vérifier la compatibilité de ce scénario avec l'arrêt des importations de soja issu de la déforestation, ainsi qu'avec le maintien d'un potentiel d'exportations de céréales dans un contexte d'évolution incertaines des rendements des grandes cultures sous l'effet de chocs climatiques n'est pas garantie.

En conclusion, il semble indispensable d'engager un effort de recherche et d'innovation important permettant d'obtenir des réductions d'émissions directes similaires à celles chiffrées dans le scénario R&I+. **En effet, seuls les scénarios la variante R&I+ permettent d'atteindre l'objectif de réduction de 40% au moins des émissions de l'ensemble des filières d'élevage (hors volailles et œufs) tout en préservant au maximum les productions animales.** L'effort de recherche et d'innovation à engager devrait permettre de rendre les baisses des émissions moins dépendantes des évolutions de la consommation de produits animaux, **consommation dont l'évolution devrait faire l'objet de politiques de nutrition-santé renforcées mais qui demeure intrinsèquement difficile à maîtriser.**

4.5. Evolutions des rendements (Philippe Debaeke)

- Effets du changement climatique

Il serait trop simpliste de conclure à une baisse des rendements en France avec le CC en 2050 dans toutes les régions et pour toutes les cultures.

Ce qui peut faire baisser les rendements :

- Sans adaptation (variété, conduite), l'augmentation des températures se traduit par une réduction de la durée de croissance et donc du rendement atteignable ;
- A cela s'ajoutent les effets dépressifs des hautes températures et du déficit hydrique (plus fréquent), ainsi que les effets de précipitations intenses et de gelées touchant une végétation se développant précocement sous l'effet du réchauffement.

Ce qui peut faire augmenter les rendements :

- Dans certaines régions (septentrionales), l'augmentation des températures permet un allongement du cycle de végétation (semis-récolte) et une réduction des stress froids ;
- L'augmentation de la concentration en CO₂ atmosphérique peut se traduire par une photosynthèse plus efficace et un accroissement des rendements potentiels (plus marqué pour les plantes en C3 comme le blé que pour les plantes en C4 comme le maïs) ; cet effet n'est escompté que dans les conditions où les stress hydriques, thermiques et nutritionnels sont contrôlés par les intrants ;
- La mise en place d'adaptations, mêmes incrémentales (décalage des dates de semis, changement de variétés), peut limiter les impacts négatifs du CC.

- Effet du progrès technique (génétique + conduite)

De manière générale, on enregistre un progrès génétique pour la plupart des plantes de grandes cultures (par construction, car mesuré sur les variétés inscrites au CTPS chaque année) ; ce progrès est plus ou moins valorisé par la conduite selon l'évolution de l'usage des intrants (N, produits phytosanitaires), la disponibilité des ressources (irrigation), la diffusion du conseil et les outils d'optimisation pour la décision.

Même si le progrès génétique est moins prononcé et les ressources plus limitées, l'hypothèse du maintien d'une progression des rendements même faible liée au progrès technique peut être conservée.

- Effet des modes de production

Les modes de production réduisant le recours aux intrants N + produits phytosanitaires (du conventionnel vers l'AB) se traduisent en général par des baisses de rendement au moins dans les premières années.

Le scénario SNBC3 pour le run 1 (voir exemple pour le blé tendre dans le Tableau 6) considère que les rendements optimisés permettent de maintenir les rendements (mais il faudrait voir les conséquences sur les quantités d'engrais utilisées) et réduit de 5 % les rendements en production intégré. Il est à noter que ces hypothèses n'intègrent pas les effets possibles sur la qualité des grains (taux de protéines, d'oligo-éléments...)³².

³² A ce sujet, voir par exemple Myers *et al.*, 2014. Increasing CO₂ threatens human nutrition. *Nature*, **510**, 139-142, doi: 10.1038/nature13179 ; Smith et Myers, 2018. Impact of anthropogenic CO₂ emissions on global human nutrition. *Nature Climate Change*, **8**, 834-839, <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0253-3>.

Tableau 6. Hypothèses sur le rendement du blé tendre pour le run 1 de la SNBC3 (source : DGEC).

Type	Description	Rdt 2020	Rdt 2050
		t	t
"Conventionnel 2020"	Pratiques 2020	7.1	7.2
"Optimisé"	Optimisation grâce à l'agriculture de précision (ajustement des apports N), pour la baisse de l'IFT désherbage mécanique, sélection variétale, lutte biologique... Même rendements que conventionnel 2020	7.1	7.2
"Intégré" (avec c. interm.)	Optimisation grâce à l'agriculture de précision et dvp de pratiques agro-écologiques : CI (lég/graminées) ; intégration de 15 à 20% de légumineuses dans les rotations (4 ans en moyenne)	6.8	6.8
"Agribio" (avec c. interm.)	Optimisation et dvp de pratiques agro-écologiques : CI (lég) ; intégration de 25 à 30% de légumineuses dans les rotations (6 ans en moyenne)	3.6	5
"Agribio" + C. interm. + prairies temporaires leg fourragères	Optimisation et dvp de pratiques agro-écologiques : CI (lég) ; intégration de 40% de légumineuses à graines et fourragères dans les rotations (8 ans en moyenne)		

En AB, l'étude fait l'hypothèse d'une réduction actuelle de 50 % des rendements par rapport au conventionnel et d'une réduction à terme de 30 % (sous hypothèse d'une meilleure maîtrise technique ou de variétés plus adaptées). A titre de comparaison, le Tableau 7 présente une synthèse de la comparaison des rendements moyens en AB et en conventionnel en France pour quelques grandes cultures.

Tableau 7. Comparaison des rendements moyens (q/ha) en AB et en conventionnel en France pour quelques grandes cultures (Source : Cour des comptes, 2022)³³.

	Rendements en AB (moyenne 2016-2018 ; données Agence Bio)	Rendements en conventionnel (moyenne 2016-2020 ; données Agreste)	Différentiel rendements
Blé tendre	28	69	-60%
Mais	62	90	-45%
Tournesol	19	23	-17%
Triticale	30	49	-39%
Féverole	18	25	-28%

L'étude INRAE sur la place des agricultures européennes dans le monde à l'horizon 2050³⁴ a produit des scénarios d'évolution du rendement en s'appuyant sur les projections de rendement à 2050 (modèle de

³³ Cour des Comptes, 2022. Le soutien à l'agriculture biologique, 353 pp. <https://www.ccomptes.fr/system/files/2022-07/20220630-rapport-soutien-agriculture-bio.pdf>

³⁴ Tibi A., Debaeke P., Ben-Ari T., Bérard A., Bispo A. *et al.*, 2020. Place des agricultures européennes dans le monde à l'horizon 2050 : Entre enjeux climatiques et défis de la sécurité alimentaire mondiale. <https://hal.inrae.fr/hal-03170700>.

Makowski *et al.*, 2020³⁵) et sur des hypothèses de progrès technique, de scénarios RCP et d'effet plus ou moins fort de l'augmentation du CO₂ atmosphérique.

Des fourchettes d'évolution ont été calculées pour les principales cultures en % d'évolution annuelle du rendement à partir d'une référence 2010 (moyenne des rendements 2009-2011). Si on retient les **valeurs minimales** :

- Blé +0,19 q/ha/an soit +0,28 %
- Maïs +0,14 q/ha/an soit +0,15 %
- Colza +0,14 q/ha/an soit +0,41 %
- Légumineuses -0,05 q/ha/an soit -0,12 %
- Soja +0,08 q/ha/an soit +0,29 %
- Tournesol -0,02 q/ha/an soit -0,08 %

On peut comparer ces projections à l'évolution réelle des rendements, observée depuis les années 70 pour les principales espèces de grandes cultures (Arvalis, 2015 ; voir aussi à ce propos la Figure 2.). Le blé tendre est passé d'une évolution tendancielle de + 1,7 % par an en début de période à **+ 0,2 %** dans les années 2000, l'orge d'hiver (de +0,8 % à **+0,4 %**), le maïs grain (de +1,6 % à **+0,7 %**) et le colza (de +1,6 % à **+0,6 %**).

La stagnation actuelle des rendements correspond ainsi à une fourchette d'évolution annuelle de +0,2 à +0,7 % selon les espèces qui correspond bien aux valeurs données plus haut. Le tournesol et les légumineuses (hors soja) voient leurs rendements décroître (à défaut : pas de variation).

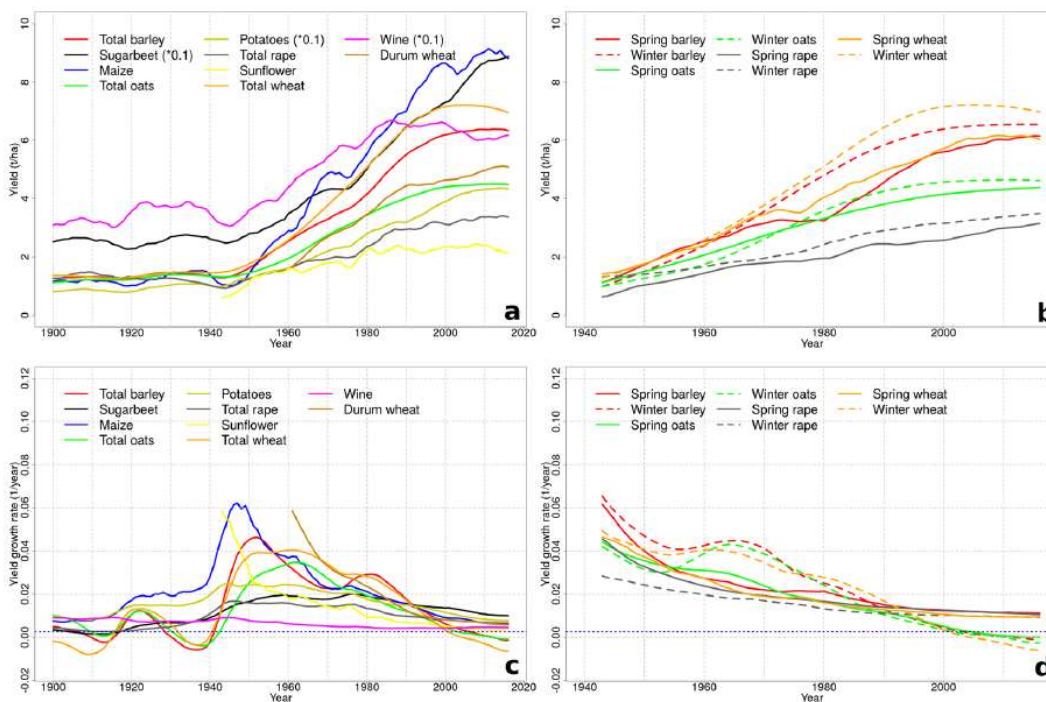


Figure 2. Tendances et taux de croissance des rendements des cultures de base en France aux XX^e et XXI^e siècles. (a) Tendances des rendements, pour les espèces cultivées à une saison et cumulées par saison (1900-2016) ; (b) Tendances des rendements, pour les cultures de printemps et d'hiver (1943-2016) ; (c) Taux de croissance annuels

³⁵ Makowski D, Marajo-Petizon E, Durand J-L, Ben-Ari T. 2020. Quantitative synthesis of temperature, CO₂, rainfall, and adaptation effects on global crop yields. *Eur. J. Agron.*, **115**, 126041. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126041>

relatifs des rendements ; (d) Taux de croissance des rendements, pour les cultures de printemps et d'hiver. Certains rendements de cultures ont été mis à l'échelle pour correspondre à l'axe utilisé ; l'unité pour le vin est hl/ha. Toutes les valeurs sont des agrégats nationaux sous forme de moyennes pondérées entre les départements (source : Schauburger *et al.*, 2018³⁶).

- Conclusion

- 1) Accord avec les hypothèses sur les rendements relatifs pour les différents modes de production.
- 2) Introduction d'une **progression modérée des rendements à 2050** pour tous les modes de production (suivant les hypothèses d'évolution minimales des rendements proposées par l'étude INRAE sur la place des agricultures européennes dans le monde à l'horizon 2050).

Les hypothèses sur les modes de production et leurs impacts sur les rendements apparaissent donc réalistes.

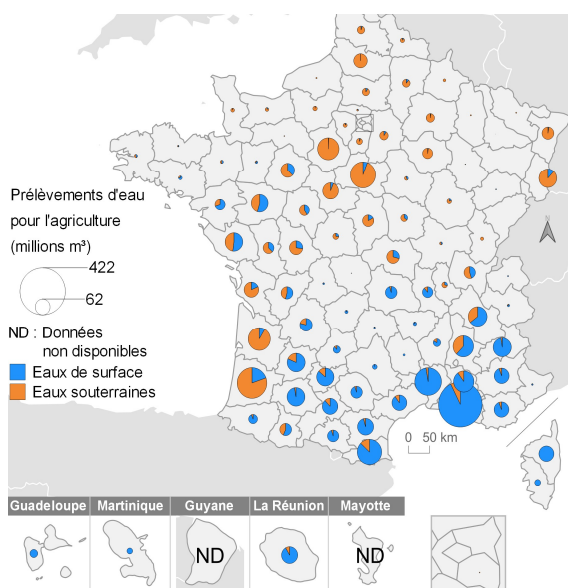
³⁶ Schauburger, B., Ben-Ari, T., Makowski, D. et al., 2018. Yield trends, variability and stagnation analysis of major crops in France over more than a century. *Sci. Rep.*, **8**, 16865. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-35351-1>

4.6. Chocs climatiques, rendements et ressources en eau. Proposition d'une variante du scénario AMS pour 2050 (Jean-François Soussana, Thierry Caquet)

- Usages de l'eau en agriculture

Les prélèvements pour l'agriculture représentent 10 % des volumes d'eau prélevés en 2019³⁷. Une part importante de ce volume (plus de 80%) est destinée à l'irrigation. Celle-ci consomme environ 3,2 milliards de m³ d'eau en France³⁸. Selon les chiffres du Recensement Général Agricole 2020, l'irrigation a augmenté dans toutes les régions de France. En France métropolitaine, on constate une augmentation de 14% de la surface irriguée entre 2010 et 2020. Cette augmentation touche des régions en déficit hydrique (comme l'Occitanie +13%), mais aussi d'autres peu touchées comme les Hauts-de-France, où l'irrigation a augmenté de 78% à SAU quasi-constante.

La part de l'eau restituée aux milieux aquatiques par rapport à la quantité d'eau prélevée pour les usages agricoles est la plus faible de tous les usages. En outre, l'impact des prélèvements pour l'agriculture est d'autant plus important que les volumes d'eau concernés interviennent pour l'essentiel entre avril et septembre, au moment où le débit naturel des cours d'eau est le plus bas (période d'étiage). L'eau prélevée pour l'agriculture est, en moyenne, majoritairement puisée dans les eaux de surface (59 % en 2019). Néanmoins, cette répartition est particulièrement contrastée entre le sud et le nord du territoire (Figure 3).



Source : Office français de la biodiversité, Banque nationale des prélèvements quantitatifs en eau (BNPE). Traitements : SDES, 2022

Figure 3. Prélèvements d'eau douce pour l'agriculture par département, en 2019 (source <https://www.notre-environnement.gouv.fr/>).

³⁷ <https://www.notre-environnement.gouv.fr/themes/economie/l-utilisation-des-ressources-naturelles-ressources/article/les-prelevements-d-eau-douce-par-usages-et-par-ressources>

³⁸ <https://chiffrecl.e.oieau.fr/1587> (estimation 2016, actualisée en 2020).

- Effets du changement climatique

Le réchauffement anthropique devrait augmenter la sécheresse des sols à l'avenir. Cependant, les projections s'accompagnent d'une grande incertitude. Samaniego *et al.* (2018)³⁹, en utilisant un ensemble de modèles hydrologiques et de surface forcés avec les sorties d'un modèle de circulation générale, ont estimé qu'une augmentation de 3°C se traduirait en Europe par une augmentation de la surface concernée par des sécheresses (+40 ± 24% ; Figure 4). De plus, l'occurrence d'événements similaires à la sécheresse de 2003 serait doublée. En raison de leur occurrence accrue, les événements de cette ampleur ne seront plus classés comme extrêmes.

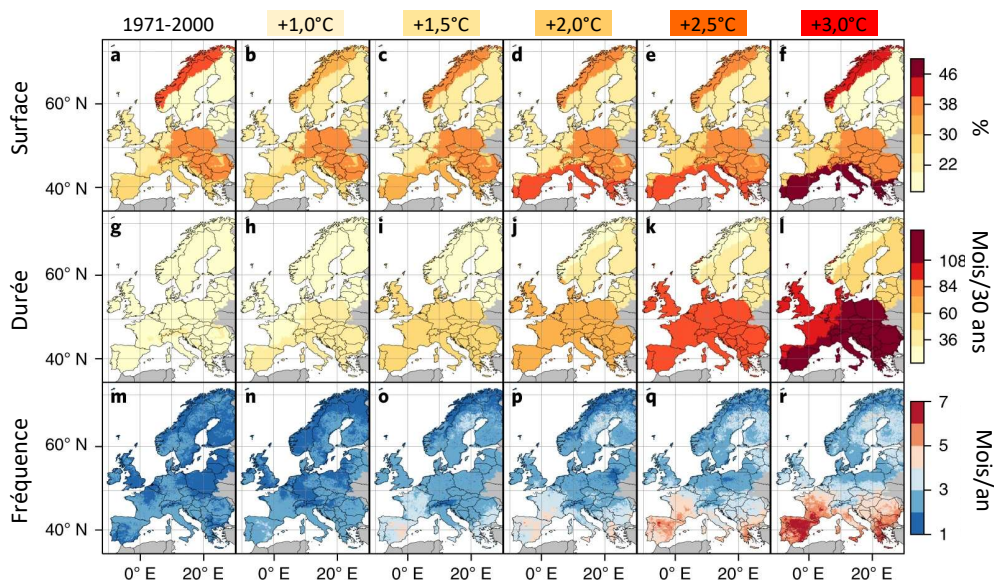


Figure 4. Répartition spatiale des changements dans la surface, la durée et la fréquence des sécheresses en Europe pour différents niveaux de réchauffement (source : Samaniego *et al.*, 2018).

L'étude EXPLORE 2070⁴⁰ a montré qu'il est très probable que les évolutions climatiques à venir auront des conséquences en termes de diminution des volumes d'eau écoulés, au niveau annuel et en période d'été. La quantification du phénomène reste entachée d'une forte incertitude, mais une situation globalement plus sèche, avec des écoulements réduits mais aussi des sols plus secs, plus tôt dans l'année, avec toutes les conséquences agricoles induites. L'étude EXPLORE a montré une diminution significative des débits moyens annuels et des débits d'été (Figure 5), ainsi qu'une baisse quasi-générale de la piézométrie associée à une diminution de la recharge des nappes. Une nouvelle étude EXPLORE 2 est en cours et les données obtenues seront publiées sur le portail DRIAS Eau. Les filières travaillent sur les pistes d'adaptation et des diagnostics territoriaux d'adaptation au changement climatique ont été lancés dans le cadre du Varenne Agricole de l'eau et de l'adaptation au changement climatique.

³⁹ Samaniego L. et al., 2018. Anthropogenic warming exacerbates European soil moisture droughts. *Nature Climate Change*, **8**, 421-426. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0138-5>

⁴⁰ Synthèse de l'étude EXPLORE 2070, MEDD, 2017. <https://professionnels.ofb.fr/fr/node/44>

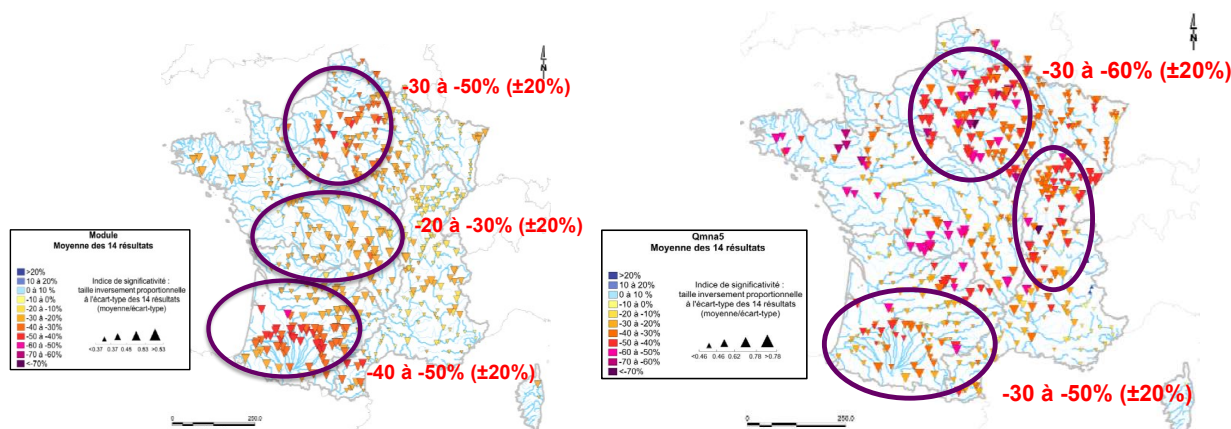


Figure 5. Résultats de l'étude EXPLORE 2070 : débits moyens annuels (à gauche) ; débits d'étiage (à droite) ; source : synthèse de l'étude EXPLORE 2070, MEDD, 2017).

- Leviers pour l'adaptation

Parmi les nombreux leviers disponibles, tous à effet partiel dans le temps et/ou dans l'espace⁴¹, les perspectives pour l'eau et l'agriculture⁴² soulignent la place centrale de la gestion des sols (couverture, matière organique) dans la gestion de la ressource en eau agricole, le développement d'une irrigation de résilience (plus économe, tendant vers la sécurisation de la production agricole et non vers sa maximisation), la mobilisation d'une part accrue des ressources des concessions hydroélectriques, la réduction des prélèvements en période d'étiage et les projets de territoires pour la gestion de l'eau, en développant des modalités de tarification prenant mieux en compte la rareté de la ressource. Cela doit passer en premier lieu par une gestion de la demande en eau (tarification incitative, adaptation des autorisations de prélèvements aux volumes prélevables dans le respect du bon état écologique des masses d'eau, réduction des consommations par des modifications des comportements et/ou des progrès technologiques, changement d'assolements et de cultures) dans tous ses aspects socio-économiques, et la conscience que même des ressources considérées comme très abondantes aujourd'hui sont limitées.

La réduction des pertes en eau des canaux et des réseaux d'irrigation, la création de retenues de substitution compatibles avec un bon état écologique des milieux aquatiques devraient améliorer la disponibilité de l'eau pour l'irrigation. Enfin, des solutions innovantes de renforcement de la ressource en eau (réutilisation des eaux usées après traitement⁴³, réalimentation de nappes) peuvent être considérées à condition de pouvoir garantir la qualité de l'eau.

⁴¹ Dossier de presse – Conclusions du Varenne agricole de l'eau et de l'adaptation au changement climatique. <https://agriculture.gouv.fr/telecharger/129213>

⁴² Ayphassorho H., Sallenave M., Bertrand N., Mitteault F., Rollin D., 2022. Quelles perspectives pour l'eau et l'agriculture d'ici à 2050 dans le contexte du changement climatique? *Annales des Mines-Responsabilité et environnement*, **106**, 81–84

⁴³ La réutilisation des eaux usées traitées (REUT) présente un avantage conséquent d'un point de vue environnemental car elle permet de recycler l'eau traitée et de limiter la consommation d'eau douce. Elle reste cependant peu développée en France. Dans le cadre des Assises de l'eau, le Gouvernement a confirmé l'intérêt de réutiliser ces eaux et a fixé un objectif national de tripler, d'ici à 2025, les volumes d'eaux non conventionnelles (eaux usées traitées, eaux grises, eaux de pluie...) utilisés. Cette réutilisation est pertinente dans les zones littorales où certaines stations d'épuration rejettent leurs effluents en mer, ce qui constitue une perte d'eau douce. Dans les zones continentales, en revanche, les rejets de station d'épuration participent parfois de manière significative au soutien d'étiage – c'est-à-dire au maintien d'un débit minimum nécessaire pour le bon fonctionnement des écosystèmes aquatiques – et la REUT présente moins d'intérêt dans ce cas, voire pourrait avoir un impact environnemental négatif.

Les inspecteurs du CGAAER anticipent, dans un rapport publié le 15 novembre 2022⁴⁴, un doublement d'ici 2050 de la capacité de stockage d'eau en France, pour passer de 3 à 6 milliards de m³, à condition que cette cible soit compatible avec les exigences de bon état écologique des masses d'eau et des milieux écologiques.

- Conséquences sur les rendements

L'on ne dispose toujours pas de projections nationales permettant de coupler les évolutions climatiques, hydrologiques et agronomiques possibles. Les évolutions des rendements agricoles des cultures irriguées sont particulièrement difficiles à évaluer, car elles dépendent non seulement des projections climatiques et des scénarios de systèmes de culture, mais aussi de la disponibilité de l'eau pour l'irrigation. Les conséquences d'une demande accrue par évapotranspiration, associée à une moindre disponibilité de la ressource en eau devraient se traduire par des baisses de rendements plus fréquentes des cultures touchant particulièrement les cultures estivales. Au-delà de la réduction des rendements, on peut s'attendre à une augmentation de leur variabilité spatiale et temporelle.

Les principaux enseignements de la littérature récente concernant les évolutions des rendements en Europe indiquent :

- Pour les rendements, les contrastes entre niveaux de réchauffement augmentent après 2050⁴⁵. La demande en eau pour l'irrigation augmente beaucoup avec le réchauffement, alors que les ressources en eau seront de plus en plus limitées/irrégulières.
- L'augmentation du CO₂ préserve initialement les rendements chez le blé (C₃), mais pas ceux de plantes d'origine tropicale comme le maïs⁴⁶ (C₄).
- L'adaptation permet de limiter⁴⁷ en début de période les impacts négatifs du réchauffement.
- La fréquence des pertes de récolte augmente avec le niveau de réchauffement du fait de deux types d'extrêmes : canicules/sécheresse et engorgement/inondation. Ce second type est mal pris en compte par les modèles agronomiques⁴⁸.
- Des perturbations atmosphériques (régime des jet streams) pourraient augmenter la probabilité de canicules/sécheresses en Europe⁴⁹. Ces perturbations sont mal prises en compte par les modèles climatiques.
- Les modèles contraints par les données concluent à un réchauffement plus fort⁵⁰ dès 2050, de l'ordre de 3°C. Ces projections ne sont pas encore traduites en termes d'impacts sur les rendements.

⁴⁴ Tremblay D., Ruiz J., 2022. Rapport du CGAAER n° 21044 : Évaluation du coût du changement climatique pour les filières agricoles et alimentaires. <https://agriculture.gouv.fr/telecharger/133166>

⁴⁵ Carozzi M., Martin R., Klumpp K., Massad R.S., 2022. Effects of climate change in European croplands and grasslands: productivity, greenhouse gas balance and soil carbon storage. *Biogeosciences*, **19**, 3021–3050. <https://doi.org/10.5194/bg-19-3021-2022>

⁴⁶ Webber H., Ewert F., Olesen J.E., Müller C. *et al.*, 2018. Diverging importance of drought stress for maize and winter wheat in Europe. *Nat. Comm.*, **9**, 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-06525-2>

⁴⁷ Donatelli M., Srivastava A.K., Duveiller G., Niemeyer S., Fumagalli D., 2015. Climate change impact and potential adaptation strategies under alternate realizations of climate scenarios for three major crops in Europe. *Environ. Res. Lett.*, **10**, 075005.

⁴⁸ Zhu P., Abramoff R., Makowski D., Ciais P., 2021. Uncovering the past and future climate drivers of wheat yield shocks in Europe with machine learning. *Earth's Future*, **9**, e2020EF001815.

⁴⁹ Rousi E., Kornhuber K., Beobide-Arsuaga G., Luo F., Coumou D., 2022. Accelerated western European heatwave trends linked to more-persistent double jets over Eurasia. *Nat. Comm.*, **13**, 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31432-y>

⁵⁰ Ribes A., Boé J., Qasmi S., Dubuisson B., Douville H., Terray L., 2022. An updated assessment of past and future warming over France based on a regional observational constraint. *Earth Syst. Dynam.*, **13**, 1397–1415. <https://doi.org/10.5194/esd-13-1397-2022>

- Conséquences pour les hypothèses pour le scénario AMS

Ces résultats peuvent conduire à développer une **variante du scénario AMS avec réduction des rendements d'ici à 2050**, en considérant :

- Un choc climatique une année sur 4⁵¹ (Zhu *et al.*, 2021). Ce choc (de -10 à -30%) se traduirait **par une réduction de -2,5 à -7,5% du rendement moyen en 2050 par rapport à 2010 du blé et des cultures d'hiver**, à comparer à une augmentation de 7% (+0,16% par an) retenue dans le scénario sans prise en compte des chocs climatiques.
- Une réduction de la disponibilité de l'eau d'irrigation associée à des chocs climatiques, se traduisant **par une baisse de 10 à 20% du rendement du maïs et des cultures d'été en 2050 par rapport à 2010**⁵².

Les effets de cette variante n'ont pas été intégrés à ce stade aux hypothèses concernant les évolutions des productions végétales, de l'alimentation animale et humaine et des échanges. L'adaptation au changement climatique (variétés, pratiques agricoles, gestion de l'eau et des sols) pourrait limiter les effets négatifs modélisés⁵³. La variante AMS « chocs climatiques » devrait donc être précisée (par exemple, -3% pour les cultures d'hiver et -12% pour les cultures d'été) afin de fournir une fourchette basse dans l'évaluation des évolutions des rendements des grandes cultures d'ici à 2050.

4.7. Potentiel des CIVE (Nicolas Bernet)

Les réflexions sur le potentiel de production de biogaz à partir de biomasse végétale issue de Cultures Intermédiaires à Valorisation Énergétique reposent sur la mobilisation de plusieurs éléments :

- Plutôt que de raisonner en pourcentage de CIVE récoltables, il est ici question d'évaluer la surface récoltée nécessaire.
- La Stratégie Nationale de Mobilisation de la Biomasse a évalué en 2019 l'offre supplémentaire en biomasse méthanisable sans déstabilisation des autres filières existantes à 30 TWh, pour un gisement total de 40 TWh (Tableau 8)⁵⁴. L'évaluation de l'offre en biomasse supplémentaire disponible montre qu'à l'horizon 2023, une grosse moitié des besoins additionnels devraient être satisfaits à partir de biomasse agricole, majoritairement via l'exploitation des résidus de récoltes, des cultures intermédiaires à vocation énergétique (CIVE), mais également via l'agroforesterie et de façon plus minoritaire par des cultures pérennes.

⁵¹ Zhu P., Abramoff R., Makowski D., Ciais P., 2021. Uncovering the past and future climate drivers of wheat yield shocks in Europe with machine learning. *Earth's Future*, 9, e2020EF001815. <https://doi.org/10.1029/2020EF001815>

⁵² Webber H., Ewert F., Olesen J.E., Müller C. *et al.*, 2018. Diverging importance of drought stress for maize and winter wheat in Europe. *Nat. Comm.*, 9, 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-06525-2>

⁵³ Donatelli M., Srivastava A.K., Duveiller G., Niemeyer S., Fumagalli D., 2015. Climate change impact and potential adaptation strategies under alternate realizations of climate scenarios for three major crops in Europe. *Environ. Res. Lett.*, 10, 075005.

⁵⁴ Stratégie française pour l'énergie et le climat. Programmation pluriannuelle de l'énergie, 2019-2023/2024-2028. [https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/20200422_Programmation_pluriannuelle_de_l'énergie.pdf](https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/20200422_Programmation_pluriannuelle_de_l%27energie.pdf)

Tableau 8. Offre de biomasse supplémentaire (en TWh) en énergie finale (source : Programmation pluriannuelle de l'énergie, 2019-2023/2024-2028).

			2023	2028
Biomasse méthanisée	Biomasse agricole	Cultures (pérennes, CIVE)	2,3	3,9
		Résidus de culture	6,7	11,3
	Déchets et autres co-produits	Déchets verts	1,2	1,9
		Boues de STEP	0,2	0,4
		Déchets et co-produits IAA	0,2	0,5
	Effluents		7,8	13,3

- L'étude de potentiel la plus récente disponible fournit pour 2028 une répartition des approvisionnements correspondant aux 30 TWh de biométhane à produire (objectifs PPE) par nature de ressources : 6 pour le secteur non agricole, 10 pour les déjections d'élevage, 8 pour les CIVE, 3 pour les résidus de culture, 2 pour l'herbe de fauche et 1 pour les cultures fourragères⁵⁵.
- Les 8 TWh à fournir par les CIVE en 2028 correspondent à la méthanisation d'environ 3,5 Mt de matière sèche, le rendement étant de l'ordre de 2,8 MWh/t MS⁵⁶. Une production moyenne de 6 à 9 tMS/ha⁵⁷ conduirait à une surface de CIVE récoltées nécessaire de 300 000 à 500 000 ha, très inférieure au potentiel disponible, même avec des hypothèses très prudentes. Elle pourrait être atteinte en se limitant aux CIVE d'hiver, hors CIVE d'été, et en excluant tous les secteurs où les CIVE seraient en concurrence pour la ressource en eau avec les cultures alimentaires. Cette surface dépend évidemment beaucoup des rendements constatés : les évaluations de surface données sont à prendre comme des ordres de grandeur, à comparer à titre indicatif avec les surfaces de cultures dédiées aux filières actuelles d'agrocultures (colza, blé, betterave), soit environ 1,2 Mha⁵⁸.

⁵⁵ ADEME, 2018. Un mix de gaz 100% renouvelable en 2050 ? – Etude de faisabilité technico-économique, 281 pp. <http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/france-independante-mix-gaz-renouvelable-010503a.pdf>

⁵⁶ Pour les CIVE, le potentiel méthanogène varie de 200 à 310 Nm³/t MS selon les espèces. Les variations de potentiel observées en pratique dépendraient moins des espèces que d'autres facteurs. Ainsi, le potentiel méthanogène tend à diminuer avec le stade de développement des plantes. À un stade plus avancé, malgré des teneurs en amidon et en sucres digestibles supérieures liées au remplissage des grains, la lignification plus importante de la culture expliquerait ces résultats. Toutefois, dans le cas des CIVE, cette baisse du potentiel méthanogène est compensée par la production supplémentaire de biomasse lorsque la récolte est légèrement plus tardive. (<https://www.perspectives-agricoles.com/cultures-de-biomasse-zoom-sur-le-potentiel-methanogene-des-cive-@/view-3774-arvarticlepa.html>)

⁵⁷ A titre indicatif, le rapport de FranceAgriMer « Ressources en biomasse et méthanisation agricole : quelles disponibilités pour quels besoins ? » utilise une hypothèse de rendement moyen des CIVE de 20 t MB/ha soit 6 t MS à 30% de matière sèche plante entière. https://www.franceagrimer.fr/content/download/69402/document/RESSOURCES_EN_BIOMASSE_ET_METHANISATION_2022_-_Maquette_VF.pdf

⁵⁸ France Nature Environnement, 2021. Méthanisation : Etat des lieux de l'analyse des controverses. Dossier - Guide de référence – Propositions. <https://fne.asso.fr/publications/methanisation-etat-des-lieux-de-l-analyse-des-controverses>

4.8. Réduction de l'usage des engrais azotés de synthèse à l'horizon 2030 (Sylvie Recous)

- Éléments de contexte

En 2020, l'inventaire national des émissions françaises de GES⁵⁹ attribuée à l'agriculture 20,6% de ses émissions, soit 80,9 Mt CO₂e. Ces émissions se répartissent comme suit :

- Elevage : 49% ;
- Cultures : 38% ;
- Engins, moteurs et chaudières en agriculture/sylviculture : 13%.

L'agriculture est la contributrice majoritaire aux émissions nationales de N₂O (89,6%). Ces émissions sont principalement liées aux cultures, en particulier du fait de l'épandage de fertilisants azotés minéraux et organiques. La fertilisation minérale et organique est aussi une source d'émission d'ammoniac, qui représente dans certaines circonstances une perte d'azote considérable ainsi que des nitrates vers les aquifères. L'efficacité de l'azote apporté aux cultures, estimée à l'échelle des systèmes de culture européens, est estimée au maximum à 50% de l'azote apporté⁶⁰, ce qui signifie qu'il y a une marge de manœuvre importante en matière de réduction de la fertilisation apportée, grâce à la réduction des pertes d'azote. La fertilisation azotée minérale (engrais de synthèse) et organique (effluents d'élevage et déchets organiques) représentait 2 933 kt N total dont 2130 kt d'engrais minéraux et 701 kt d'effluents d'élevage en 2020⁶¹.

La présente note et les calculs associés, examinent cinq leviers possibles pour réduire l'usage des engrais minéraux de synthèse sans altérer les rendements (ou marginalement). La référence est l'année 2020 ; les objectifs ciblés par les politiques publiques et les potentiels de réduction estimés à travers des études scientifiques françaises, récentes, sont utilisés afin de calculer la réduction possible à l'horizon 2030. Le cumul des réductions de fertilisation azotée (2020 à 2030) n'est pas calculé, car la cinétique de réduction dépend des leviers actionnés.

- Augmentation de la SAU en Agriculture Biologique

L'AB représentait 9,5% de la SAU française en 2020, 2,55 M ha et 12% des agriculteurs, d'après les statistiques du Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire⁶². La stratégie « Farm to Fork » (Green Deal) de l'UE a pour objectif d'atteindre 25% de la SAU en agriculture biologique à l'horizon 2030⁶³. Les mesures d'incitation des agriculteurs sont prévues.

⁵⁹ CITEPA, 2022. Gaz à effet de serre et polluants atmosphériques. Bilan des émissions en France de 1990 à 2021. Agriculture et sylviculture, pp 391-412. Rapport SECTEN 2022. https://www.citepa.org/wp-content/uploads/Citepa_Rapport-Secten-2022_Rapport-complet_v1.8.pdf

⁶⁰ 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>

⁶¹ L'Observatoire ANPEA de la Fertilisation Minérale et Organique. <https://www.unifa.fr/statistiques-du-secteur/observatoire-anpea-de-la-fertilisation-minerale-et-organique>

⁶² AGRESTE, 2020. Chiffres et données n°9. Enquête pratiques culturales en grandes cultures et prairies 2017. Principaux résultats. Enquête pratiques culturales en grandes cultures et prairies 2017 - Principaux résultats (Version modifiée) | Agreste, la statistique agricole (agriculture.gouv.fr) ; Ministère de l'agriculture et de la souveraineté alimentaire (2021). [Transition agroécologique](#).

⁶³ Commission européenne, 2021. [Organic action plan](#).

Les travaux de prospective récents, menés par plusieurs équipes françaises et internationales, ont évalué le potentiel d'extension de l'AB à l'échelle européenne⁶⁴ ou mondiale⁶⁵, et quantifié et discuté les déterminants et freins biophysiques et techniques à cette extension. Au vu des résultats de ces travaux, nous avons retenu comme objectif d'extension maximal 40% de la SAU. La première et principale limitation de l'extension de l'agriculture biologique est la limitation de la disponibilité de l'azote, par suppression des apports d'azote de synthèse, mais aussi la spécialisation des territoires, conduisant à une déconnexion spatiale des ressources organiques (notamment effluents liés à l'élevage) et des besoins en azote organique (grandes cultures).

- **Objectifs**

Les deux scénarios d'évolution de la part de l'AB (base 2020) permettent de chiffrer les économies d'engrais azotés de synthèse générées, pour l'année 2030, exprimées en référence aux quantités d'engrais azotés utilisés en 2020 fournies par l'ANPEA⁶⁶. Cela permet aussi de chiffrer les quantités d'azote qui seraient nécessaires sous d'autres formes (fixation symbiotique, formes organiques) pour maintenir les rendements. *Les quantités cumulées d'azote de synthèse économisées sur la période 2020-2030 seront à estimer à en fonction des cinétiques d'adoption en réponse aux mesures mises en œuvre.*

- **Solutions**

L'extension de l'AB conduit à une évolution des systèmes de culture et des productions, liée en particulier à l'insertion accrue des légumineuses dans les rotations. Cela suppose aussi d'autres sources alternatives d'azote pour les cultures :

- (i) modification des réglementations en AB, notamment autorisation de l'usage des eaux usées et des effluents d'élevage même non AB ;
- (ii) maintien significatif de l'activité d'élevage, notamment les ruminants et couplage accru grandes cultures- élevage (co-localisation, approche « land sharing ») ;
- (iii) Réduction des gaspillages alimentaires, palliant les baisses de rendement observées avec l'AB.

- Réduction des pertes d'azote par volatilisation d'ammoniac des sources minérales (engrais de synthèse) et organiques (effluents d'élevage)

Le principal secteur émetteur de NH₃ est le secteur agricole, qui représentait en 2020 534,5 kt d'ammoniac (soit 440,1 kt N), soit 93% des émissions totales de NH₃ et 15% de la totalité des fertilisants azotés minéraux et organiques commercialisés et non commercialisés de l'année 2020⁶⁷. Au sein du secteur, en 2020, les principaux postes contribuant aux émissions sont la gestion des déjections bovines au bâtiment et au stockage (40% des émissions du secteur), l'apport d'engrais et d'amendements minéraux (26% des émissions du secteur), l'épandage d'effluents d'élevage au champ (19% des émissions du secteur). Les émissions restantes étant

⁶⁴ Billen G., Aguilera E. *et al.*, 2021. Reshaping the European agro-food-system and closing its nitrogen cycle : The potential of combining dietary change, agroecology and circularity. *One Earth*, **4**, 839–850. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.05.008>

⁶⁵ Barbieri P., Pellerin S., Seufert V. *et al.*, 2021. Global option space for organic agriculture is delimited by nitrogen availability. *Nat. Food*, **2**, 363–372 <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00276-y>

⁶⁶ L'Observatoire ANPEA de la Fertilisation Minérale et Organique. <https://www.unifa.fr/statistiques-du-secteur/observatoire-anpea-de-la-fertilisation-minerale-et-organique>

⁶⁷ Le Citepa réalise chaque année, pour le compte du Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, une série d'inventaires des émissions dans l'air de polluants et de gaz à effet de serre de la France. Le Citepa, publie un rapport didactique présentant les émissions de la France, leurs sources et leurs évolutions par rapport aux objectifs de réduction en vigueur. CITEPA (2021) Gaz à effet de serre et polluants atmosphériques. Bilan des émissions en France de 1990 à 2020. Agriculture et sylviculture, pp 367-388. Rapport SECTEN 2021. CITEPA (2021) Rapport NH₃ (Format Secten) 2020.

essentiellement liées à la pâture (16%)⁶⁸. La réduction de la volatilisation de l'ammoniac a un double enjeu en terme de qualité de l'air et de réduction des pertes d'azote pour les systèmes cultivés, et donc de bilan GES.

- **Objectifs**

- **Objectifs nationaux de réduction des émissions de NH₃** par le plan PREPA : -4% (2020 à 2024), -8% (2025 à 2029) et -13% à partir de 2030 définis par rapport aux émissions de l'année de référence 2005
- **Scénarios experts :**
 - Réduction des pertes NH₃ lors de l'épandage des engrais minéraux : substitution de formes chimiques, notamment dans les situations à risque (pH élevés), par substitution d'usage de l'urée et des solutions azotées à fort potentiel de volatilisation, (généralement formes d'engrais importées, mais moins chères), et remplacement par les engrais sous forme chimique ammonitrate (à faible potentiel de volatilisation); par différentes techniques au moment de l'apport (enfouissement, inhibiteur de l'uréase).
 - Réduction des pertes NH₃ liées aux effluents d'élevage : lors de l'épandage des effluents d'élevage, et bâtiment d'élevage par diverses mesures techniques.
- **L'étude prospective menée par l'ADEME (2013)**⁶⁹ a approfondi l'étude de cinq grandes pratiques liées aux effluents d'élevage (alimentation du bétail, bâtiment, stockage, épandage et pâturage) déclinées elles-mêmes en 36 modalités. Elle a travaillé sur trois types de scénarios dont nous utiliserons les deux extrêmes :
 - TA 100% (chaque pratique est prise indépendamment et atteint un taux de 100 % de son assiette technique en 2030); ce scénario conduit à une réduction de -47% de la volatilisation d'ammoniac en 2030.
 - TA MAX+ : les mesures ne sont pas considérées indépendamment les unes des autres, et les taux d'application tiennent compte des interactions notamment à l'épandage. Ce scénario est considéré comme une estimation du potentiel maximal national de réduction des émissions de NH₃. Il conduit à une réduction de -10% de la volatilisation d'ammoniac à l'horizon 2030.
- **L'étude prospective menée par le CITEPA et l'UNIFA (2018)**⁷⁰ porte sur les scénarios de réduction de la volatilisation des engrais minéraux de synthèse à l'horizon 2030, en considérant deux pratiques majeures liées aux engrais uréiques : d'une part l'enfouissement rapide post-épandage de l'urée et de la solution azotée sur les cultures de printemps, et d'autre part les inhibiteurs d'uréase pour l'urée. L'étude conclue que dans les scénarios tendanciels d'évolution des consommations d'azote sur 10 ans, et de l'augmentation observée de la proportion des formes urée et solution azotées dans la fertilisation totale, aucun scénario de développement maximal mais réaliste des techniques de réduction ne permet d'atteindre les objectifs de réduction du PREPA (-13% des émissions de NH₃). Seule la substitution au moins partielle de l'urée et de la solution azotée par des ammonitrates, combinée aux autres techniques de réduction, permet d'atteindre l'objectif PREPA (cf. chiffrage expertise INRAE).

⁶⁸ Les chiffres varient légèrement selon les documents Citepa consultés, pour l'année 2020

⁶⁹ Martin E., Mathias E., 2013. Analyse du potentiel de 10 actions de réduction des émissions d'ammoniac des élevages français aux horizons 2020 et 2030. [Synthèse](#). Ed ADEME, Angers, France, 14 pages .

⁷⁰ Durand A., Mathias E., 2018. Projection des émissions d'ammoniac liées à l'usage d'engrais minéraux à l'horizon 2030 et conséquences sur les objectifs de réduction des émissions de la France. Etude réalisée pour l'Unifa.

- **L'expertise sur les GES faite par l'INRA en 2013**⁷¹ a calculé le potentiel de réduction de la fertilisation azotée de synthèse en réduisant les pertes d'azote par volatilisation liée aux engrais azotés de synthèse et aux effluents d'élevage.

Pour les effluents d'élevage, le scénario proposé s'approche du scénario TA 100% de l'ADEME (assiette maximale technique permise par le succès des mesures à l'échéance 2030). Deux valeurs (minimales et maximales) accompagnent des valeurs moyennes, tenant compte des données relatives à la variabilité des émissions. Pour la substitution des formes d'engrais azotés, le scénario représente le potentiel maximal à savoir le remplacement des formes urée et solution azotée par la forme ammonitrate sur la totalité de l'assiette grandes cultures France. L'usage de ces formes entraîne généralement une augmentation de la dose d'azote apporté, recommandée par les outils d'aide à la décision, pour compenser le risque de pertes par volatilisation, cette augmentation est estimée à 10-15% sur céréales et 10 à 20% sur colza. On retient comme chiffre moyen, toutes situations confondues, une réduction possible de 15% de l'engrais azoté apporté (voir annexe action 1 du rapport INRA).

Pour l'année 2020, nous utilisons les statistiques de l'UNIFA sur la livraison des engrais minéraux de la campagne 2019-2020 : soit 797 484 tN sous forme ammonitrate (44,8%), 608 428 tN sous forme de solution azotée (34,2 %), et 374 010 tN sous forme d'urée (21,0%), avec l'objectif que 100% des formes solution azotée et urée, soient substituées en 2030 (le gain serait alors de 147 365 tN /an pour l'année 2030). Ce potentiel maximal serait à moduler de la proportion des sols agricoles à pH critique vis-à-vis de la volatilisation sur lesquels pourrait intervenir la réglementation.

- Solutions

Le Plan national de réduction des émissions de polluants atmosphériques (PREPA, adopté le 10 mai 2017 et couvrant la période 2017-2021) définit par secteur un certain nombre d'actions à mettre en œuvre pour atteindre les objectifs qu'il fixe pour les cinq polluants visés (dont le NH₃ ; voir éclairage du Citepa⁷²) : *Adoption d'un plan d'action ministériel visant à supprimer l'utilisation des matériels les plus émissifs en 2025 (dit plan matériels d'épandage moins émissifs ou PMEE) (pendillards, injecteurs) ou l'enfouissement des effluents, dans des délais adaptés, en distinguant les différents types d'effluents et leurs caractéristiques, ainsi que la nature et la taille des élevages, dans la perspective de supprimer l'utilisation des matériels les plus émissifs à l'horizon 2025* » (source : annexe de l'arrêté du 10 mai 2017 établissant le PREPA).

En complément, soutenir un accompagnement du secteur agricole via un guide des bonnes pratiques agricoles pour l'amélioration de la qualité de l'air, notamment conseillant les agriculteurs sur l'usage des formes d'engrais azotés : (i) Enfouissement des engrais à base d'urée après l'apport ; (ii) Apport d'inhibiteur d'uréase avec les engrais à base d'urée (coût) ; (iii) Interdiction de certaines formes d'azote sur sols à pH élevés. On peut imaginer des mesures plus contraignantes sur les formes apportées (l'ammonitrate est plus cher que les autres formes d'engrais).

⁷¹ Pellerin *et al.*, 2013. Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? Action 1 : Réduire le recours aux engrais azotés de synthèse, en les utilisant mieux et en valorisant plus les ressources organiques (<https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/fca5a7a52c8f363553b99654d5bae121.pdf>) ; Action 2 : Accroître la part de légumineuses en grande culture et dans les prairies temporaires pour réduire les émissions de N₂O (<https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/23af2fb2c2a17d9f14f48e4fbae67734.pdf>). Recous S., Jeuffroy M.-H. *et al.*, 2014. Réduire le recours aux engrais azotés de synthèse : quel potentiel et quel impact sur les émissions de N₂O à l'échelle France ? Innovations Agronomiques 37, 11-22. <https://www6.inrae.fr/ciag/Revue/Volumes-publies-en-2014/Volume-37-Juillet-2014>

⁷² UNIFA, CITEPA (2018) Objectifs PREPA : Exercices de projection des émissions d'ammoniac liées à l'usage d'engrais minéraux à l'horizon 2030 et conséquences sur les objectifs de réduction des émissions de la France. [SYNTHÈSE](#) . 8 pages.

Une prospective menée par le ministère de l'agriculture sur les matières fertilisantes d'origine résiduaire (MAFOR)⁷³ à l'horizon 2035 souligne que les MAFOR assurent environ 20% des besoins azotés des plantes, que quel que soit le scénario d'évolution des cheptels, l'offre de MAFOR diminue d'ici 2035 par rapport à la situation actuelle, ce qui indique de faibles marges de manœuvre, et au sein des leviers de politique publiques, les pratiques d'épandage.

- Réduction de la dose d'engrais azoté par renforcement du pilotage de la fertilisation azotée

La réduction de la dose totale d'azote aux cultures est possible par la généralisation de la démarche du bilan d'azote minéral et le pilotage de la fertilisation en cours de culture, par la réduction de la fertilisation associée à la réduction des intrants phytosanitaires (Plan Ecophyto), par une meilleure prise en compte de la valeur fertilisante des produits organiques. Ces leviers techniques sont bien connus mais encore relativement peu adoptés par les agriculteurs. Par exemple l'enquête *Pratiques culturales 2017* indique que 40 à 60% des surfaces en grandes cultures sont encore fertilisées « à la dose habituelle » c'est-à-dire sans utiliser une méthode de bilan d'azote minéral ou un pilotage en cours de culture⁷⁴.

• Objectifs

- **La stratégie « Farm to Fork »** : la Commission européenne prévoit une réduction d'au moins 20% de l'usage des engrais minéraux de synthèse pour 2030. *La compatibilité avec le maintien de la production agricole est contestée par les milieux professionnels*⁷⁵.
- **L'expertise sur les GES faite par l'INRA en 2013**⁷⁶ a estimé le potentiel d'atténuation possible à l'horizon 2030, permis par le déploiement de ces leviers sur les surfaces agricoles concernées par chaque technique (voir Action 1), sans perte de rendement ou avec une diminution de rendement < 5% (ce qui était le cahier des charges de l'étude). Au sein de plusieurs leviers, nous retenons les actions chiffrées suivantes :
 - Réalisme du rendement espéré en grandes cultures : baisse de l'objectif de rendement utilisé dans le calcul de la dose prévisionnelle (-19,7 kg N/ha/an en moyenne (14,8-29,4) sur 11,7 Mha).
 - Ajustement des dates d'apport aux besoins des cultures : report du premier apport sur cultures d'hiver quand le reliquat azoté sortie hiver est > 50 kg N/ha. : (- 15 kg N/ha/an sur 0,5 à 3 Mha)
 - Réduction de la fertilisation azotée associée à la réduction des intrants phytosanitaires (Plan Ecophyto, scénario 'protection intégrée') : -10,3 kg N/ha/an en moyenne (8,1-12,4) sur 12,1 Mha
 - Meilleure prise en compte de l'azote organique dans le calcul du bilan : -4,8 kg N/ha/an en moyenne (4,2-5,4) sur 12,0 Mha

⁷³ Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire (2022). Prospective des matières fertilisantes d'origine résiduaire (MAFOR) à l'horizon 2035. Centre d'études et de prospective Analyse N° 176 - Juin 2022.

⁷⁴ AGRESTE, 2020. Chiffres et données n°9. Enquête pratiques culturales en grandes cultures et prairies 2017. Principaux résultats. [Enquête pratiques culturales en grandes cultures et prairies 2017 - Principaux résultats \(Version modifiée\) | Agreste, la statistique agricole \(agriculture.gouv.fr\)](#)

⁷⁵ Commission européenne, 2022. Stratégie " Farm to Fork " . <https://www.consilium.europa.eu/fr/policies/from-farm-to-fork/>

⁷⁶ Pellerin *et al.*, 2013. Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? Action 1 : Réduire le recours aux engrais azotés de synthèse, en les utilisant mieux et en valorisant plus les ressources organiques (<https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/fca5a7a52c8f363553b99654d5bae121.pdf>) ; Action 2 : Accroître la part de légumineuses en grande culture et dans les prairies temporaires pour réduire les émissions de N2O (<https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/23af2fb2c2a17d9f14f48e4fbae67734.pdf>). Recous S., Jeuffroy M.-H. et al., 2014. Réduire le recours aux engrais azotés de synthèse : quel potentiel et quel impact sur les émissions de N2O à l'échelle France ? Innovations Agronomiques 37, 11-22. <https://www6.inrae.fr/ciag/Revue/Volumes-publies-en-2014/Volume-37-Juillet-2014>

Le potentiel de réduction de fertilisation azotée et les surfaces concernées (assiette) sont présentés dans le rapport et ses annexes, et rapporté dans le tableau.

- Solutions

Le raisonnement de la fertilisation est encadré régionalement par les Groupes Régionaux d'Expertise Nitrates (GREN) , placés sous l'autorité des préfets de région, qui proposent les références techniques nécessaires à la mise en œuvre opérationnelle de certaines mesures du programme d'actions national qui s'applique dans les zones vulnérables dont le calcul de la dose prévisionnelle d'azote à apporter. Néanmoins les références utilisées sont le fruit de négociation entre les parties prenantes professionnelles, sous le contrôle de l'administration. Elles ne garantissent pas l'obtention de résultats en matière de réduction de la fertilisation. La mise en place de la stratégie *Farm to Fork* doit être l'occasion de réduire l'usage des fertilisants, la bonne gestion des pratiques permettant de réduire les pertes sans impacter la production végétale :

- Réduction de l'usage des engrais
- Formation des agriculteurs aux méthodes de raisonnement
- Bonus à l'utilisation d'outils de pilotage

- Augmentation de la SAU en légumineuses

Historiquement en France, les légumineuses étaient principalement cultivées pour la production de fourrages riches en protéines. Ces cultures étaient insérées dans les systèmes de polyculture-élevage en raison de leur rôle agronomique vis-à-vis de l'azote dans la rotation. Au début des années 1960, les surfaces en culture pure atteignaient en France 3,3 Mha et représentaient 17 % des terres arables. Au cours des 30 années suivantes, les surfaces de légumineuses ont diminué, pour atteindre des surfaces inférieures à 400 000 ha. Les légumineuses prairiales ont été progressivement remplacées par le maïs ensilage et les prairies de graminées monospécifiques, du fait de l'utilisation massive d'engrais azotés de synthèse, disponibles à prix attractifs. Cette évolution a concouru avec une évolution des systèmes d'alimentation des ruminants substituant progressivement le maïs ensilage et le tourteau de soja au foin et aux protéines de luzerne. Pourtant, ces cultures sont essentielles à l'accroissement de l'autonomie azotée des systèmes de culture et à la réduction en corollaire des intrants azotés (grâce à l'aptitude à fixer l'azote atmosphérique). Elles sont aussi essentielles à l'accroissement de l'autonomie protéique des élevages français, et au rééquilibrage de l'alimentation humaine entre protéines animales et végétales, en faveur des protéines végétales.

- Objectifs

La part actuelle de la SAU est très faible (environ 4%)⁷⁷.

Dans le cadre du plan protéines initié par l'état, l'objectif est d'atteindre 8% de la SAU en 2030. Avec un objectif de +40% des surfaces d'ici 2022

L'objectif visé à terme par les experts pour assurer la mise en œuvre des mesures agroécologiques (dont la réduction de la fertilisation azotée de synthèse et l'accroissement de la biodiversité végétale) est de 15% des

⁷⁷ Voisin A.-S., Guéguen J., Huyghe C., Jeuffroy M.-H., Magrini M.-B. *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**, 283-312. [ffhal-01005055v1f. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01005055v1/document](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01005055v1/document). Ministère de l'économie, des finances et de la souveraineté industrielle et numérique, 2021. Stratégie nationale sur les protéines végétales. <https://www.economie.gouv.fr/plan-de-relance/mesures/strategie-nationale-sur-les-proteines-vegetales>. Ministère de l'agriculture et de la souveraineté alimentaire. Bâtir notre souveraineté alimentaire en protéines végétales. <https://agriculture.gouv.fr/batir-notre-souverainete-alimentaire-en-proteines-vegetales>

surfaces en légumineuses. L'estimation réalisée par l'étude GES (2013)⁷⁸ sur les légumineuses comme levier d'atténuation a estimé le potentiel : augmentation des surfaces en légumineuses à graines en grande culture (Assise Maximale Technique – AMT de 1,3 Mha au détriment de 1/6 blé tendre, 2/3 orge et 1/6 colza => Suppression de la fertilisation et réduction de la fertilisation -33 kg N/ha pour la culture suivante) ; augmentation de la part des légumineuses dans les prairies temporaires (AMT 3,1 Mha ; -35 kg N/ha pour les prairies temporaires avec <20% de légumineuses ; -1 kg N/ha pour les prairies temporaires entre 20 et 40% de légumineuses).

- Solutions

La stratégie nationale sur les protéines végétales vise à améliorer de façon structurelle l'indépendance de la France dans la production de protéines végétales. Concrètement, cette mesure passe par :

- un soutien aux actions de recherche et innovation, pour mettre au point des solutions pertinentes d'un point de vue économique, environnemental et nutritionnel, qui soutiendront à moyen terme la dynamique lancée par le plan de relance ;
- un accompagnement des investissements matériels nécessaires à la fois chez les producteurs de grandes cultures et les éleveurs ;
- un appui à la structuration des filières de protéines végétales et aux investissements aval ;
- une aide à la promotion des légumineuses auprès des consommateurs.

4.9. Commerce international et cohérence offre/demande (C. Gouel)

Les scénarios de la SNBC3 sont élaborés sur la base d'hypothèses d'évolution de l'offre et de la demande, le commerce international assurant automatiquement l'équilibre entre les deux. Cette approche qui n'assure pas la cohérence entre offre et demande domestiques et qui n'explique pas les leviers d'action permettant d'atteindre ces objectifs crée des risques auxquels il faudra être attentif : **le risque de fuites de carbone et le risque de perte de compétitivité qui pourrait accentuer certaines évolutions de l'offre.**

En 2019, l'empreinte carbone de l'alimentation des Français est estimée à 153 Mt CO₂e, sans compter la déforestation importée (27 Mt CO₂e) selon les dernières données du SDES (2019), ce qui représente près de deux fois les émissions territoriales du secteur de l'agriculture (82 Mt CO₂e) et 25% de l'empreinte carbone totale de la France⁷⁹. La baisse de l'empreinte de l'alimentation de 1995 à 2019 (-9%) est soutenue par la baisse des émissions territoriales (-22%), mais est partiellement compensée par la **hausse des émissions importées (+15%)**. Les émissions importées représentent désormais 45 % de l'empreinte de l'alimentation en 2019 contre 36 % en 1995 selon le SDES. En particulier, des produits carnés comme la viande de volailles sont importés de manière croissante.

Cette tendance pourrait s'accroître si l'évolution de la consommation alimentaire des ménages n'accompagnait pas les transitions agricoles du scénario SNBC3. Les hypothèses concernant l'évolution de l'alimentation sont fortes. Elles supposent des politiques d'information des consommateurs (labels,

⁷⁸ Pellerin *et al.*, 2013. Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? Action 1 : Réduire le recours aux engrais azotés de synthèse, en les utilisant mieux et en valorisant plus les ressources organiques (<https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/fca5a7a52c8f363553b99654d5bae121.pdf>) ; Action 2 : Accroître la part de légumineuses en grande culture et dans les prairies temporaires pour réduire les émissions de N₂O (<https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/23af2fb2c2a17d9f14f48e4fbae67734.pdf>).

⁷⁹ Voir également : SDES, 2022. La décomposition de l'empreinte carbone de la demande finale de la France par postes de consommation : transport, alimentation, habitat, équipements et services, MTECT. https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2022-07/document_travail_59_decomposition Empreinte_carbone_juillet2022.pdf

campagnes d'information nutrition-santé, approvisionnement des collectivités) et une évolution importante de l'offre en produits alimentaires (industries agro-alimentaires, distribution, restauration collective, circuits courts) afin de maximiser les bénéfices santé, climat et environnement d'une transition alimentaire qui devrait concerner toutes les catégories socio-économiques⁸⁰. **Sans convergence des politiques publiques en matière de nutrition-santé et de transition agroécologique et climatique, il serait difficile de coordonner les transitions de la consommation et de la production d'ici à 2050 supposées par le scénario.**

Même s'il était possible d'assurer la cohérence de l'offre et de la demande domestiques, **la focalisation du scénario sur une réduction de l'inventaire national sans chiffrage concomitant de l'empreinte fait courir le risque que la réduction de l'inventaire se fasse par un transfert des émissions à l'étranger.** Etant donné que d'après l'OCDE l'agriculture de l'Union Européenne est plutôt moins intensive en émissions de GES que le reste du monde⁸¹, **une augmentation des importations ou une réduction des exportations européennes sont susceptible d'augmenter les émissions mondiales.** Le problème apparaît clairement dans le cas du marché de la biomasse-énergie pour lequel le scénario implique une très forte augmentation des importations françaises. Le précédent lié au problème de changement indirect d'usage des sols associé aux politiques de biocarburants devrait inciter à la prudence lorsque la décarbonation affecte fortement le commerce extérieur.

Indépendamment des considérations précédentes, un autre risque est celui de la perte de compétitivité qui dépendra des leviers mises en œuvre pour implémenter le scénario AMS. A l'exception de l'extension de l'AB⁸², la plupart des objectifs considérés sont susceptibles d'être coûteux pour les agriculteurs sans être réellement valorisés dans les prix par les consommateurs. Les atteindre nécessitera donc des mesures incitatives qui affecteront la compétitivité du secteur agricole. La compétitivité du secteur sera affectée différemment en fonction du type d'outils considérés (subventions, taxes ou réglementation) et de l'exposition international du secteur. Une perte de compétitivité accélérerait la diminution de l'inventaire nationale, mais au prix d'une empreinte plus élevée.

Il faut aussi noter que les évolutions du secteur agricole s'inscrivent dans le contexte plus général du paquet *Fit for 55* dont certaines composantes non-agricoles affecteront le secteur. Par exemple, la production d'engrais azoté est soumise au marché de quotas d'émissions européens et sera concernée par le mécanisme d'ajustement carbone à la frontière (CBAM⁸³) récemment voté. Cela devrait impliquer un renchérissement du coût des engrais produits dans l'Union Européenne au fur et à mesure que le plafond de quotas d'émissions sera réduit et un renchérissement similaire du coût des engrais importés en Europe du fait du CBAM. Etant donné que les engrais représentent 12% des coûts de production en grandes cultures en Europe⁸⁴, soit la principale source de coût variable (35% des coûts variables d'après le RICA en 2020), et que

⁸⁰ Nouveaux comportements alimentaires. Propositions d'actions pour une alimentation compatible avec des systèmes alimentaires durables. Avis 90 du Conseil National de l'Alimentation. <https://agriculture.gouv.fr/telecharger/130933>

⁸¹ Figure 1.4 dans OCDE (2022) Agricultural Policy Monitoring and Evaluation 2022: Reforming Agricultural Policies for Climate Change Mitigation.

⁸² Sous l'hypothèse qu'il existe une demande suffisamment élevée pour maintenir un prix élevé pour ces produits lorsque l'AB couvrira 25% de la SAU.

⁸³ <https://www.tresor.economie.gouv.fr/Articles/2022/03/21/council-agrees-on-the-carbon-border-adjustment-mechanism-cbam>

⁸⁴ https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_22_6564

la politique climatique européenne pourrait fortement augmenter leur prix⁸⁵, le risque que la production européenne soit beaucoup moins compétitive à l'exportation et à l'importation est grand. La compétitivité à l'importation pourrait être préservée par une extension du CBAM aux secteurs avals, mais celle-ci n'est pas actée et présenterait des difficultés pratiques très importantes.

En conclusion, **si des politiques similaires d'atténuation des émissions ne sont pas mises en œuvre à l'étranger, les éléments précédents pointent vers le risque d'une perte de compétitivité de l'agriculture européenne** qui, en l'absence de mesures de protection de type CBAM ou clause miroir, pourrait amener à une baisse de la production domestique au-delà de ce qui est discuté dans les scénarios et à des fuites de carbones, réduisant les bénéfices de ces politiques.

5. Conclusions

L'évaluation réalisée en vue d'un run 2 du scénario AMS de la SNBC3 repose sur plusieurs hypothèses 2030 qui semblent atteignables :

- **Niveau d'ambition 2030** : -26 % d'émissions nettes par rapport à 2015, ce qui correspond à un rythme de réduction de 2,1% par an de 2022 à 2030, un rythme un peu plus soutenu que la baisse observée depuis 2018 (1,8% par an) ;
- **Baisse des effectifs des cheptels bovins** compatible avec les tendances projetées d'ici à 2030 (Figure 6).

- En pointillés les effectifs de VL et de VA d'après les données d'Idèle jusqu'en 2021 et la projection qu'on peut en faire pour 2030 et jusqu'en 2050 à partir de la décapitalisation rapide observée depuis 2019 (- 70000 VL et -70000 VA /an soit - 1,8%/an).
- En traits pleins verts et jaunes, les scénarios que nous proposons pour SNBC2. Ceux-ci sont assez proches pour 2030 mais moins drastiques ensuite que la tendance actuelle, dont on peut penser qu'elle va s'amortir.

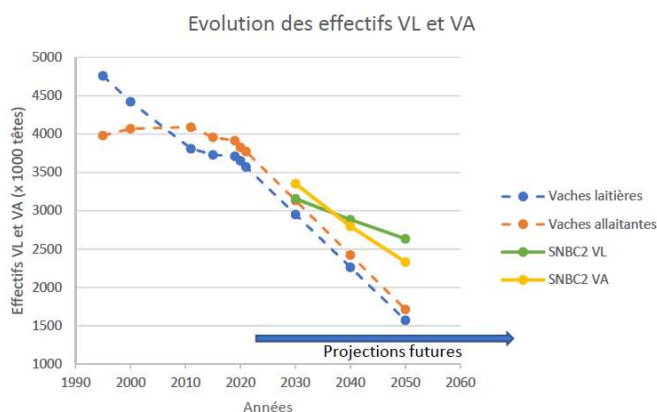


Figure 6. Comparaison des données observées et projetées pour les effectifs des cheptels de vaches laitières et de vaches allaitantes (Source : DGEC).

- **Transition des systèmes vaches laitières** vers l'utilisation accrue du pâturage avec réduction du maïs ensilage. Evolution initiale (2022-2030) plus lente, accélération après 2030. On considère que la réduction des cheptels laitiers et allaitants va permettre de disposer d'une ressource herbagère plus forte (la diminution de la superficie des prairies étant assez faible dans le scénario), ce qui moyennant la constitution accrue de stocks fourragers, permettra de pallier les effets des fluctuations climatiques. En revanche, l'ensilage de maïs deviendra progressivement trop coûteux et trop

⁸⁵ A 100 kg d'azote par hectare, un prix de la tonne de carbone à 100€ impliquerait une augmentation de coût de 60€ par hectare (Sustainable Finance Platform, 2022, The impact of carbon pricing : A financial sector perspective. <https://www.dnb.nl/media/x2mneebd/the-impact-of-carbon-pricing.pdf>).

irrégulier, accélérant ainsi la transition vers des élevages herbagers soutenus au plan économique pour leurs co-bénéfices (bien-être animal, biodiversité, stocks de carbone du sol).

Une **dynamique d'adoption plus lente initialement** concerne également :

- les CIVE (adoption fonction d'itinéraires techniques à maîtriser et dé-risquer, fonction également du développement de la méthanisation) ;
- les biocarburants de seconde génération (2G) : augmentation 2030 divisée par quatre, comparée à la période 2030-2050, la technologie de conversion étant encore peu mature.

Même si le groupe d'experts a cherché à mettre en cohérence les hypothèses proposées pour chaque thématique, la modélisation de ces hypothèses n'a pas été effectuée. Il faudra donc un certain nombre d'itérations pour créer un scénario cohérent en affinant si nécessaire les hypothèses proposées.

Les hypothèses proposées devraient non seulement être cohérentes au niveau national, mais aussi à trois autres échelles :

- **Cohérence régionale** : la spécialisation des régions agricoles (grandes cultures, élevage, etc.) rend bien plus difficile le bouclage du cycle de l'azote par des voies de recyclage des engrais organiques (issus principalement de l'élevage). La réduction des pertes d'azote, l'azote fixé par voie biologique par les légumineuses, l'utilisation de digestats de méthanisation ou de matières organiques d'origine résiduaire permet de disposer d'une palette d'outils pour atteindre un bouclage du cycle de l'azote dans chaque région. Néanmoins, le bouclage dans chaque région et pour chaque orientation des exploitations du bilan d'azote nécessitera des études complémentaires qui pourraient remettre en cause les hypothèses à l'échelle nationale.
- **Cohérence européenne** : dans le cadre du marché unique, de la PAC, de la loi climat (effort sharing), du paquet LULUCF, les échanges économiques et les réglementations européennes nécessitent de mettre en cohérence (à 2030 au moins) le scénario proposé avec les évolutions du secteur agricole dans les autres états membres de l'UE. Une étude serait également nécessaire à cet effet et elle pourrait conduire à remettre en cause un certain nombre d'hypothèses présentées.
- **Cohérence internationale** : afin d'éviter que la réduction de l'inventaire soit compensée par une augmentation de l'empreinte nationale, il serait important de chiffrer les 2 dimensions simultanément. Il faudra aussi identifier les leviers d'actions permettant d'atteindre les objectifs climatiques tout en maintenant la compétitivité du secteur agricole, afin d'éviter les fuites de carbone.

Enfin, les évolutions des rendements, en fonction de la fréquence des **chocs climatiques et de la disponibilité en eau**, sont incertaines. Cette incertitude sur une variable clé du secteur agricole crée une incertitude systémique sur l'ensemble des autres variables considérées. Il faut donc envisager une **variante du scénario SNBC3** représentant les risques pour les rendements d'une accélération de la fréquence et de l'intensité des chocs climatiques.

[Annexe. Tableau de synthèse. Hypothèses du scénario central à 2030 et 2050](#)

		2050 vs. 2020 (Ambition : -50 % GES Variation en %)	2030 vs. 2020 (Ambition : -21% GES Variation en %)	Notes
		Ambition 2030 en relatif vs. 2050 :	0.42	
Affectation des sols	Artificialisation	+0,3 Mha	+0.12 Mha	idem v1, réduction de tendance à -0.5% tous les 10 ans. Arrêt en 2040
	Prairies permanentes	-8	-3.4	Plus de PPs conservées (-8%), une partie des PPs fauchées pour biogaz
	Prairies temporaires	-0.54	-0.23	Accrus forestiers : 0,2 Mha; TCRs et cultures lignocellulosiques : 0,6 Mha.
	Accrus forestiers	+0,2 Mha	0.08	En cohérence évolutions cheptels (dont petits ruminants et équins), besoin de 0,8 à 1,2 Mha de prairies temporaires. Hypothèse : 1,2 Mha.
	TCRs et cultures ligno-cé	+0,6 Mha	0.25	
	SAU	-1%	-0.4	Moindre réduction SAU (-1%, conservation PPs et cultures ligno-cellulosiques).
Alimentation	Pertes et gaspillages	-50	-21	Gaspillage alimentaire d'environ 25% de la consommation finale en 2020. Diviser par deux. Cela réduit un peu la consommation
	Lait (VL)	-30	-13	Arbitrage ruminants (recyclages, biodiv.) vs. monogastriques : -40% pour toutes les viandes rouges,
	Viande (VA)	-40	-17	-20 % volailles (1 avis de rester à -40% pour volailles)
	Viande bovine (VA+VL)*	-36	-15	Produits laitiers (lait, beurre/fromages) : -20% (pour nutrition : plus de lait, moins de fromages)
	Porc	-36	-15	Œufs : pas de réduction
	Poulet	-20	-8	
	Céréales (complètes)	-10	-4	Protéines végétales : équilibre céréales complètes (ne pas les défavoriser) et protéagineux
	Fruits et légumes	+40	17	Fruits et légumes : +40% (5 fruits & légumes, 400 g conso/jour, eq. primaire le double) (NB. tensions avec réduction phyto.)
	Pommes de terre	-30	-13	
	Protéagineux	372%	Idem v1	
Effectifs cheptels				
	Cheptels vaches allaitantes	-42	-18	Favoriser vêlages précoces : moins d'animaux de renouvellement => moins de CH ₄
	Cheptels vaches laitières	-26	-11	Productivité laitière (NB. Bien-être animal et pâturage) +6% vs. +15% en v1
	Productivité laitière	6	3	
	Caprins	-40	-17	Caprins : -40% peu durable (euthanasie chevreaux), rôle spécifique entretien territoires
	Ovins	-10	-4	Monogastriques : poules pondeuses, pas de variation. -20% volailles de chair.
	Porcins	-30	-13	Porcins (alourdissement de carcasses a une limite)
	Poules pondeuses	0	0	Cf. œufs
	Volailles chair	-20 à -40	-8 à -17%	Cf. viande volailles
Alimentation animale				
	VLS système pâturé	260	54.6	Rythme lent initial
	VLS système maïs	-74	-15.5	Rythme lent initial
	VLS système mixte	-64	-13.4	Rythme lent initial
	Concentrés VLS	-24	-10.1	
	Concentrés VAs	-40	-16.8	
	Concentrés porcins	-30	-12.6	
	Concentrés volailles	-10	-4.2	
Cultures (superficies)				
	Maïs fourrages	-70	-14.7	Rythme lent initial
	Prairies artificielles	Idem run 1	Idem run 1	
	Protéagineux	Idem run 1	Idem run 1	
	Céréales et oléagineux	5.5	2.3	% augmentation, calcul superficie COPs cohérent avec autres évolutions de superficies prod. Végétales et SAU
Rendements COPs	Syst. Conventionnels	0.16% par an	0.16% par an	Mais variabilité inter-annuelle croissante. Suppose forte adaptation au changement climatique
	Variante chocs climatiques		-3% (hiver), -12% (été)	Chocs climatiques : cultures d'été diminuent plus que cultures d'hiver (conventionnel)
	Syst. Bio	70% conventionnel	60% conventionnel	Amélioration du bio et des sources N, P
Superficie systèmes	Fraction systèmes bio	Idem run 1	Idem run 1	
	Rendement moyen	-3	-1	Rendement moyen agrégation des systèmes conventionnels et bio
	Exportation céréales	19	A préciser	Réduction concentrés, augmentation superficie, faible baisse rendements. Calculs à affiner pour 2030
Cultures intermédiaires et CIVEs				
Superficie C.I.		10 Mha		Un peu plus que les 8.5 Mha du rapport INRA 2019, adaptation rotations, raccourcissement cycles culture
dont CIVE		4 Mha		40% de CIVE parmi les C.I. Plus faible que rapport France gaz renouvelable (50%)
Hypothèses stockage de carbone sol et biomasse				
	Agroforesterie intraparcellaire : idem v1.			
	Haies	1600 ha	670 ha	
	Stockage C sol	A calculer	A calculer	
Engrais N de synthèse selon objectifs politiques publiques				
	Extension agribio 25%	-330 ktonnes N		
	Mesures agro-écologiques et optimisation fert	-426 ktonnes N		
	Augmentation SAU en légumineuses	-128 ktonnes N		
	Réduction pertes volatilisation épandages N sy	-18 ktonnes N		
	Réduction pertes volatilisation N effluents d'élevage	-42 ktonnes N		
	Total : -985.6 ktonnes N de synthèse, soit -46%	-46	-19	Réduction pertes N en 2050 : 660 ktonnes, en 2030 : 204 ktonnes N (faire mieux si possible) NB. Forte priorité. Voir si on peut faire mieux que -19 dès 2030.
Bioénergies, biocarburants				
				Plus de moteurs essence. le jet fuel peut être obtenu à la fois à partir d'huiles végétales, mais aussi à partir de sucre/amidon et matières lignocellulosiques. Procédé alcohol-to-jet. Faible TRL néanmoins.
Biocarburants	Bioéthanol (4 TWh en 2020)	1 TWh	2.8 TWh	Stabilité vs. 2020. Forte demande biocarburants liquide, baisse demande valorisation co-produits. Certains scénarios excluent biodiesel au profit gaz renouvelable, H2 et électricité pour flottes camions en 2050.
Biocarburants	Biodiesel	30 TWh	30 TWh	
TCRs cultures lignocellulosiq	Biocarburants 2G	18 TWh	1.8 TWh	Rythme très lent initial
TCRs cultures lignocellulosiq	Biomasse énergie	12 TWh	1.2 TWh	Rythme très lent initial
Bois énergie hors forêt		Idem run 1		
Biomasse énergie	Résidus culture usages c	0	0	NB. Peu durable carbone du sol et émissions Nox !
Biogaz	Déjections animales	14 TWh	5.9 TWh	TOTAL Biogaz 78 TWh en 2050, 21 TWh en 2030. Majorité injection directe réseau
Biogaz	CIVEs	37 TWh	7.8 TWh	Rythme lent initial. Déploiement méthaniseurs, contraintes transports biomasses
Biogaz	Prairies extensives	5 TWh	1.2 TWh	Rythme lent initial
Biogaz	Résidus culture	13 TWh	2.7 TWh	idem v1, rythme lent initial
Biogaz	Déchets alimentaires	9 TWh	3.8 TWh	
Bouclage N				
(ktonnes N)		2020	2050	
fertilisation min		2135	1149	
fertilisation org		101	101	
effluents d'élevage		1252	813.8	1064
fixation symbiotique		520	1144	882
soja importé		260	130	185
effluents origine résiduaire		70	77	74
Total apports N		4338	3415	3958
Apports corrigés de la réduction des pertes		4065	4162	Bilan N semble à peu près équilibré. MAIS attention aux disparités entre régions et systèmes. Redistribuer N organique (dont digestats) est une problématique majeure dans ce scénario