



La biomasse : une énergie intermittente à horizon 2050 ? Mémoire de troisième année du Corps des Mines sur les usages de la biomasse provenant de l'agriculture et de la forêt

François Challet, Arthur Fourny

► To cite this version:

François Challet, Arthur Fourny. La biomasse : une énergie intermittente à horizon 2050 ? Mémoire de troisième année du Corps des Mines sur les usages de la biomasse provenant de l'agriculture et de la forêt. Sciences de l'environnement. 2023. <hal-04166035>

HAL Id: hal-04166035

<https://minesparis-psl.hal.science/hal-04166035v1>

Submitted on 19 Jul 2023

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

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



HAL Authorization

La biomasse : une énergie intermittente à horizon 2050 ?

Mémoire de troisième année du Corps des Mines
sur les usages de la biomasse provenant de l'agriculture et de la forêt

François Challet & Arthur Fourny

Juin 2023

Pilote : Pierre Couveinhes - Membre associé du Conseil Général de l'Économie



Coupe et récolte de luzerne - © Désialis

RÉSUMÉ

Biogaz, biocarburants, agro-granulés, bois-énergie ... les moyens de produire de l'énergie décarbonée à partir de biomasses agricole et forestière ne manquent pas. L'industrie et les transports, en particulier, se tournent massivement vers ces ressources pour atteindre la neutralité carbone en 2050.

Les quantités de biomasse à vocation énergétique sont pourtant limitées, d'une part par la disponibilité des terres et la stagnation des rendements, d'autre part par les autres usages prioritaires de la biomasse (alimentation humaine et animale, matériaux ...). Les études prospectives comparant les estimations de demande et d'offre mettent ainsi en exergue le **problème de bouclage de la ressource** et la nécessité des arbitrages à venir.

Nous sommes convaincus que les approches de la biomasse énergie comportent encore un **angle mort majeur**, en oubliant que **la biomasse agricole est une ressource fortement variable**.

Il est bien connu du monde agricole qu'une production qui repose sur le vivant est irrégulière. Ces fluctuations vont par ailleurs s'accroître drastiquement avec le **changement climatique**, à cause de l'augmentation des températures et de la multiplication des aléas météorologiques et des événements extrêmes (printemps trop doux ou trop secs, gel tardif, trop fortes précipitations, sécheresses pluriannuelles, etc ...).

Dans ces conditions, les productions agricoles énergétiques (cultures dédiées et intermédiaires, résidus de culture, herbe des prairies...), à l'usage non prioritaire par rapport à l'alimentation, seront très fortement variables d'une année à l'autre. En particulier, le gisement essentiel des cultures intermédiaires sera très sensible aux conditions météorologiques, du fait de sa croissance concentrée dans une courte période. D'une année à l'autre, sa production méthanisée pourrait varier d'un facteur 3 et **la production totale de biogaz en France en 2050 pourrait connaître une variabilité interannuelle de l'ordre de 40%**.

Sans la mise en place de stratégies de résilience ad hoc, de nombreux risques pèseront sur le système agro-énergétique en cas de tension sur la ressource : multiplication des conflits d'usages, production alimentaire menacée, risque pour la survie économique des acteurs les plus faibles et risque de pénurie à l'échelle nationale.

Les **contrats** entre producteurs, transformateurs et consommateurs de biomasse seront clés pour créer de la confiance malgré les incertitudes de production. L'**État**, lui, devra jouer un **rôle de garant** et apporter le soutien nécessaire face aux crises, quitte à prendre un **rôle d'arbitre** et intervenir localement, par exemple via les cellules biomasse régionales, pour trancher le partage de la ressource en situation extrême.



Nous remercions notre pilote, Pierre Couveinhes, pour son suivi rapproché tout au long de l'année, pour ses conseils avisés et les méthodes de travail proposées.

Nous remercions les membres de la commission des travaux personnels du Corps des Mines pour leurs conseils bienveillants.

Nous remercions les membres du groupe 10 du rapport sur commande de la promotion Guillaume Apollinaire de l'INSP pour leur motivation, leur implication et leur confiance lors de la période du travail commun.

Nous remercions enfin toutes les personnes ayant accepté d'échanger avec nous lors des nombreux entretiens menés au cours de ce travail de mémoire.



TABLE DES MATIÈRES :

RÉSUMÉ	2
INTRODUCTION	5
I. Le problème de bouclage de la biomasse énergie : une demande en forte croissance pour une ressource limitée	5
A. Les usages actuels de la biomasse française et la place de la biomasse énergie	6
B. Un problème de bouclage	7
C. Une mission Corps des Mines - Institut National du Service Public pour évaluer le potentiel de trois gisements: le bois énergie, le report des terres d'élevage et les cultures intermédiaires	8
II. La biomasse énergie : des gisements de ressource primaire fortement variables à horizon 2050	11
A. En quoi le réchauffement climatique va-t-il impacter la production de biomasse?	11
B. Parmi les gisements de biomasse jusqu'ici évoqués, lesquels sont variables d'une année à l'autre?	13
C. Retour sur la variabilité des cultures intermédiaires	15
D. La variabilité des résidus et des prairies peut être quantifiée à partir des données actuelles	17
E. Face à cette variabilité, quels usages voudra-t-on stabiliser? Estimation de la demande en fourrages en 2050.	20
F. Implications et limites	21
III. La biomasse, une énergie intermittente particulière à horizon 2050	22
IV. La forte variabilité de la ressource fait peser de lourds risques économiques et techniques sur le système de biomasse énergie, aujourd'hui largement sous-estimés	25
A. Comprendre les dynamiques des prix	25
B. Les différentes composantes du système agro-énergétique sont fortement exposées au risque de variabilité de la quantité disponible de matière première	28
V. Bâtir la résilience du système agro-énergétique pour prévenir la variabilité et limiter ses impacts	32
A. Des solutions inspirées du monde agricole	33
B. L'énergie et l'électricité : deux secteurs inspirants dans la gestion de l'intermittence et la sécurisation des approvisionnements	36
C. Le rôle de l'Etat dans la résilience : garantir les bonnes conditions de marché	44
VI. Réagir face à un risque de pénurie, les leviers pour passer la crise	47
A. Les leviers du monde agricole	48
B. L'inspiration du monde de l'électricité et de ses leviers pour empêcher le black-out	50
C. Un nouveau cadre de pensée : le risque de pénurie comme péril commun	53
D. Le rôle de l'Etat dans la gestion de crise : une gouvernance plus interventionniste	54
CONCLUSION	56
ANNEXE : Liste des visites et entretiens effectués hors mission collective INSP- Corps des Mines	57
BIBLIOGRAPHIE	59



INTRODUCTION

Ce rapport fait suite à un premier rapport rendu en février 2023 suite à une commande de la Direction Générale de la Performance Environnementale du Ministère de l'Agriculture (BACHMANN et al. 2023). Dans le cadre de la troisième Stratégie Nationale Bas Carbone, en cours d'élaboration, l'un des principaux défis à relever est le bouclage de la ressource en biomasse. En effet, celle-ci est considérée par beaucoup d'acteurs comme une variable d'ajustement qui pourrait permettre de décarboner les usages qui ne seront pas électrifiés. Cependant, la faisabilité et les conséquences d'une production et d'une mobilisation accrue de biomasse sont aujourd'hui incertaines. Les premiers travaux effectués par la Direction Générale de l'Energie et du Climat et par le Ministère de l'Agriculture évoquent un manque de 100 TWh/an en biomasse-énergie à l'horizon 2050. **La plupart des travaux actuels cherchent à résoudre ce décalage entre besoin et demande futurs, mais laissent pour l'instant de côté la question de la variabilité interannuelle de production de biomasse.**

Or la biomasse repose sur une production biologique, vivante, qui est soumise à des variations et aléas bien différents des autres formes d'énergie. Notre thèse est ici de montrer que, **sous l'effet du dérèglement climatique d'une part, et de par les interactions entre acteurs et usages de la biomasse d'autre part, la biomasse mobilisable pour produire de l'énergie variera considérablement d'une année à l'autre.**

Nous développons donc dans ce rapport l'idée d'une « **biomasse intermittente** » afin d'interpeller les acteurs énergéticiens et industriels qui à l'heure actuelle sous-estiment cet enjeu et leur permettre dès maintenant d'**intégrer des solutions de résilience face à la variabilité** telles que celles que nous détaillons dans ce rapport. En revanche, nous ne tirons pas ici la sonnette d'alarme pour tenter de freiner le recours à la biomasse en remplacement des énergies fossiles. A l'issue d'un an de recherches sur le sujet et de plus d'une centaine d'entretiens avec des parties prenantes de l'intégralité de la chaîne de valeur, nous sommes convaincus que ce changement doit avoir lieu. Il est pertinent pour la transition écologique et énergétique et a le potentiel de revaloriser les secteurs agricoles et forestiers. Simplement, afin d'éviter l'écueil de conflits d'usages et de risques potentiels de pénuries dans un proche futur, ce développement doit avoir lieu de manière pertinente par rapport aux ressources en biomasse des territoires et des autres usages locaux qui en sont faits, tout en intégrant la variabilité que nous analysons dans la suite.

I. Le problème de bouclage de la biomasse énergie : une demande en forte croissance pour une ressource limitée

A. Les usages actuels de la biomasse française et la place de la biomasse énergie

Avant de s'intéresser en détail aux applications énergétiques de la biomasse, il convient de replacer cet usage dans le panorama plus large des utilisations de la biomasse et de connaître les bons ordres de grandeur. Pour pouvoir comparer facilement des matières premières très différentes (bois, fumier et colza par exemple), le schéma suivant est présenté en millions de tonnes de matière sèche (Mt MS).

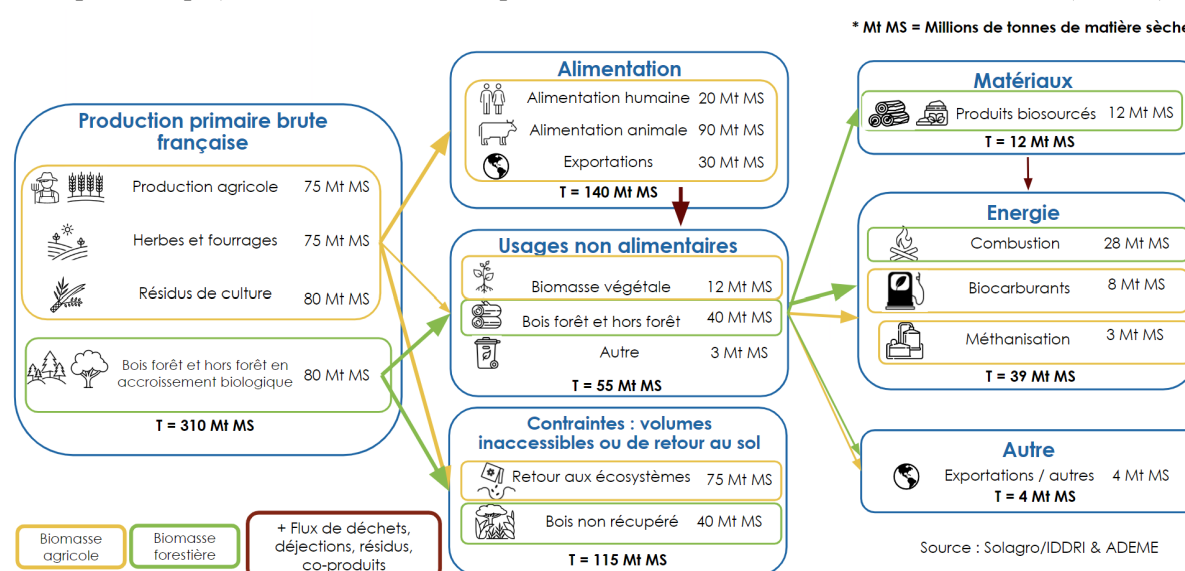


Figure 1 : Panorama simplifié des usages de la biomasse primaire produite en France en 2022 d'après (AUBERT et al. 2023).

Il est ainsi possible de constater que la biomasse primaire produite en France provient pour $\frac{3}{4}$ de l'agriculture : les récoltes de fruits et légumes et de céréales pour un quart, l'herbe et les fourrages des prairies pour un autre quart, et un dernier quart provenant des résidus de culture (ce qu'il reste une fois les grains de céréales récoltés). Le dernier quart provient enfin de l'accroissement forestier annuel, en forêt ou hors forêt.

En termes d'usages, un gros tiers de cette biomasse produite est à destination de l'alimentation, par ordre décroissant de volumes : l'alimentation animale, les exportations, et l'alimentation humaine sur le territoire national. Un tiers de la biomasse primaire n'est pas exploité, il s'agit à la fois de la biomasse inaccessible (forêts en montagne par exemple), et de la biomasse qui retourne au sol pour l'amendement organique (une biomasse non « exploitée » en tant que tel donc, mais qui a une utilité certaine). Il reste enfin 20% de la biomasse primaire qui est destinée à des usages non alimentaires.

Parmi ces usages non alimentaires, on compte environ 20% de biomatériaux et 80% de biomasse énergie (au total, la biomasse destinée à produire de l'énergie représente donc seulement 12.6% de la biomasse primaire française à l'heure actuelle). Cette dernière est majoritairement composée du bois-énergie, la première énergie renouvelable française pour les usages de combustion (avec quelques usages de combustion de matière première agricole marginaux : chaudières à paille, agro-granulés, etc). Enfin, on trouve deux usages d'utilisation énergétique de la biomasse agricole : les biocarburants et la méthanisation (cette dernière étant en forte croissance).

B. Un problème de bouclage

Ces usages non-alimentaires et en particulier énergétiques ont aujourd'hui le vent en poupe. Face à l'objectif (et à la nécessité) d'atteindre la neutralité carbone en 2050, les stratégies de décarbonation de l'économie ne peuvent s'appuyer que sur une poignée de leviers. Le plus utilisé est l'électrification des usages, en s'appuyant sur une production électrique peu émissive en gaz à effet de serre (énergie nucléaire, énergies renouvelables électriques). Pour certains usages, cependant, en particulier la production de chaleur et de carburants, d'autres leviers sont nécessaires pour s'émanciper de l'usage massif des énergies fossiles. **Parce qu'elle capte pendant sa production le carbone qu'elle émettra lors de son utilisation, la biomasse est considérée comme une variable d'ajustement idéale pour répondre à ce problème.**

On ne discutera pas ici en détail du bilan carbone de l'utilisation de la biomasse pour produire de l'énergie. Cette question est cependant complexe puisque le carbone émis lors de la combustion aurait pu ne pas être émis du tout et mettra des mois ou des années avant d'être séquestré à nouveau. Plutôt que de considérer la biomasse comme neutre en carbone, il semble donc plus juste de prendre en compte un « temps de retour carbone », qui induit un effet de serre additionnel du fait de l'excédent temporaire de dioxyde de carbone dans l'atmosphère.

La sortie des énergies fossiles impliquera néanmoins une demande accrue de biomasse pour de nombreux secteurs, comme illustré sur la figure 2. Les premiers travaux menés par la Direction Générale de l'Energie et du Climat pour la préparation de la prochaine Stratégie Nationale Bas Carbone évoquent une croissance de la demande en biomasse énergie de 170 TWh/an en 2020 à 370 TWh en 2050.

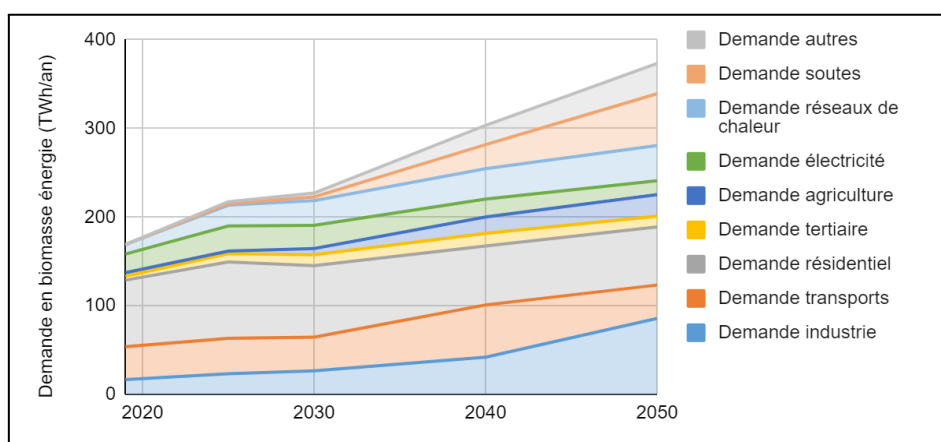


Figure 2 : Demande projetée des différents secteurs en biomasse-énergie pour la prochaine SNBC (scénario « Avec mesures supplémentaires », document de travail de la DGEC).

Face à cette demande en hausse, l'offre devrait rester plus limitée. Les terres exploitables pour produire de la biomasse (surfaces agricoles et forestières) sont limitées et, pour certaines, menacées par l'artificialisation, malgré les politiques nationales mises en place pour réduire cette tendance. Parallèlement, les rendements agricoles stagnent depuis une vingtaine d'années, alors que les progrès apportés par la mécanisation agricole et les engrais azotés s'essouffent et que de nombreuses terres agricoles se dégradent. Les effets du réchauffement climatique commencent aussi à se faire sentir ; cette question sera au cœur de ce rapport.

En conséquence, les travaux en cours de la DGEC, du SGPE et de l'essentiel des acteurs proposant des scénarios prospectifs de décarbonation se heurtent à ce défi de la réconciliation entre l'offre et les besoins en biomasse, qui constitue l'un des principaux problèmes de « bouclage ».

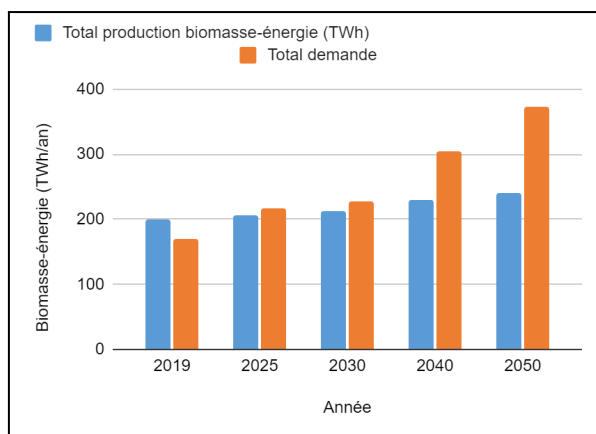


Figure 3 : Comparaison offre-besoins en biomasse-énergie (scénario « Avec mesures supplémentaires », document de travail de la DGEC).

Des leviers existent toutefois pour trouver davantage de biomasse afin de combler cette différence entre l'offre et la demande : tenter de produire plus de biomasse de manière durable (cultures dédiées à la biomasse, cultures intermédiaires, etc ...), trouver de nouveaux gisements (déchets de bois traités, biomasse de l'étranger, algues ...), changer les habitudes alimentaires (diminuer la consommation de viande et donc la part de biomasse destinée à l'alimentation du cheptel, réduire les exportations ...), augmenter l'accessibilité à la biomasse non récoltée (gisement peu prometteur en ce qui concerne les retours au sol, essentiels pour l'agronomie), ou enfin prioriser les usages finaux de la biomasse et avoir recours autant que possible à la sobriété sur la ressource.

La partie suivante évoque le cas de trois gisements particulièrement prometteurs pour résoudre le sujet du bouclage, qui ont été analysés par la mission collective Corps des Mines / Institut National du Service Public.

C. Une mission Corps des Mines - Institut National du Service Public pour évaluer le potentiel de trois gisements: le bois énergie, le report des terres d'élevage et les cultures intermédiaires

Pendant une durée d'un mois, nous avons travaillé en commun avec 11 élèves-fonctionnaires de l'Institut National du Service Public (INSP), en réponse à une commande du Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire (MASA). Celle-ci nous demandait d'analyser le potentiel de trois gisements prometteurs pour une production de biomasse additionnelle, et d'anticiper les potentiels conflits d'usage que leur développement pourrait susciter. D'abord le cas d'un gisement à mieux mobiliser, **la forêt**, pour répondre à la demande croissante en bois énergie. Ensuite le cas d'un gisement à reconfigurer, avec le **report d'usage de sols et de biomasse aujourd'hui dédiés à l'élevage**. Enfin, celui d'un gisement à développer : **les cultures intermédiaires**.

En ce qui concerne la valorisation énergétique de la biomasse forestière, malgré des objectifs ambitieux d'accroissement du bois-énergie inscrits dans la SNBC (« Stratégie Nationale Bas-Carbone » 2015), ceux-ci n'ont pas été atteints ces dernières années pour plusieurs raisons structurelles (DE RAVIGNAN et al. 2021). Pourtant, suite à l'interdiction des chaudières au fioul, le recours au chauffage au bois a explosé. Celui-ci repose entre autres sur les granulés produits à partir des coproduits de scieries. Par ailleurs, l'État soutient depuis plusieurs années l'installation de réseaux locaux de chaleur alimentés par la biomasse, et plus récemment l'installation en entreprises pour décarboner leur source d'énergie. Leur demande accrue dans le contexte de la guerre en Ukraine a mené à un doublement des prix, conduisant le gouvernement à mettre en place une aide financière exceptionnelle pour les particuliers. Le rapport s'est intéressé aux adaptations structurelles nécessaires pour permettre à la filière bois-énergie française de répondre à cette demande croissante, en tenant compte de la hiérarchie et complémentarité d'usages déjà établies entre bois-matériau et bois-énergie et de la nécessaire garantie de gestion durable forestière.

Par ailleurs, en partant du constat que 64% de la surface agricole utile française est destinée à l'alimentation animale (JOUVEN et al. 2018), la mission collective a cherché à estimer les conséquences, à la fois économiques et en biomasse disponible (agricole et forestière), d'un recul de l'élevage en France. L'élevage français est en effet en crise, et la tendance de recul observée (3% par an ces dernières années (« Vaches allaitantes - La baisse du cheptel est plus importante que prévu - Élevages bovins lait et viande, Tendances des marchés » 2023)) pourrait être alimentée par le non-renouvellement des éleveurs ou les changements d'habitudes des consommateurs. Sans se positionner sur le principe d'un recul de l'élevage, la mission s'est intéressée aux possibles reports d'usages des sols et de la biomasse libérés en prenant pour acquises les tendances observées actuellement.

Enfin, le rapport s'est intéressé au potentiel de développement des cultures intermédiaires. Celles-ci peuvent présenter des atouts multiples : piège à nitrate, capture de carbone, préservation des sols et de la biodiversité, production de biomasse supplémentaire sans conflit avec les usages alimentaires. En effet, ces cultures peuvent s'insérer dans les rotations sur des sols qui étaient jusque-là laissés à nu, souvent en hiver, et parfois à la fin de l'été. La mission collective a analysé la faisabilité technico-économique de leur développement et a évalué les mesures à mettre en place pour le favoriser. L'enjeu étant d'assurer un revenu associé juste pour les agriculteurs et d'arbitrer sur les usages de la biomasse ainsi produite entre notamment : les retours au sol, la production de fourrages contribuant à l'alimentation du cheptel et la production de biogaz par méthanisation.

Le rapport de la mission collective est disponible en annexe du présent document. Il détaille notamment de nombreuses mesures de politiques publiques afin d'accompagner le développement des trois gisements tout en minimisant les conflits d'usage.

En guise de synthèse, voici une comparaison de l'évaluation du potentiel des trois gisements susmentionnés par la mission collective, en comparaison des scénarios de référence des acteurs du secteur.

TWh, projections de l'offre de certaines biomasses énergie en 2050	Situation de référence en 2020	SNBC 2	Ademe Transition(s) 2050 - S3 Technologies vertes	Solagro Afterres	France Stratégie	Analyse post-mission collective
Offre de bois énergie (forêt et hors forêt)	154	200	194	228	163	170-180 TWh Augmentation raisonnée des prélèvements et incertitude sur l'agroforesterie
Offre d' herbe et cultures fourragères méthanisées	0	15	15	13	10	5-10 TWh 45 TWh est irréaliste économiquement et techniquement.
Offre de cultures intermédiaires méthanisées	0	63	47	44	43	Jusqu'à 40 TWh (avec 3 Mha à rendement moyen de 6 TMS/ha). Essentiellement des CIVE d'hiver .
Autres types de biomasse énergie	46	156	79	86	91	
Projections de l'offre totale en biomasse énergie agricole et forestière à horizon 2050	201	433	335	371	307	

Tableau 1 : Comparaison de l'évaluation du potentiel des trois gisements analysés par la mission collective avec l'évaluation des principaux scénarios de référence du secteur.

Notre évaluation du potentiel du bois énergie provient de l'excellente analyse réalisée par Julien Fosse et Ilyas Mourjane pour France Stratégie (MOURJANE et FOSSE 2022). De nombreux scénarios plus ou moins volontaristes sur la mobilisation de la forêt ou à l'inverse sur la préservation du puits de carbone y sont analysés, et nous retenons ici une vision moyenne qui tient compte des recommandations du rapport permettant de lever des verrous qui ralentissent l'exploitation forestière. Nous avons également des hypothèses moins optimistes que Solagro sur le possible développement massif de l'agroforesterie, suite aux contraintes techniques évoquées par les acteurs terrains que nous avons interrogés.

En ce qui concerne notre évaluation du potentiel de l'herbe et des fourrages, les calculs économiques de la mission, repris dans le rapport, ont montré que la méthanisation d'une prairie ne permet de dégager qu'une petite moitié de ce que rapporte son exploitation comme pâturage pour des vaches laitières. Nous restons donc prudents sur la réalité technico-économique de la mobilisation des prairies pour les usages énergétiques.

Enfin, pour l'évaluation du gisement de cultures intermédiaires à vocation énergétique, nous prenons l'hypothèse d'un rendement moyen de 6 tMS/ha (en supposant une fertilisation par digestat, des cultures intermédiaires appropriées) et une surface de l'ordre de 3 Mha (avec seulement 45% du potentiel total des cultures intermédiaires méthanisées, essentiellement des CIVE d'hiver, pour garantir les retours au sol et les usages fourragers). Cela donne un potentiel de 40 TWh, mais l'atteinte de cet objectif ne sera possible qu'avec un fort soutien à la R&D et des incitations financières comme les paiements pour services environnementaux proposés dans le rapport.

Evaluation des potentiels de gisement de biomasse énergie à horizon 2050 : l'illusion des valeurs moyennes

Un point frappant du tableau ci-dessus, outre les différences marquées d'évaluation des gisements qui proviennent de positions diverses des acteurs sur des hypothèses fortes, est le fait que **le débat porte sur l'estimation de valeurs moyennes à horizon 2050**. Pour nous, ces valeurs moyennes donnent une vision illusoire et biaisée des gisements de biomasse énergie et masquent la réalité de la disponibilité de ces gisements. En effet, comme nous allons le montrer dans la suite de ce rapport, ces gisements qui intéressent tant d'acteurs aujourd'hui seront fortement variables d'une année à l'autre à horizon 2050, en particulier à cause des évolutions climatiques.



II. La biomasse énergie : des gisements de ressource primaire fortement variables à horizon 2050

A. En quoi le réchauffement climatique va-t-il impacter la production de biomasse?

Les agriculteurs parlent sans cesse de « bonnes » et de « mauvaises » années et scrutent la météo en permanence. Et pour cause : c'est bien celle-ci qui détermine à quelle date ils devront semer, faucher, moissonner... et quel sera le volume et la qualité de la récolte. Notre étude de cas dans le Grand-Est a permis de mettre en évidence les conséquences des sécheresses de 2022 pour plusieurs agriculteurs ou éleveurs. Bruno Faucheron, éleveur bovin en agriculture biologique engagé dans une démarche d'autonomie protéique, explique ainsi avoir eu exceptionnellement recours à des importations pour nourrir son cheptel afin de compenser les fauches trop faibles de l'été (FAUCHERON 2023).

Les experts du GIEC soulignent que de telles sécheresses seront amenées à se reproduire dans les décennies à venir. Cette aggravation des sécheresses ne s'accompagne cependant pas dans toutes les régions d'un recul des précipitations annuelles moyennes, ce qui souligne une forte variabilité interannuelle (IPCC 2021) : les précipitations pourraient devenir de plus en plus irrégulières avec une alternance entre des précipitations plus fortes et de longues phases sans pluie. Pour les agriculteurs, cela impliquera très probablement des rendements de plus en plus variables d'une année à l'autre, conséquences d'événements météorologiques de natures diverses, les grêles, gelées de printemps ou excès d'humidité favorisant les maladies venant s'ajouter aux risques de sécheresses.

Cette question a en particulier été traitée par Dorothée Kapsambelis dans sa thèse de sciences de gestion à l'institut Agro Rennes-Angers (KAPSAMBELIS 2022) sur les risques induits par de tels événements sur les récoltes. Elle se concentre sur les céréales à paille et les prairies et cherche à modéliser l'impact des sécheresses et des excès d'eau qui pourraient affecter la France en 2050 sur les pertes des récoltes.

Les résultats de son étude montrent l'**impact très significatif de l'augmentation de l'intensité des sécheresses extrêmes en 2050**, dont la fréquence pourrait également être multipliée par 2. Quant aux excès d'eau, si leur impact sur les rendements céréaliers est clair au vu des mauvais résultats de 2007 et de 2016, l'augmentation de la fréquence de ces phénomènes dans le climat de 2050 est plus incertaine. Les modèles actuels suggèrent que l'augmentation des fortes précipitations devrait surtout toucher la moitié nord de l'Europe. Ces résultats sont cependant à nuancer au vu des inondations qu'a connues l'Italie au printemps 2023.

Les conséquences sur les pertes de récoltes moyennes dans le climat 2050 sont éloquentes, comme le montre les infographies ci-dessous. En particulier, le pourtour du bassin méditerranéen devrait connaître un assèchement significatif dans le siècle à venir, ce qui affectera considérablement les rendements dans la moitié sud du pays.

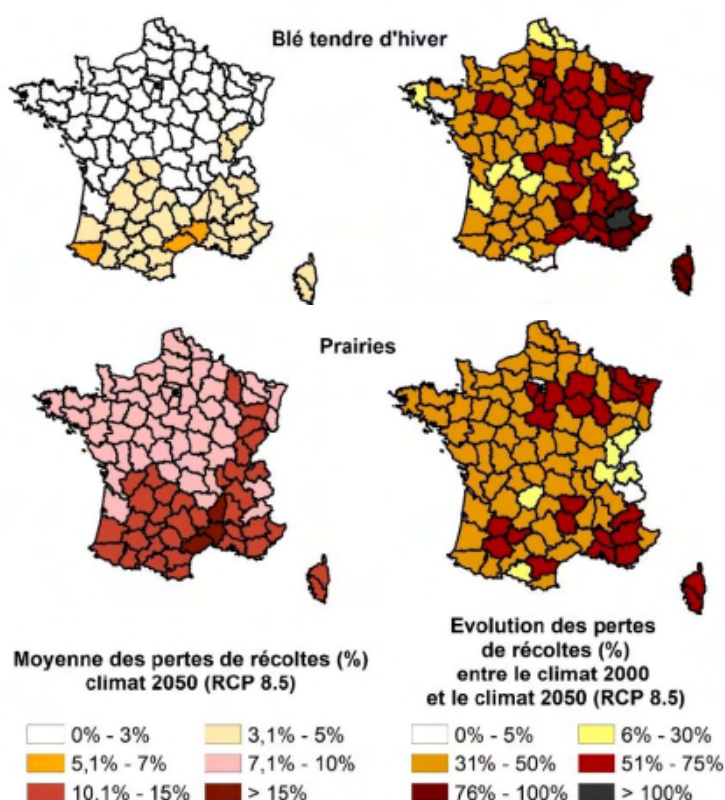


Figure 4 : Pertes de récoltes moyennes annuelles départementales sur le climat 2050 et évolution des pertes de récoltes annuelles moyennes entre le climat 2000 et le climat 2050 pour le blé d'hiver et les prairies (KAPSAMBELIS 2022) - les pertes de récoltes sont définies par rapport à une production maximale théorique, atteignable en cas de conditions météorologiques optimales.

Par ailleurs, Kapsambelis analyse également la période de retour d'une perte de récolte départementale de 25% dans le climat 2050. Pour les céréales d'hiver, elle observe un gradient Nord/Sud : pour la moitié Sud de la France, une perte de 25% a une période de retour inférieure à 50 ans alors qu'elle serait supérieure à 100 ans dans la moitié Nord de la France. Pour les prairies, une perte de récolte de 25% est très récurrente à l'échelle départementale : sa période de retour est comprise entre 3 et 10 ans sur tout le territoire.

Si les modèles utilisés par Kapsambelis montrent une augmentation des années de fortes pertes en 2050, son étude montre aussi que cette tendance est déjà enclenchée.

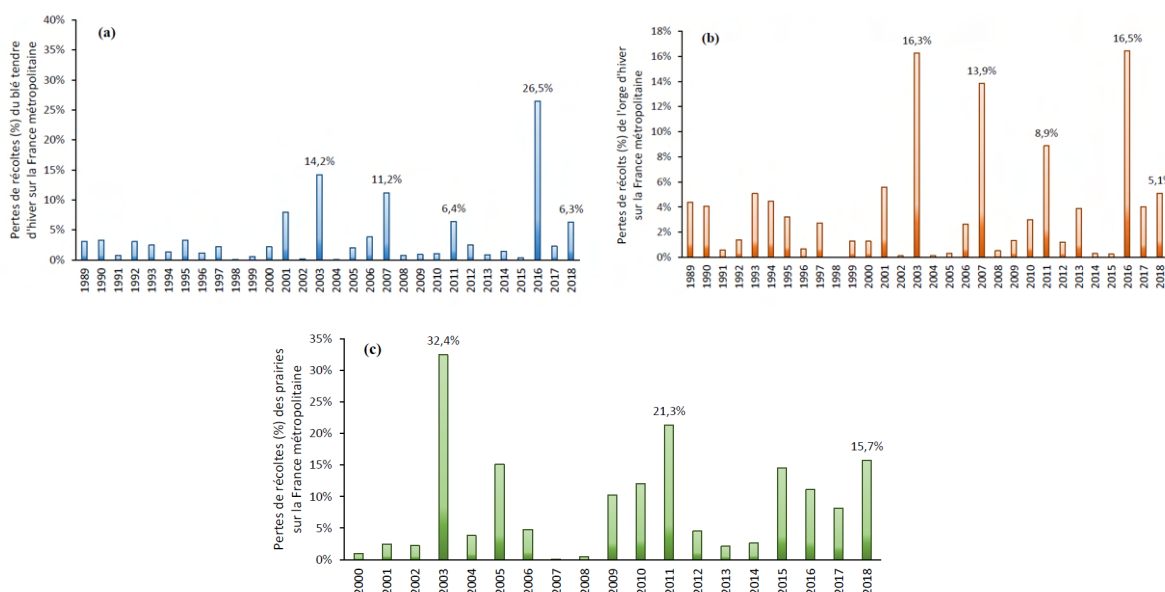


Figure 5 : Pertes de récoltes moyennes sur la France métropolitaine entre 1989 et 2018 pour a) le blé tendre, b) l'orge d'hiver et c) les prairies (KAPSAMBELIS 2022).

Les sécheresses de 2003 et 2011 ont affecté les rendements des céréales (-10% à -15%) mais surtout des prairies (jusqu'à -30%) ; les excès d'eau de 2007 et 2016 ont quant à eux surtout touché les céréales (-15% à -25% de rendements).

Si Kapsambelis s'intéresse surtout aux conséquences de ces pertes sur l'alimentation et les fourrages et à la manière dont devront s'adapter les assurances agricoles, mais ces résultats impliquent plus largement que la variabilité de toute production agricole, y compris énergétique, va probablement augmenter d'ici 2050.

B. Parmi les gisements de biomasse jusqu'ici évoqués, lesquels sont variables d'une année à l'autre?

Parmi les sources de biomasse utilisables pour des usages énergétiques, toutes ne seront cependant pas impactées de la même manière. La biomasse forestière, ou « biomasse végétale à cycle long » d'après la classification de la Commission de la Régulation de l'Energie (CRE), représente 53% de la biomasse non-alimentaire utilisée en 2021 (VAISS 2023). Elle est certes sensible aux incendies, aux tempêtes et aux ravages de certains parasites (scolytes par exemple), mais elle évolue sur des temps longs, de l'ordre de plusieurs décennies et la production qui en découle est donc peu soumise à la variabilité du climat à l'échelle interannuelle. L'essentiel de la biomasse est stockée sur pied et le rythme de production de bois dépend donc avant tout de l'activité des exploitants forestiers et des filières aval. Ainsi, même si le bois, la première énergie renouvelable française, va continuer de jouer un rôle clé dans le développement des bioénergies, pour la suite de ce rapport, nous nous concentrerons sur les biomasses d'origine agricole pour quantifier leur variabilité et en analyser les conséquences.

Certaines biomasses non-végétales, comme les déchets ou les déjections d'élevages, devraient également être peu influencées par la variabilité climatique. Ces gisements ne représentent cependant que 4% de la biomasse non-alimentaire utilisée en 2021 (VAISS 2023) et leur potentiel de développement, quoique bien réel (meilleur tri des déchets par exemple), est toutefois limité. Ce gisement devrait donc rester marginal à l'échelle des besoins nationaux de biomasse non alimentaire à l'horizon 2050.

La biomasse agricole, ou « biomasse végétale à cycle court » dans la classification de la CRE, a priori plus sensible aux aléas climatiques, constitue quant à elle les trois quarts de la biomasse produite chaque année en France en tonnes de matière sèche, et 43% de la biomasse non-alimentaire utilisée en 2021. Elle est constituée, à parts à peu près égales, de productions agricoles pouvant répondre à des besoins alimentaires (grains, fruits, légumes...), de résidus de cultures (pailles, tiges, feuilles...) et d'herbes et fourrages. D'après les travaux de France Stratégie et de l'Ademe, les résidus de cultures méthanisés pourraient permettre de produire en 2050 entre 13 et 21 TWh de biométhane, auxquels pourraient s'ajouter jusqu'à 15 TWh issus des herbes et fourrages dans le scénario de l'ADEME le plus optimiste. Ces différents scénarios prévoient un saut de la production de biogaz totale de 2 TWh en 2020 à environ 80 TWh en 2050, **le biogaz représentant alors l'écrasante majorité de l'augmentation de la production de bioénergies dans chacun d'entre eux**. La contribution des herbes, fourrages et résidus à cette augmentation est comprise entre 20% et 30% selon les scénarios.

TWh, projections de l'offre de certaines biomasses énergie en 2050	Situation de référence en 2020	SNBC 2	Ademe Transition(s) 2050 - S3 Technologies vertes	Solagro Afterres	France Stratégie
Herbe et cultures fourragères méthanisées	0	15	15	13	10
Résidus de culture méthanisés	0	7	21	29	13
Cultures intermédiaires méthanisées	0	63	47	44	43
Déjections d'élevage méthanisées	2	27	28	29	22
Déchets alimentaires	0,3	<1	2	9	1
Production totale de biogaz	2,3	112	113	124	89
Fraction variable	0%	76%	73%	69%	74%

Tableau 2 : Synthèse des différents scénarios existants sur la production de biogaz en 2050 avec pour chacun la fraction exposée à la variabilité agricole inter-annuelle.

Le gisement au potentiel le plus prometteur est le développement des cultures intermédiaires à vocation énergétique (CIVE). Celles-ci viennent s'insérer dans les rotations culturales dans des périodes où le sol était jusqu'ici laissé à nu ou protégé par un couvert végétal non-récolté (comme les CIPAN : Cultures Intermédiaires Pièges A Nitrates) et sont en général récoltées avant maturité pour être méthanisées. Dans les scénarios de l'ADEME et de France Stratégie, elles représentent environ 40 TWh par an en 2050, et jusqu'à 63 TWh dans la SNBC 2 (« Stratégie Nationale Bas-Carbone » 2015).

Les prochaines sections de cette note chercheront à évaluer la variabilité interannuelle de la production de biogaz à partir de CIVE, de résidus de culture et de fourrages, **ces trois gisements étant susceptibles de représenter 75% à 80% du biogaz produit en 2050.**

C. Retour sur la variabilité des cultures intermédiaires

De par leur nature, les cultures intermédiaires sont très dépendantes des calendriers de rotations culturales. Ceux-ci sont en général susceptibles de laisser apparaître des trous à deux périodes de l'année : soit à la fin de l'été, du mois d'août au mois d'octobre, avant un semis automnal (de blé par exemple) ; soit pendant l'hiver, entre octobre et avril par exemple, avant le semis d'une culture semée au printemps (par exemple un maïs). On parle ainsi de CIVE d'été et de CIVE d'hiver selon le calendrier d'implantation de la culture intermédiaire, avec dans chaque cas des contraintes bien différentes résumées dans le tableau ci-dessous. Les CIVE d'été, à la croissance plus rapide, pourraient s'insérer sur 13 millions d'hectares, ce qui représente plus de 40% de la surface agricole utile (SAU) française. Mais elles présentent l'inconvénient d'un semis en période estivale, sur un sol souvent sec qui imposerait la nécessité d'arroser ou d'irriguer pour permettre aux cultures de lever. Face aux restrictions d'eau de plus en plus fréquentes et qui vont s'aggraver dans le contexte climatique décrit précédemment, la plupart des acteurs rencontrés lors de ce travail de mémoire s'accordent à dire que le potentiel des CIVE d'été reste très limité.

CIVE d'hiver	CIVE d'été
Pousse longue (octobre - avril)	Pousse rapide (août - octobre)
Peu de terres concernées (4 Mha maximum)	De nombreuses terres concernées (13 Mha)
Semis en période classique	Semis estival incertain

Tableau 3 : comparaison des caractéristiques des CIVE d'été et d'hiver.

Pour estimer le potentiel des CIVE d'hiver, nous nous appuyons sur les travaux réalisés par Solagro dans le rapport Aferres (SOLAGRO 2016). Dans l'hypothèse d'une fertilisation sans engrais minéraux (utilisation de digestat uniquement) et d'un calendrier de récolte n'impactant pas la culture principale qui suit, les auteurs estiment que le rendement des CIVE d'hiver pourrait varier considérablement selon les régions, les parcelles et les années. L'essentiel de la croissance végétale a lieu pendant une période restreinte, au retour du printemps, pendant les quelques semaines précédant la récolte. Cette croissance est donc particulièrement dépendante de la météo pendant une période de temps courte, ce qui la rend très incertaine, et peut inciter à un report de la récolte de quelques semaines. Une étude menée sur des exploitations d'Ile-de-France estime qu'un report de trois semaines du semis de la culture principale pourrait en moyenne diminuer son rendement de 20% à 35% (CARTON, LEVAVASSEUR, et HUGONNET 2022).

Dans les estimations qui suivent, nous faisons l'hypothèse d'un respect strict de la hiérarchie des usages et d'une récolte de CIVE à date fixe. Selon la qualité des terres et les années, Solagro évoque des rendements variant de 1,8 à 7 tMS/ha (tonnes de matière sèche par hectare). En cas de pousse trop faible, le coût de la récolte pour l'agriculteur peut le dissuader de récolter la culture qui reste alors sur place et retourne au sol. Selon les acteurs rencontrés, les rendements minimaux de coupure (rendement minimal pour lequel l'agriculteur décide de récolter la CIVE plutôt que de la laisser sur place) varient de moins de 4 à plus de 6 tMS/ha. Nous considérons ici le cas d'une production minimale de 5 tMS/ha, mais notons que cette valeur pourrait être amenée à varier en fonction des prix de vente de la biomasse et des tarifs de rachat du biogaz produit par méthanisation.

Production de biométhane à partir de CIVE d'hiver	Rendement minimal de coupure à 5 tMS/ha	Rendement minimal de coupure à 4 tMS/ha
Bonne année	29.9 TWh	42.8 TWh
Année moyenne	18.2 TWh	29.5 TWh
Mauvaise année	7.4 TWh	14.7 TWh

Tableau 4 : Estimation de la variabilité de production de biométhane à partir de CIVE d'hiver pour deux rendements minimum de coupure.

Les résultats obtenus sont rassemblés dans le tableau 3. Il apparaît que **la variabilité liée à la croissance des cultures est amplifiée par le choix économique de récolter ou non**. Entre une bonne et une mauvaise année¹, **la production nationale récoltée varie alors d'un facteur 4**, entre 7,4 et 29,9 TWh. En abaissant le rendement minimal de récolte à 4 tMS/ha, la fourchette de production passe alors à 14,7 - 42,8 TWh pour les CIVE d'hiver. Il apparaît ici clairement qu'à la fois la récolte moyenne de CIVE et la variabilité dépendront fortement de l'évolution du rendement minimal de récolte dans les décennies à venir. Si la valeur du biométhane produit augmente, le rendement minimal de récolte pourrait diminuer, limitant ainsi la variabilité qui restera cependant toujours significative du fait de l'incertitude sur la production agricole elle-même.

Une analyse similaire confirme les limites du potentiel des CIVE d'été pour des rendements minimaux de récolte compris entre 4 et 5 tMS/ha. D'après Solagro, les rendements des CIVE d'été ne pourraient en effet excéder 5 tMS/ha en l'absence de fertilisation et d'irrigation et ne dépasseraient 4 tMS/ha que dans 25% des cas. En l'absence d'incitation à agir différemment, il semble donc bien difficile d'attendre des agriculteurs qu'ils investissent dans des semis qui ne seront presque jamais récoltés.

¹ Une bonne année est définie par 50% et 30% des récoltes de CIVE dans les deux premiers quintiles, une mauvaise année est définie avec seulement 20% des récoltes dans les deux premiers quintiles.

D. La variabilité des résidus et des prairies peut être quantifiée à partir des données actuelles

Comme étudié dans le rapport de la mission collective (BACHMANN et al. 2023), les prairies sont menacées par la déprise de l'élevage, les plus productives étant à risque d'être « retournées » (i.e. réutilisées pour planter d'autres cultures) et les moins bonnes terres risquant d'être laissées à l'abandon et de se transformer progressivement en friches forestières. Toutefois, l'importance écologique de ces écosystèmes, clés pour le stockage du carbone dans les sols et pour la biodiversité, devrait permettre de préserver une partie conséquente des prairies françaises à horizon 2050. Si l'on peut souhaiter que l'élevage restant en 2050 soit plus extensif et continue d'occuper ces prairies, il est possible de voir dans la méthanisation de l'herbe un complément de revenu additionnel qui permette d'aider à justifier économiquement la préservation des prairies.



Figure 6 : Illustration d'une prairie et de résidus de culture de maïs à gauche et de blé à droite².

En ce qui concerne les résidus de culture, on aurait tort de les considérer comme de la biomasse « gratuite », inexploitée, qui n'avait pas d'utilité avant que les énergéticiens ne s'y intéressent. En effet une grande partie de ces résidus est laissée aux champs afin de réaliser un apport de matière organique vital pour la fertilité des sols. En outre, ces résidus peuvent être récoltés pour des usages de litière pour animaux et on les retrouve ainsi dans la composition du fumier. Même si cette matière première agricole est plutôt ligneuse, ce qui permet d'en faire un usage optimisé en combustion solide (exemple des chaudières à paille ou des agro-granulés évoqués dans la suite), elle a aussi un potentiel méthanogène qui permet de considérer ce gisement comme un gisement clé de production de biogaz en France à horizon 2050 (voir tableau comparatif des scénarios, le potentiel varie entre 13 TWh pour France Stratégie et 29 TWh pour Solagro).

L'estimation du potentiel et de la variabilité de production de résidus de cultures et d'herbes et fourrages peut être réalisée en première approximation à partir des données de ces dernières années. Plus précisément, les calculs de cette section s'appuient sur les données du graph'agri publié par Agreste à la suite du recensement agricole de 2020 pour la production d'herbes et fourrages (AGRESTE 2022) et sur les données de la FAO sur les rendements passés du blé et du maïs (RITCHIE, ROSADO, et ROSER 2022). La figure 7 présente l'évolution des rendements de ces trois types de culture sur la période 1997-2018. Le rendement des fourrages est particulièrement variable d'une année à l'autre, avec un maximum de 7 tMS/ha atteint en 2008 et un minimum de 4 tMS/ha en 2018. Les rendements de maïs et de blé présentent une variabilité un peu plus faible, malgré les rendements de blé historiquement bas de 2016 (5,29 t/ha contre 6,95 t/ha en moyenne depuis l'an 2000).

² Lien des images : Typelight ©, <https://www.semencesdefrance.com/actualite-semences-de-france/gerer-residus-a-linterculture-soit-culture-suivante/>, Matauw ©

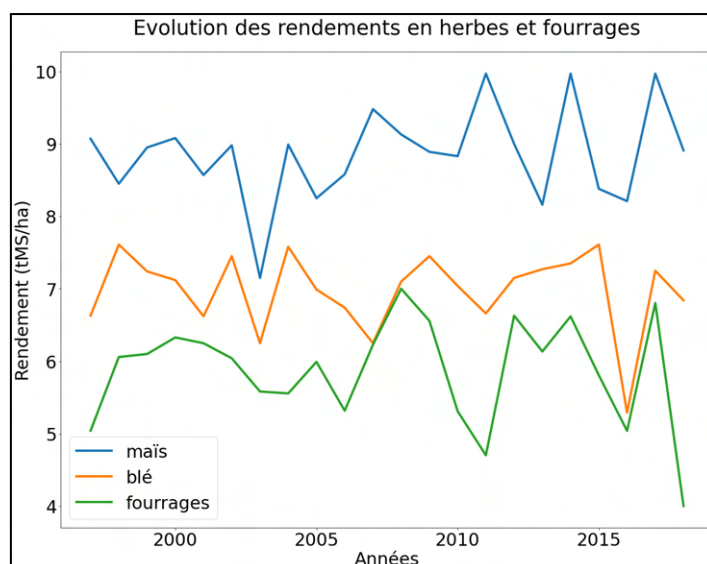


Figure 7 : Evolution des rendements en blé, maïs et fourrages en France sur la période 1997 - 2018.

L'herbe, le blé et le maïs sont trois cultures présentant des profils de croissance très différents. L'herbe pousse essentiellement au printemps et au début de l'automne, quand les températures sont comprises entre 10°C et 20°C et les pluies assez régulières. Le maïs est semé le plus souvent au printemps, récolté à la fin de l'été et nécessite en général d'être irrigué. Le blé, enfin, est semé à l'automne et récolté l'été suivant, alimenté par les eaux de pluie de l'année. Les courbes de rendement de ces trois cultures présentent pourtant des similarités, à l'image de l'année 2003, marquée par une sécheresse et une canicule estivales, qui correspond à un minimum local de rendement dans chaque cas. Le tableau 5 rassemble les coefficients de corrélations calculés entre les rendements des trois cultures. Tous les coefficients sont positifs et significatifs, ce qui suggère une additivité partielle entre les variabilités des différentes sources de biomasse agricole.

Coefficients de Corrélations	Rendement du blé	Rendement du maïs	Rendement herbe et fourrages
Rendement du blé	1	0,23	0,38
Rendement du maïs		1	0,22
Rendement herbe et fourrages			1

Tableau 5 : corrélations entre les rendements en blé, maïs et fourrages en France sur la période 1997-2018.

Si les chiffres précédents indiquent les rendements en grain du blé et du maïs, ce rapport prend l'hypothèse d'un facteur de proportionnalité entre la production de grain et la production de résidus. Afin de simuler la variabilité interannuelle de production de biomasse agricole non-alimentaire, nous simplifions et approximations par la suite la production nationale de résidus de culture en deux types de résidus aux rendements partiellement corrélées, extrapolés à partir de la variabilité des rendements du blé et du maïs et représentant en moyenne 80 MtMS/an (AUBERT et al. 2023). Sous cette hypothèse, nous estimons que la production totale de fourrages, d'herbe et de résidus a pu varier entre 140 et 180 MtMS selon les années au cours des 20 dernières années.

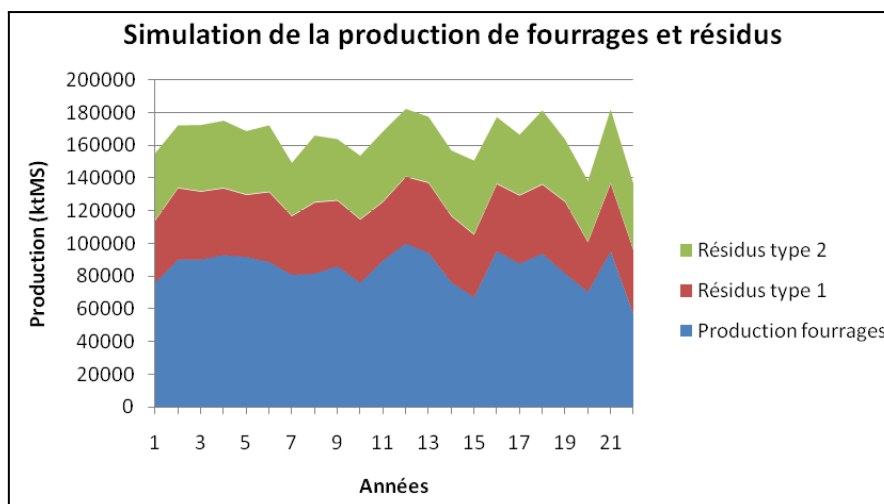


Figure 8 : simulation de la production de fourrages et résidus sur une période de 22 ans.

A l'horizon 2050, cette production sera impactée par l'évolution des rendements, qui reste aujourd'hui incertaine - le Ministère de l'Agriculture mise aujourd'hui sur une légère baisse (LHERMITTE et al. 2022) conséquence à la fois de l'évolution du climat et des pratiques culturales, et par l'artificialisation qui pourrait menacer en particulier les surfaces de prairies permanentes. Ces tendances, qui impactent plus la production moyenne de biomasse que sa variabilité, ne sont pas prises en compte ici.

Encadré 1 : la variabilité en qualité des récoltes, un facteur aggravant de risque pour la biomasse énergie ?

Dans cette partie, nous nous intéressons principalement à la variabilité en termes de quantité pour les récoltes. On peut également se demander quel est l'impact de la variabilité de la qualité de la récolte sur la production de biomasse énergie ?

En 2016, l'excès d'eau ayant conduit à une baisse importante de la production en grandes cultures en France a également donné un blé de moins bonne qualité, ce qui a fait baisser son prix. Par ailleurs, les amidonneries ont dû augmenter de 5% leur consommation de grains à l'échelle nationale, pour compenser des taux de protéines trop variables et un poids spécifique insuffisant (CARPON 2016). Cette augmentation de la consommation des secteurs alimentaires (humain et animal) les années de récolte de mauvaise qualité pourrait amplifier les conflits d'usage avec la biomasse énergie pour les produits à usages multiples (blé en culture énergétique ou maïs à méthaniser par exemple).

En revanche, d'après les données disponibles, il ne semble pas que la production énergétique soit fortement impactée par des variations de qualité de la récolte, au moins dans le cas de la méthanisation. Le pouvoir méthanogène des céréales va varier avec leur propriétés chimiques, mais au premier ordre, il a été observé que la production de méthane est plus proportionnelle à la quantité de biomasse produite (et donc au rendement de la récolte) qu'à son pouvoir méthanogène (QUENNESSON et DECAUX 2020).

Ceci peut sans doute s'expliquer par le fait qu'en méthanisation, c'est la biomasse de la plante entière qui compte pour produire du biogaz, et le fait qu'il y ait des grains formés ou non importe peu (voire augmente le temps de dégradation de la matière) (CHAMBRE D'AGRICULTURE DES LANDES 2017) tandis que le secteur alimentaire s'intéresse aux variations fines de la chimie du grain.

E. Face à cette variabilité, quels usages voudra-t-on stabiliser? Estimation de la demande en fourrages en 2050.

A l'heure actuelle, l'essentiel de la production d'herbe et de fourrages est utilisée pour nourrir les animaux d'élevage. Le Groupement d'Intérêt Scientifique (GIS) Avenir Elevage (LAMY GRANDIDIER 2020) estime que sur les 80 à 88 MtMS de fourrages et les 17 à 19 MtMS de pailles produites en 2015, entre 70 et 72 MtMS ont directement servi à nourrir les herbivores. A ce chiffre s'ajoutent 34 Mt de concentrés, principalement sous forme de grains et de tourteaux de soja importés. La majorité des résidus de culture est quant à elle laissée sur place lors de la récolte et sert à renouveler la matière organique et le stock de carbone du sol. De par leur rôle dans le stockage de carbone et dans l'entretien de la qualité des sols, il ne semble pas envisageable de réduire cet usage. Un objectif de 4‰ d'accroissement du stock de carbone dans les sols français a d'ailleurs été fixé dans cette perspective (INRAE 2020).

Dans l'hypothèse d'un cheptel réduit de 20% en 2050 (hypothèse du MASA), la demande en fourrages serait alors de l'ordre de 60 MtMS/an. La question de la priorité entre l'usage fourrager et l'usage énergétique commence à être débattue, bien qu'historiquement et pour la plupart des agriculteurs rencontrés, la priorité à l'alimentation animale ne doive pas être remise en cause. Du point de vue économique, nous estimons que l'utilisation des prairies en fourrages reste aujourd'hui plus intéressante que la méthanisation de l'herbe, en permettant de dégager un chiffre d'affaire annuel de l'ordre de 4000 euros/ha dans le cas d'une exploitation de vaches laitières bio contre 1500 euros/ha par méthanisation. Cependant, les travaux sur le sujet de la Fabrique Ecologique (LA FABRIQUE ECOLOGIQUE 2022) envisagent de résoudre le problème de la variabilité de la production de fourrages en favorisant des modèles d'exploitations structurellement excédentaires réorientant la production non consommée les bonnes années vers des méthaniseurs.

Nous considérons dans notre calcul que 60 MtMS/an d'herbe ou résidus sont consacrés à un usage fourrager. Cela laisse, en reprenant les chiffres de la figure 8, une production variable d'entre 80 et 120 MtMS/an à répartir entre les retours au sol et les usages énergétiques. Le maintien de la qualité et du stock de carbone des sols devra mobiliser en moyenne 75 MtMS/an. Dans l'hypothèse d'une variabilité répartie de manière équilibrée entre usages énergétiques et retours au sol, la biomasse restante qui pourrait être utilisée pour la méthanisation varierait entre 19 et 29 MtMS selon les années (minimum et maximum sur 20 ans simulés), avec une moyenne d'environ 25 MtMS/an. Ce gisement représenterait un potentiel maximum de l'ordre de 20 à 25 TWh/an en moyenne (AUBERT et al. 2023), avec une forte variabilité interannuelle qui pourrait être encore amplifiée par le comportement économique des acteurs et la structure des exploitations.

TWh, projections de l'offre de certaines biomasses énergie en 2050	Situation de référence en 2020	SNBC 2	Ademe Transition(s) 2050 - S3 Technologies vertes	Solagro Afterres	France Stratégie	Scénario moyen	Fourchette	Variabilité maximale
Herbe et cultures fourragères méthanisées	0	15	15	13	10	8	5 - 10	62%
Résidus de culture méthanisés	0	7	21	29	13	12	10 - 14	33%
Cultures intermédiaires méthanisées	0	63	47	44	43	30	15 - 43	100%
Autre biogaz non variable	2,3	27	30	38	23	25	25 - 25	0%
Total biogaz	2,3	112	113	124	89	75	60 - 88	37%

Tableau 6 : bilan sur les gisements en biomasse agricole pour l'énergie et leur variabilité (pour un rendement minimal de coupure à 5 tMS/ha pour les CIVE).

Au total, la variabilité de production des trois gisements détaillés - CIVE d'hiver, herbe et résidus - pourrait mener à des variations de l'ordre de 30 TWh d'une année à l'autre (autour d'une production moyenne de 75 TWh) dans la production totale de biogaz, ce qui représente **une variabilité de l'ordre de 40% du total**. Derrière ce chiffre, la contribution des différents gisements n'est pas équivalente : les CIVE d'hiver représentent à la fois le gisement au potentiel le plus grand et celui qui variera le plus, alors que les résidus n'ont une contribution que très limitée à la variabilité totale.

F. Implications et limites

Les estimations présentées dans cette partie sont issues de calculs simples effectués à partir des données actuellement disponibles au grand public. Elles mériteraient d'être complétées par une étude plus approfondie reposant sur des modèles de climat et d'évolutions des rendements d'une part, et des modèles économiques simulant les comportements des acteurs et les fluctuations des prix de l'autre.

En particulier, plusieurs facteurs n'ont pas été pris en compte dans notre étude parmi lesquels :

- la baisse du rendement moyen en herbes et fourrages qui pourrait augmenter la variabilité de la part dédiée à l'énergie si l'usage fourrager est considéré comme prioritaire,
- la poursuite de l'augmentation de la variabilité des rendements agricoles pour la partie résidus, herbes et fourrages d'ici 2050,
- la rentabilité économique de mobiliser les résidus, herbes et fourrages en fonction des rendements de l'année,
- Le niveau de corrélation entre une mauvaise année pour les CIVE d'hiver et pour les fourrages et résidus.

Des estimations précises du gisement et de l'évolution de sa variabilité nécessiteraient un travail de modélisation complexe, couplant des modèles climatiques, agronomiques et économiques. Il s'agirait alors de comprendre plus précisément comment les aléas climatiques plus intenses de 2050 impacteront les cultures en fonction des essences choisies, puis d'estimer les choix des acteurs en fonction de leurs intérêts économiques dans un contexte réglementaire donné.

Néanmoins, le calcul présenté ici doit pouvoir faire naître un débat nouveau dans l'utilisation future de la ressource en biomasse. La plupart des études existantes n'envisagent la variabilité de la biomasse que dans un contexte purement agricole ; et les projections réalisées sur l'utilisation de biomasse-énergie en 2050 s'intéressent surtout à la production moyenne et soulignent la difficulté à trouver une quantité de biomasse suffisante pour décarboner tous les usages demandeurs. Notre étude rassemble les deux approches et souligne que **la gestion de la variabilité de la ressource sera une question cruciale à résoudre pour la mise en place de stratégies de décarbonation cohérentes à l'horizon 2050.**

En conclusion de cette partie, il semble bien possible d'alléguer que la biomasse peut être considérée comme une énergie intermittente particulière à horizon 2050.



III. La biomasse, une énergie intermittente particulière à horizon 2050

On désigne par « énergie intermittente » une énergie dont la production fluctue à cause de la variation de la disponibilité de la ressource primaire sans possibilité de contrôle (HAUET 2019). On distingue généralement deux notions : la variabilité temporelle connue et prévisible (par exemple la saisonnalité, l'absence de soleil la nuit) des fluctuations au caractère aléatoire décrites de manière probabiliste. Ainsi la notion d'« intermittence » d'une énergie peut s'appliquer à des productions de natures différentes, comme le montrent les profils de production horaire éolien et solaire à l'échelle de la France métropolitaine ci-dessous.

On parle aussi, pour décrire les énergies solaire et éolienne, d'énergies « fatales » ou « non-pilotables » car une fois le dispositif de production installé, l'énergéticien n'a aucun contrôle sur sa production, qui est comprise entre zéro et la puissance nominale de l'installation suivant la disponibilité de la ressource primaire.

Le caractère intermittent de la source d'énergie fait fortement baisser son facteur de charge, qui est le rapport entre l'énergie produite par une installation sur une période donnée et l'énergie qui aurait été produite si l'installation avait été exploitée en continu à sa puissance nominale sur la même période. Dit autrement, le pourcentage du temps où l'installation produit de l'énergie à sa puissance nominale (la fameuse « puissance installée ») est faible pour une énergie intermittente : il est par exemple en moyenne de 0.14 pour le solaire photovoltaïque français, 0.26 pour l'éolien terrestre français. Il s'agit bien là d'une conséquence possible d'un type d'intermittence.

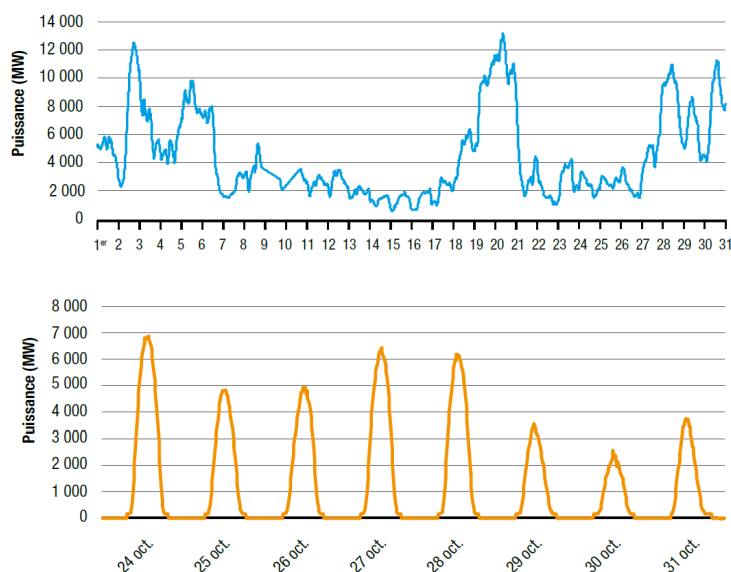


Figure 9 : Comparaison des profils de production en horaire de l'éolien (pour octobre 2021) et du solaire (pour la semaine du 24 au 31 octobre 2021) en France métropolitaine (DARTOIS et SUDERIE 2022) : deux profils d'intermittence.

Qu'en est-il pour la biomasse énergie ?

Les installations de production de biomasse énergie que sont par exemple les chaudières à bois, les unités de méthanisation ou les bioraffineries, ne sont généralement pas considérées comme intermittentes, à tort. En effet, comme les centrales à charbon, à gaz ou nucléaires, qui ont besoin de productible pour fonctionner, les installations biomasse ne dépendent que de la disponibilité de leur(s) intrant(s) ou combustible(s). A condition d'avoir ce productible, les installations biomasse produisent en moyenne à une puissance proche de leur puissance nominale, avec un facteur de charge élevé (par exemple celui de la méthanisation est évalué à 0.85 (DREAL BRETAGNE 2022)). Elles ne sont donc pas « fatales » ou « non-pilotables », car dès lors que le productible est disponible, en régime normal de fonctionnement, on sait dans quel intervalle la production d'énergie se fera dans les heures et jours qui suivront.

Pour autant, la production des installations de biomasse énergie varie dans le temps, comme on le voit dans le graphique ci-dessous, représentant le débit d'injection moyen mensuel des unités de méthanisation en injection de la région Ile-De-France. Cette variation du volume de biogaz injecté est due à la variation du type d'intrant, de leur quantité ou de leur qualité (pouvoir méthanogène, humidité, etc). Cette variabilité peut aussi dépendre de facteurs extérieurs comme un réseau gazier saturé en été à cause d'une faible demande, ce qui exige de moduler la production (QUAAK 2023).

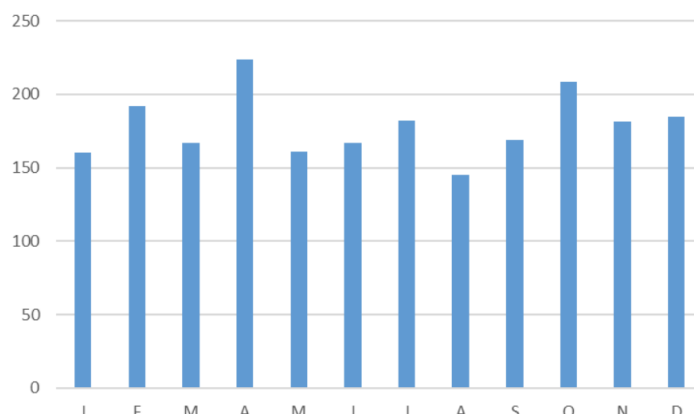


Figure 10 : Débit mensuel moyen de biométhane injecté (en Nm3/h) pour les unités de méthanisation de la région Ile-de-France en 2020 (AREC IDF 2022).

Même si l'on note des variations mensuelles qui peuvent atteindre 20% à 30% du volume de biogaz injecté dans le réseau (donc d'énergie produite par le méthaniseur), on peut considérer ces variations faibles par rapport aux variations des énergies renouvelables électriques, à condition d'avoir de la matière première à méthaniser.

Ainsi, si la biomasse énergie n'est pas à proprement parler une énergie intermittente à faible facteur de charge, elle semble toutefois rentrer dans la définition à cause de la « variation de la disponibilité de la ressource primaire sans possibilité de contrôle », la ressource primaire étant ici l'intrant agricole (et non forestier, comme justifié précédemment). En effet, la question de la production variable d'énergie par la biomasse se pose donc un cran en amont de l'alimentation de l'installation de biomasse énergie (méthaniseur, chaudière à bois ou raffinerie à biocarburant), dans l'approvisionnement même du dispositif en productible. Tout comme une centrale nucléaire se mettrait à avoir une production fortement variable si l'approvisionnement en uranium était aléatoire et dépendant de facteurs climatiques et météorologiques imprévisibles, la production d'énergie par la biomasse sera très fortement impactée dans les années à venir par la forte variabilité de la ressource qui va aller en s'exacerbant, tel que décrit dans la partie précédente.

L'enjeu est ensuite d'éclaircir les conséquences de la variabilité de la disponibilité du « productible » pour la production d'énergie par la biomasse. Comment sera géré un très fort afflux de ce productible ? Ou au contraire une très mauvaise année et donc une disponibilité limitée du même productible ? Comment s'adapteront les secteurs dans lesquels cette énergie issue de la biomasse sera utilisée en 2050 ?



IV. La forte variabilité de la ressource fait peser de lourds risques économiques et techniques sur le système de biomasse énergie, aujourd'hui largement sous-estimés

A. Comprendre les dynamiques des prix

Nous cherchons dans cette partie à évaluer les risques et les conséquences potentielles d'une bonne ou d'une mauvaise année de récolte sur un système énergétique de plus en plus basé sur la biomasse, en particulier agricole. Si la production est soudainement divisée par 2, qui seront les premiers à en souffrir ? Quels usages de la biomasse seront alors privilégiés ? Pour répondre à ces questions, il s'agit d'abord de comprendre les dynamiques des prix de l'alimentation d'une part et de l'énergie de l'autre, et de comprendre comment celles-ci interagissent entre elles.

Encadré 2 : comment expliquer les variations des cours des denrées alimentaires?



Figure 11: Evolution du cours mondial de blé depuis 1998 (TRADING ECONOMICS 2023).

Certains événements climatiques identifiés ont des conséquences bien visibles sur le cours des prix du blé. En 2003 par exemple, la sécheresse et la canicule qui touchent l'Europe font monter les prix de 300 à 400 USD/Bu (FEMENIA, GOHIN, et CARPENTIER 2010).

En revanche, les hausses de prix les plus spectaculaires reposent en général sur une combinaison de facteurs multiples. Entre mars 2007 et février 2008 par exemple, le cours du blé bondit de 436 à 1072 USD/Bu pendant la crise alimentaire mondiale de 2007-2008.

Dans les années qui précèdent, plusieurs tendances conjointes aggravent la tension sur les approvisionnements en céréales :

1. Une sécheresse en Australie (6ème exportateur mondial) a divisé les rendements par 2, des régions comme le sud de la Chine et l'Argentine connaissent un hiver rude qui affaiblit les récoltes ;
2. Le prix du pétrole est en forte augmentation, il a quadruplé depuis 2003, passant de 30\$ à 146\$ par baril. Face à cette hausse rapide, de nombreuses terres sont redirigées vers la production de biocarburants : en 2007/08, les quantités de céréales mobilisées pour cet usage augmentent de 32 % dans le monde, et de 80 % aux États-Unis. ;
3. La pression sur les terres arables s'intensifie à l'échelle mondiale sous l'effet de l'artificialisation des sols ;
4. La consommation de viande est en forte hausse, notamment en Chine, ce qui demande une quantité croissante de céréales pour l'alimentation animale. Ce phénomène est amplifié par une zoonose qui pousse le pays à importer 100 000 tonnes de porcs en 2007-2008.

Le coup de grâce est porté par l'arrivée de la crise des subprimes. Les matières premières deviennent des valeurs refuges donc spéculatives, ce qui favorise une envolée rapide des prix.

L'augmentation des prix en 2022 (saut de 760 à 1087 USD/Bu entre janvier et mai 2022) a quant à elle une origine essentiellement géopolitique. L'invasion de l'Ukraine entraîne d'une part une augmentation du prix des engrais minéraux directement liée à l'augmentation des prix du gaz et du charbon dont leur production dépend. D'autre part, l'incertitude que fait peser la guerre sur la récolte ukrainienne et son exportation (l'Ukraine est le 5ème exportateur mondial de blé) à l'étranger se traduit par une vague de spéculation qui fait exploser les cours.

L'un des enseignements principaux de l'analyse de ces deux crises (2007 et 2022) est l'interconnexion entre les prix mondiaux des énergies fossiles et des matières premières alimentaires, par le biais des engrais et par la substitution partielle du pétrole par la biomasse pour produire des carburants.

Les prix des céréales et de la biomasse-énergie suivent a priori des dynamiques assez différentes. Les prix de vente du blé ou du lait sont fortement dépendants des cours mondiaux qui eux-mêmes traduisent la production alimentaire à une échelle bien plus large et sont également très sensibles à des événements économiques ou géopolitiques susceptibles de générer des vents de panique. La spéculation joue ainsi un rôle important dans les envolées des cours. Entre janvier et mai 2022, l'invasion de l'Ukraine fait sauter les cours du blé de 760 à 1087 USD/Bu.

Par ailleurs, il convient de noter que les contrats entre producteurs et acheteurs de céréales sont des contrats long-terme, associant des prix contre des volumes plusieurs mois ou années avant les récoltes, éventuellement assortis d'options, puis que ces contrats peuvent être revendus sur des marchés secondaires. Ainsi la forte spéculation sur le cours des céréales peut parfois précéder de longtemps le résultat réel des récoltes et les quantités effectivement produites.

Les prix de vente de l'énergie produite à partir de biomasse pourraient quant à eux dépendre du modèle contractuel privilégié par les différents acteurs et ainsi dépendre ou non de la production nationale ou d'événements internationaux. Certes, la guerre en Ukraine a fait exploser les prix de l'électricité et du gaz sur les marchés européens. Le gaz, en particulier, stable autour de 20 euros/MWh sur les marchés européens depuis près de 10 ans, a atteint un pic à plus de 160 euros/MWh lors de l'été 2022.

Parallèlement, les tarifs de rachat du biométhane en France varient entre 50 et 145 euros/MWh pour les installations de moins de 300 Nm³/h (« GRDF - Projet Méthanisation | La vente du biométhane » s. d.) et sont garantis sur une durée de 15 ans. La hausse des prix du gaz naturel n'a donc pas profité aux producteurs de biométhane. Cependant, un tel tarif de rachat leur aurait offert un filet de sécurité en cas de chute des prix.

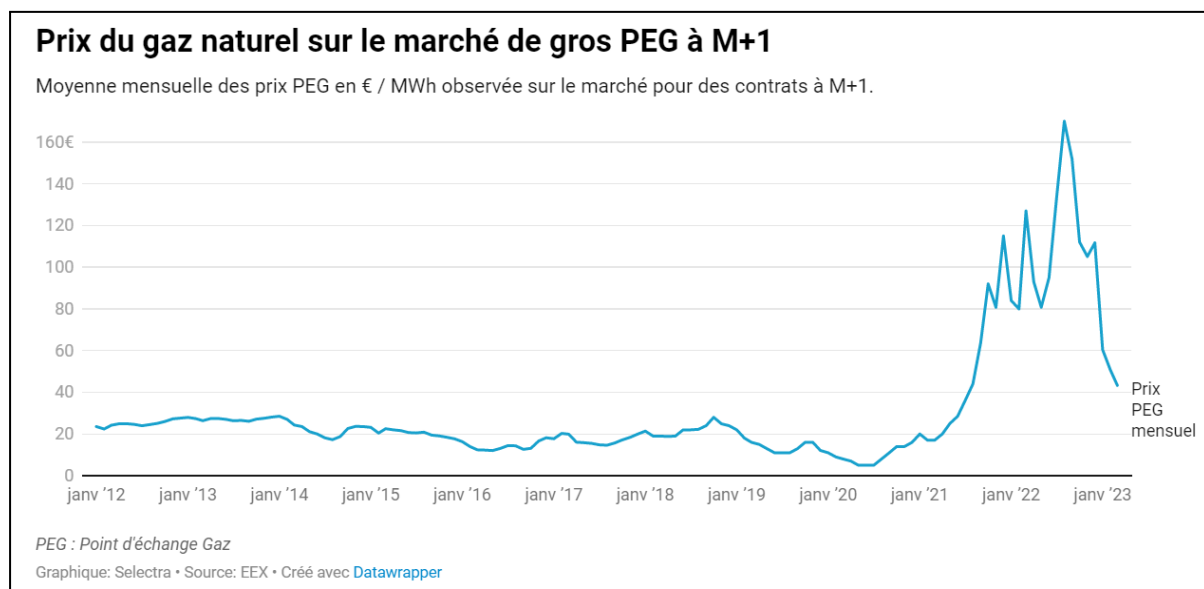


Figure 12 : Évolution du prix du gaz sur le marché de gros entre 2012 et 2022.

Lors d'une année de faible production de biomasse en France, on pourrait donc voir apparaître plusieurs cas de figure :

- Si les prix de vente du biométhane et des denrées alimentaires suivent des dynamiques comparables, le manque de ressource ne devrait pas (ou peu) perturber la hiérarchie des usages auxquels la production de biomasse est destinée.
- Si les prix du biométhane et des denrées alimentaires suivent des dynamiques différentes, avec en particulier des prix du biométhane particulièrement haut, **une partie de la production de biomasse pourrait, directement ou indirectement, être réorientée des usages fourragers ou alimentaires vers des usages énergétiques.**

Il convient de noter dans ce second cas que cette potentielle remise en cause de la hiérarchie des usages n'affectera pas toutes les productions de biomasse de la même manière. La production d'herbe, par exemple, devrait y être peu sensible : du fait de l'écart important entre les valorisations économiques de l'herbe en fourrages (4000 euros/ha) et en méthanisation (1500 euros/ha), il faudra des fluctuations de prix considérables pour remettre en cause cette hiérarchie économique.

Dans d'autres cas, le bousculement de la hiérarchie peut être plus subtil. Si les CIVE ne sont à première vue pas en concurrence avec des usages alimentaires, **la tentation de repousser le calendrier de récolte pour produire plus de biométhane menace le rendement de la culture principale qui suit.** Et puisque la récolte de la CIVE arrive avant maturité, dans une phase de production rapide de biomasse, l'espérance économique du gain d'une récolte plus tardive peut être positive, même si les prix de valorisation énergétique restent inférieurs à ceux d'une valorisation alimentaire pour une même production de biomasse.

Enfin, dans certains cas extrêmes, il peut arriver que les dynamiques de fluctuations des prix aillent jusqu'à une remise en cause directe de l'utilisation d'une culture qui pourrait être utilisée pour l'alimentation humaine (production céréalière par exemple). Les calculs menés dans notre étude ont permis de faire émerger un critère dynamique pour évaluer ce seuil : **si le prix de vente du biométhane par MWh dépasse 40% du prix de vente à la tonne des céréales, il devient rentable de méthaniser la production.** Ce seuil aurait pu être atteint ponctuellement pendant l'été 2022, au moment où les prix du gaz étaient au plus haut, si le prix de vente du biométhane n'avait pas été régulé par des tarifs de rachat, mais directement fixé par les marchés. Dans un scénario de développement massif du biogaz pour la décarbonation, il semble envisageable que les tarifs de rachat perdent en importance (ceux-ci ont pour but d'accélérer le développement d'une filière à ses débuts). Le risque de remise en cause directe de la hiérarchie des usages deviendrait alors bien réel en cas de crise des prix de l'énergie.

On comprend par ces exemples simples que la manière dont les contrats de rachat du biométhane seront conçus aura une incidence importante sur les usages de la biomasse qui seront privilégiés. Cette question sera abordée dans la section concernant le rôle de l'Etat dans la gouvernance de la biomasse.

B. Les différentes composantes du système agro-énergétique sont fortement exposées au risque de variabilité de la quantité disponible de matière première

Essayons maintenant de comprendre comment cette variabilité de la ressource en biomasse et les dynamiques de prix impacteront différents acteurs de la biomasse, si ces questions ne sont pas anticipées dans les stratégies de décarbonation mises en place actuellement. Que se passerait-il en cas de très mauvaise année de récolte aux environs de 2050 ? Et en cas de sécheresse pluriannuelle provoquant des rendements inhabituellement bas plusieurs années consécutives ? - De la science-fiction ? On peut en douter au vu des schémas répétitifs de sécheresses de ces deux dernières années, et les exemples de conflits d'usages déjà existants (mais pour l'heure encore ponctuels) que nous avons pu constater lors de nos entretiens, comme dans les Ardennes à l'été 2022.

Une tension sur la matière première n'aura pas le même effet sur les différents maillons du système agro-énergétique tel que la SNBC l'imagine à horizon 2050. En particulier, suivant la forme de biomasse énergie les impacts vont varier.

➤ Les bioénergies agricoles solides pour la combustion : les agro-granulés

Parallèlement aux valorisations liquides et gazeuses de la biomasse agricole, certains acteurs commencent à s'intéresser à la valorisation en combustible des résidus les plus secs, qui permet parfois d'en tirer un rendement énergétique plus élevé. C'est par exemple le cas de RAGT Energie, qui produit des « agropellets » (granulés issus de résidus agricoles) pour alimenter les réseaux de chaleur de la Défense (FREMAUX, COLLIN, et YON 2023). En cas de mauvaise année de récolte, les résidus de culture seront également disponibles en quantité moins importante et l'activité de transformation des résidus en granulés sera donc nécessairement affectée. Le principal conflit d'usage susceptible d'apparaître sera alors entre l'utilisation énergétique et les retours au sol, nécessaires pour l'agronomie et la préservation de la matière organique.

Cependant, du fait d'une grande flexibilité sur la matière première - n'importe quel résidu de culture pouvant être adapté en agro-granulés moyennant une formule chimique ad hoc - la biomasse énergie solide devrait être moins impactée que les autres productions énergétiques en cas de succession de mauvaises récoltes.

➤ Les bioénergies agricoles liquides : les biocarburants

L'analyse des risques causés par la variabilité mérite également d'être confrontée à nos usages actuels de biocarburants. Bien sûr, il est très probable voire souhaitable que ceux-ci évoluent dans les années à venir, mais également qu'ils s'élargissent à d'autres modes de transport que le transport routier. Les biocarburants de première génération, issus de cultures dédiées (donc en concurrence directe avec la production alimentaire) et au bilan carbone discutable³, pourraient s'effacer au profit des biocarburants de deuxième génération, issus de déchets, de résidus ou de biomasse ligneuses, si les technologies de production associées atteignent un niveau de maturité technique et économique suffisant pour être déployées à large échelle. Toutefois un raisonnement sur la filière biocarburant telle qu'elle est aujourd'hui est déjà instructif.

Ainsi, quelle part des biocarburants consommés en France aujourd'hui provient de productions agricoles originaires d'Europe, voire du territoire métropolitain et des pays limitrophes et pourrait donc être très fortement impactée dans le cas d'un événement extrême comme une sécheresse pluri-annuelle ?

Les données détaillées disponibles sur les biocarburants incorporés en France en 2020⁴ (DGEC 2022), permettent très rapidement de calculer cette exposition au risque de la filière. Les biocarburants en France en 2020 étaient de deux filières principales, gazole et essence, elles-mêmes issues de différentes sous-filières comme le décrit le tableau ci-dessous. Ils représentaient en 2020 **8.57% du volume de carburants mis à la consommation en France** (4063 millions de litres sur une consommation globale de 47400 millions de litres).

Type de biocarburant	Filières	Principaux intrants
Gazole	EMAG (esther méthyliques d'acides gras) Huiles végétales hydrotraitées	Colza (64%), Soja (23%), Huiles alimentaires (7%), Graisse animale (4%), Tournesol (2%)
Essence	ETBE (Ethyl Tert Butyl Ether) Ethanol Huiles végétales hydrotraitées	Maïs (39%), Blé (27%), Betterave (12%), Égouts pauvres (9%), Résidus viniques (5%), Autres (7%)

Tableau 7 : Filières et sous-filières des biocarburants incorporés en France en 2020, avec les principaux intrants (en gras ceux d'origine primaire agricole). D'après (DGEC 2022).

³ En particulier à cause des effets de changements indirects d'usage des sols : les terres ne servant pas à produire des denrées alimentaires en France réduisent les quantités d'aliments disponibles sur le marché mondial et appellent à produire les quantités manquantes ailleurs, ce qui peut induire, indirectement, de la déforestation pour libérer de nouvelles terres.

⁴ Il est à noter que les données 2020 en volume sont moins importantes que les années précédentes ou suivantes à cause de l'effet de la covid19. Mais ceci n'a pas d'importance car en proportion de la consommation nationale, la part de biocarburant est restée constante en 2020, et nous nous intéressons ici aux données relatives. Par ailleurs, les données plus récentes n'étaient pas disponibles à la date de rédaction du présent rapport, et les données 2019 présentaient d'autres biais (biocarburants à l'huile de palme encore autorisés).

Nous nous sommes intéressés à la part en volume de ces biocarburants qui est d'origine agricole, et pour celle-ci, à la provenance géographique de ces intrants. Trois catégories ont été calculées : la part agricole provenant d'Europe, celle provenant de France et des pays limitrophes (Allemagne, Espagne, Italie, Belgique), et enfin celle provenant du territoire métropolitain. Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

<i>En millions de litres</i>	Production 2020	Dont volume d'origine agricole européenne	Dont volume d'origine agricole de France et des pays limitrophes	Dont volume d'origine agricole de France
Gazole	2978	1395 (47%)	917 (31%)	784 (26%)
Essence	1085	931 (86%)	628 (58%)	574 (53%)
Total biocarburants	4063 (100%)	2326 (57%)	1545 (38%)	1358 (33%)

Tableau 8 : Part des biocarburants incorporés en France en 2020 d'origine agricole, par origine, d'après (DGEC 2022).

Ainsi, ce travail permet de constater que 57% des biocarburants consommés en France en 2020 (représentant 5% de la consommation de carburants globale française) étaient d'origine agricole européenne. Si l'on peut d'une part se féliciter sur le critère d'autonomie stratégique et de fourniture d'énergie locale (quoique qu'une part conséquente des volumes de colza et de maïs venaient d'Ukraine), on peut noter qu'en cas d'événement climatique extrême touchant l'ensemble du continent, c'est une part très importante des biocarburants consommés en France qui serait impactée. Le risque augmente en resserrant le rayon géographique considéré, ainsi 38% des biocarburants consommés en France étaient soit d'origine agricole française (33%) soit des pays limitrophes (5%), dont les corrélations de pertes de récolte en cas d'événement climatique extrême sont fortes. Même si ces volumes représentent respectivement seulement 3.3% et 0.4% de la consommation de carburant globale nationale pour 2020, nous montrons ici le risque auquel est exposé l'ensemble d'une filière de biomasse énergie. Par ailleurs, le taux d'incorporation des biocarburants étant plafonné réglementairement, l'exposition au risque décrite ici devrait se maintenir dans les années à venir, à moins d'une évolution réglementaire concernant les biocarburants de première génération.

➤ Les bioénergies agricoles gazeuses : le biogaz des méthaniseurs



Figure 13 : Illustrations de méthaniseurs - photos des visites terrains (LEPAGE 2023; QUAACK 2023).

Il existe aujourd'hui deux modèles de méthanisation : les méthaniseurs fonctionnant en cogénération, souvent de petite taille, qui produisent de l'électricité et récupèrent la chaleur résiduelle pour d'autres usages, et les méthaniseurs en injection, de plus grande taille, qui doivent purifier le biogaz produit pour obtenir du biométhane qui sera injecté sur le réseau de gaz.

Du fait de l'existence d'autres technologies plus efficaces pour produire de l'électricité décarbonée (éoliennes, panneaux photovoltaïques, nucléaire, etc.) (ALATERRE, HERER, et VILLEREZ 2015), **le modèle en injection devrait être privilégié dans une optique de décarbonation**, d'autant plus que le biométhane produit se substitue directement au gaz fossile.

Nous sommes convaincus que la biomasse énergie destinée à **la méthanisation est la plus exposée au risque de tension sur la ressource**. Cela est dû à deux facteurs qui verrouillent le système et obligent aujourd'hui les méthaniseurs à fonctionner à plein régime, même si les intrants agricoles viennent à manquer ou à être très coûteux.

Le premier facteur est **économique et contractuel**. En effet, les méthaniseurs en injection représentent un investissement initial important pour un agriculteur, de l'ordre de 4 à 5 millions d'euros environ (LEPAGE 2023) et il doit donc tourner en continu pour permettre à leur propriétaire de rentabiliser leur investissement et rembourser leurs échéances de prêts bancaires. Même alors, la taille de l'installation implique des coûts de fonctionnement importants et un manque à gagner considérable en cas d'arrêt. A cela s'ajoute un contrat d'injection imposant à l'agriculteur d'injecter chaque année un volume minimal de gaz sur le réseau.

Par ailleurs, outre le facteur économique, un facteur **technique** pousse les méthaniseurs à ne jamais s'arrêter et entraîne donc un risque fort en cas de pénurie d'intrants à méthaniser. Les méthaniseurs ne sont pas conçus pour s'arrêter régulièrement pendant de longues périodes. Si une situation de tension sur la ressource devait conduire à l'arrêt d'un méthaniseur (dans le cas d'une méthanisation à l'herbe ou d'une méthanisation comportant peu ou pas de déjections d'élevage), alors son redémarrage serait handicapé par plusieurs facteurs : le déséquilibre des populations microbiennes essentielles à la décomposition de la matière organique, le déséquilibre des paramètres opérationnels comme la température, le pH, l'humidité et la concentration en nutriments, l'accumulation de matières inertes indésirables dans les conduites, et enfin la formation de mousse et de dépôts visqueux pendant l'arrêt. Les opérations de redémarrage après un arrêt long sont donc coûteuses en main d'œuvre, pour le nettoyage et la purge de l'installation, et en temps avant de retrouver un bon équilibre physico-chimique synonyme d'une bonne production de biogaz.

En résumé, face à une pénurie de biomasse prolongée, les perspectives pour le propriétaire du méthaniseur sont peu réjouissantes :

- il peut aller chercher la biomasse ailleurs pour tenter de maintenir sa production, exacerbant au passage les **conflits avec d'autres usages, notamment les fourrages**, la grande majorité des intrants agricoles pour la méthanisation pouvant également servir à l'alimentation animale (cultures, résidus de culture, herbe, déchets de l'industrie agro-alimentaire ...). Il prendra de plein fouet l'augmentation des prix de la ressource et contribuera à faire augmenter les prix des fourrages pour les éleveurs de la région. Par ailleurs, à l'échelle d'un territoire, **les méthaniseurs se feront concurrence entre eux** pour l'accès aux intrants agricoles (conflits déjà constatés localement par des énergéticiens comme ENGIE (HOLLEAUX et al. 2023)), potentiellement au détriment de la petite méthanisation agricole.

- s'il ne parvient plus à s'approvisionner en biomasse à méthaniser, son installation pourrait cesser d'être rentable. Et si la digestion s'arrête totalement, le redémarrage du méthaniseur représentera un défi important.

De plus, comme souligné par Pierre-Marie Aubert, directeur des politiques alimentaires et agricoles à l'IDDRI (AUBERT 2023), cette incitation à produire entraîne des cercles vicieux et des risques en cascade pour la biodiversité et la transition écologique. En effet, aucun acteur ne se risquera à faire fonctionner un méthaniseur sur la base d'une récolte de CIVE ou d'herbe aléatoire, et ce même si ce sont des gisements à fort potentiel pour la méthanisation. Les financeurs de projets inciteront les approvisionnements à être sécurisés ; et par là, à faire opter pour des systèmes qui offrent plus de garanties, comme les cultures dédiées dans la limite réglementaire, ou les cultures recourant à l'irrigation, aux engrais et aux produits phytosanitaires, accentuant ainsi les conflits d'usages et les impacts environnementaux.

Cette partie souligne l'existence et l'importance des risques structurels à plusieurs niveaux liés à la variabilité de la biomasse agricole dans un système qui souhaite se reposer de plus en plus sur elle pour les usages énergétiques. En cas de mauvaises années consécutives pour les récoltes, une **remise en cause de la hiérarchie des usages** pourrait se produire, associée à un risque de spirale inflationniste⁵. Des **manques locaux de ressources** pourraient apparaître, accentuant des conflits d'usages et menaçant économiquement les acteurs les plus faibles (éleveurs, petits méthaniseurs, ...). Enfin, un **risque de pénurie à l'échelle nationale** n'est pas à exclure.

Il existe néanmoins des solutions pour s'adapter à cette variabilité. Certaines viennent du monde agricole et de sa capacité à s'adapter aux variations des rendements des récoltes, qui ont toujours existé. Mais face à un problème nouveau qui va se poser notamment pour les usages énergétiques de la biomasse, il sera légitime d'aller également chercher l'inspiration dans un autre système énergétique aux problèmes similaires et connus depuis plus longtemps : le réseau électrique. En effet, ce dernier a développé des stratégies pour gérer des situations de production variables et intermittentes et pour empêcher une situation de pénurie, dite de « *black out* ». Ces méthodes, appliquées toute proportion gardée au secteur de l'agriculture, donnent de nouvelles voies innovantes pour pallier la variabilité de la biomasse énergie.



V. Bâtir la résilience du système agro-énergétique pour prévenir la variabilité et limiter ses impacts

⁵ Une augmentation des prix de l'énergie qui entraînerait une réorientation à grande échelle de biomasse alimentaire ou fourragère vers des usages énergétiques induirait vraisemblablement une augmentation des prix des denrées alimentaires, comme observé en 2007-2008. Un recours accru à la biomasse-énergie pourrait renforcer les interconnexions entre les différents cours et le risque de "spirale inflationniste."

La résilience du système agro-énergétique face à la variabilité de la biomasse agricole sera basée sur des actions ciblées provenant de l'ensemble des acteurs de la chaîne de valeur, celle-ci pouvant être résumée à l'extrême comme sur le schéma ci-dessous, où la ressource primaire en biomasse, après avoir été produite, est transformée en bio-énergies, qui sont ensuite amenées à leurs consommateurs.

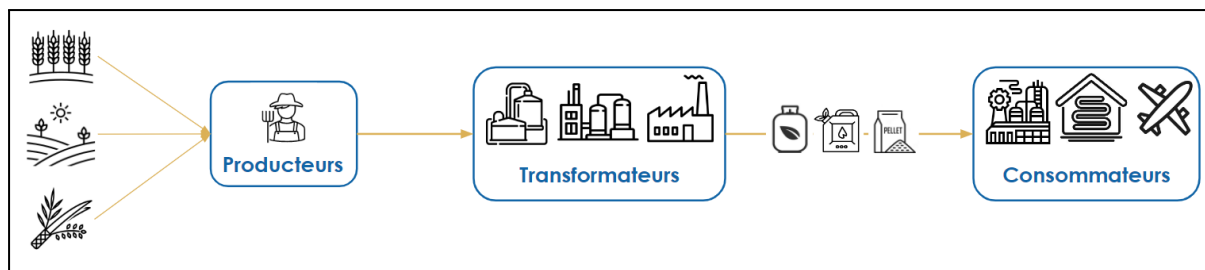


Figure 14 : Schéma très simplifié de la chaîne de valeur du système agro-énergétique.

A. Des solutions inspirées du monde agricole

Comme évoqué précédemment, la question de la variabilité de la production n'est pas nouvelle pour le monde agricole, qui a peu à peu développé un éventail de solutions pour en limiter les effets. L'objet de cette partie est de les revisiter dans le contexte nouveau de production de biomasse-énergie. Focalisons nous donc d'abord sur les leviers à la main du premier maillon de la chaîne du système agro-énergétique : ceux des producteurs de biomasse.

➤ Pratiquer une agriculture résiliente et limiter son exposition aux risques en utilisant à la fois les pratiques agro-écologiques et les nouvelles technologies

Dans leur mémoire de fin d'étude (MERCIER et REISS 2021) piloté par Jean-Marc Jancovici, Corentin Reiss et Antoine Mercier décrivent comment deux modèles agricoles distincts, industrialo-technique et agro-écologique, pourraient permettre de maintenir une production de biomasse importante malgré le réchauffement climatique. Le modèle industrialo-technique pourrait être caricaturé par de grandes étendues de cultures identiques, une forte automatisation et un recours accru à des nouvelles technologies, notamment dans le domaine de la génétique. Au contraire, le modèle agro-écologique serait basé sur un ensemble de pratiques agricoles respectueuses de l'environnement, en cherchant à diversifier les cultures implantées sur une même parcelle et en faisant appel à l'agroforesterie et à l'implantation de haies pour enrichir la biodiversité des agrosystèmes et assurer une régulation locale du cycle de l'eau et de certains nutriments (les racines des arbres permettent de faire remonter en surface le phosphore indispensable à la croissance des cultures).

Les deux modèles extrêmes présentent des avantages et inconvénients largement détaillés par Reiss et Mercier pour garantir une production moyenne suffisamment élevée. Mais si l'on s'intéresse à la variabilité et à la résilience face aux aléas climatiques, le modèle industriel atteint rapidement ses limites pour plusieurs raisons (DRON 2023) :

- le modèle de monoculture est particulièrement sensible aux maladies et aux ravageurs qui se diffusent rapidement d'un plant à l'autre ;
- l'utilisation d'engrais fragilise les cultures et renforce le recours aux produits phytosanitaires ;

A l'inverse, l'association de plusieurs cultures sur une même parcelle ou les pratiques de l'agriculture biologique permettent d'augmenter leur résilience face aux sécheresses. En effet, la réduction du travail du sol et l'augmentation du couvert végétal permettent aux cultures de bénéficier du double effet d'une évapotranspiration de surface réduite et de sols non dégradés qui maintiennent davantage d'eau interstitielle (DRON 2023; KAPSAMBELIS 2022).

Il s'agit pour l'agriculteur d'inclure comme critère de choix pour la mise en place de ses rotations les notions de risque et de résilience face aux aléas. Certaines cultures sont moins risquées que d'autres car elles ne poussent pas aux mêmes périodes et sont moins soumises aux sécheresses. Dans la section de ce rapport sur la quantification du gisement des CIVE, nous avons ainsi expliqué pourquoi les CIVE d'hiver sont plus « sûres » que celles d'été, aux résultats de récolte beaucoup plus aléatoires, et pour lesquelles certains agriculteurs ne veulent pas gaspiller leur temps et leurs efforts (QUAAK 2023).

Par ailleurs, il est bien connu du monde de l'assurance aux agriculteurs que des exploitations qui ont un large étalement géographique et/ou une diversification du type de terres (par exemple certaines sur des crêtes, d'autres en fond de vallée ou en bord de forêt) réduisent leur exposition au risque. Les agriculteurs disposent enfin d'un panel d'outils et de connaissances agronomiques théoriques et empiriques sur les dates de semis et de récoltes, qui leur permettent de limiter l'exposition de leurs cultures à certains aléas climatiques comme le gel tardif, la grêle ou de trop fortes précipitations. Évidemment, dans un contexte de changement climatique, ces connaissances agronomiques seront à faire évoluer et à adapter au nouveau climat.

Encadré 3 : l'agri-voltaïsme comme assurance récolte ?

Certains énergéticiens évoquent l'agri-voltaïsme comme solution potentielle pour limiter l'impact d'aléas climatiques. Il s'agit, en général, d'implanter des rangées de panneaux solaires espacées au-dessus des terres agricoles ou d'élevage, afin de produire de l'énergie tout en offrant de l'ombre aux cultures ou aux animaux qui en ont besoin.

Certains travaux de recherche en cours chez les énergéticiens, notamment TotalEnergies (DRAHI 2022), suggèrent que la mise en place des panneaux pourrait créer une sorte de microclimat à l'échelle de la parcelle, susceptible de protéger les cultures du gel et de retenir l'humidité au niveau du sol pendant les périodes de fortes chaleurs, favorisant notamment la pousse de l'herbe dans les prairies.

Pour la plupart des cultures cependant, l'implantation de panneaux solaires devrait entraîner une baisse du rendement moyen, largement compensée financièrement pour l'agriculteur, mais qui soulève tout de même la question de l'usage prioritaire des terres arables (sauf cas de déploiement sur les prairies permanentes, en association avec un cheptel ovin ou bovin). Le développement de l'agri-voltaïsme sur les surfaces de grandes cultures fait également émerger des défis techniques pour permettre le passage d'engins agricoles de grande taille.

Par certains aspects, les effets de l'agri-voltaïsme pourraient s'apparenter à ceux de l'agroforesterie avec plusieurs nuances à apporter :

- si tous deux permettent d'associer une production énergétiques aux productions agricoles, le rendement énergétique rapporté à la surface est plus intéressant pour le déploiement de panneaux solaires ;

- en revanche, l'agri-voltaïsme ne rend pas les services écosystémiques de l'agroforesterie et ne remplit pas l'office de « pompe à phosphore »⁶
- l'acceptabilité de l'agri-voltaïsme pourrait être limitée par les réticences à couvrir des surfaces agricoles alors que des surfaces déjà artificialisées restent disponibles pour accueillir des panneaux solaires.



7

➤ En partenariat avec les organismes de recherche, développer et appliquer de la R&D sur les nouvelles cultures

La R&D constitue également un levier évident sur lequel s'appuyer pour adapter la production agricole au réchauffement climatique. Historiquement, la sélection génétique a permis à l'homme d'augmenter la production en développant des espèces plus adaptées à ses besoins, par leur goût, leur croissance rapide ou leur rendement. Lors du siècle dernier, la plupart des céréales ont peu à peu été sélectionnées pour maximiser la production de grains et minimiser la production de pailles et de résidus, ce qui a contribué à l'explosion des rendements après la seconde guerre mondiale (les rendements en blé ont été multipliés par 7, également boostés par le recours accru aux engrais et à la mécanisation).

L'enjeu est aujourd'hui différent, mais la sélection génétique et l'utilisation de nouvelles essences plus résilientes aux maladies ou moins consommatrices d'eau aura sans aucun doute un rôle à jouer. En particulier, la question du recours aux NBT (« *New Breeding Technologies* » qui consistent en une intervention ciblée sur le génome des plantes grâce à des techniques de « ciseaux moléculaires » aux effets très prometteurs pour l'adaptation des cultures au changement climatique (MERCIER et REISS 2021)) devrait émerger prochainement dans le débat public.

La pratique des cultures intermédiaires en est encore à ses débuts et nos entretiens sur le terrain nous ont permis de constater que les agriculteurs testent de nombreuses variétés venant de l'étranger pour identifier les plus prometteuses dans le contexte du changement climatique (QUAAK 2023; LEPAGE 2023) : moutardes anti-nématodes, ray-grass d'Afrique du Sud adapté aux fortes chaleurs, seigle de Mongolie, avoine brésilienne, sorgho, tournesol, etc.

⁶ La croissance des végétaux s'appuie sur plusieurs nutriments du sol, parmi lesquels l'azote et le phosphore. Si l'azote est en général présent dans les couches supérieures du sol, le phosphore est en général plus profond, à proximité de la roche mère. Les racines des arbres, plus profondes que celles des cultures agricoles, contribuent à le faire remonter vers la surface et à le rendre accessible.

⁷ Lien des images : <https://www.environnement-magazine.fr/energie/article/2021/01/19/131995/une-charte-sur-agrivoltaisme-voit-jour>, <https://www.lafranceagricole.fr/agrivoltaisme/article/768025/un-partenariat-pour-l-agrivoltaisme-entre-la-fno-et-enoe>

Des innovations seront enfin nécessaires du côté des engins agricoles pour permettre le recours à de nouvelles pratiques culturales. En particulier, l'association de plusieurs cultures complémentaires poussant en parallèle sur une même parcelle pourrait augmenter localement la production de biomasse jusqu'à 40% (DRON 2023; SOLAGRO 2016), mais cela impliquera d'adapter la mécanisation de la récolte, pour ne récolter qu'une variété à la fois ou pour être capable de séparer les produits collectés.

➤ Adopter un modèle économique d'exploitation structurellement excédentaire

D'autres leviers de la résilience peuvent s'appuyer sur une évolution des modèles économiques des exploitations agricoles. L'agriculteur peut par exemple chercher à produire un volume supérieur à ce qu'il s'est engagé à vendre. Il ne le fera qu'à condition que cela soit rentable, qu'il ait la trésorerie pour acheter plus de graines, et qu'il ait le temps, la main d'œuvre et les machines nécessaires pour pouvoir cultiver un surplus de terres.

Dans son rapport intitulé « Les prairies et l'élevage des ruminants au coeur de la transition écologique » (LA FABRIQUE ECOLOGIQUE 2022), La Fabrique Ecologique envisage de rediriger un cheptel bovin qui se réduit vers les prairies permanentes et de limiter les problèmes liés à la variabilité de leur productivité par un modèle d'exploitations structurellement excédentaires, où la partie variable de la production est orientée vers des méthaniseurs. Cela implique certes la mise en place de partenariats souples avec des acteurs prêts à accepter un approvisionnement aléatoire, mais le renversement de la logique de vente, passant d'une gestion des pertes à une gestion des excédents, pourrait contribuer à un lissage dans le temps des difficultés pesant sur ces exploitations.

Plutôt que de contractualiser des volumes plus faibles, une autre option pourrait être de chercher à produire plus (en moyenne) sur les mêmes surfaces. Dans le rapport commun (BACHMANN et al. 2023), nous avons montré qu'il reste un certain potentiel sur les exploitations agricoles françaises pour produire davantage de biomasse, à condition de le faire durablement et avec certaines limites, notamment grâce au potentiel des cultures intermédiaires d'hiver et de la récupération de certaines terres utilisées aujourd'hui pour l'élevage (soit en pâturages soit en fourrages).

Gérer la variabilité consistera quoi qu'il en soit aussi à gérer les pointes de production (de même que les électriciens doivent gérer les pointes d'électricité solaire), à être capable de récolter la biomasse quand elle est produite en masse pour remplir des stocks ensilés (et à bien les gérer ensuite pour éviter les pertes) ou à faire tourner à pleine capacité les méthaniseurs pour remplir les stocks de biogaz. Le stockage est déjà une pratique répandue en agriculture à l'échelle saisonnière, notamment chez les éleveurs qui nourrissent leur bétail l'hiver avec les fauches de l'été précédent. Il s'agit ici d'adapter cette démarche sur un temps plus long, à l'échelle interannuelle. Le défi du stockage sera repris dans la section suivante sur les solutions tirées du monde de l'électricité.

B. L'énergie et l'électricité : deux secteurs inspirants dans la gestion de l'intermittence et la sécurisation des approvisionnements

Comme nous l'avons vu, le monde agricole a l'habitude de la gestion de la variabilité des récoltes dans le domaine alimentaire, et de nombreuses pratiques et techniques du secteur permettront, si elles sont encouragées, de renforcer la résilience du système agricole lié à la production énergétique.

Intéressons nous à présents aux leviers qui concernent l'ensemble de la chaîne de valeur du système agro-énergétique et non seulement les producteurs de biomasse, et pour cela, inspirons nous du secteur énergétique.

Le monde de l'énergie a en effet l'habitude de devoir composer avec des risques sur l'approvisionnement en productibles (par exemple des énergies fossiles gaz et pétrole), ou encore avec l'intermittence de la production énergétique (comme les renouvelables électriques). Nous nous sommes intéressés aux parallèles qu'il est possible de faire entre ces deux mondes et voir quels enseignements le secteur émergent de la biomasse agricole pour l'énergie pouvait tirer des stratégies de résilience du secteur électrique, plus mature.

Il est d'ailleurs notable que la biomasse est généralement considérée, via la production de biogaz, comme étant capable d'aider à remédier à l'intermittence des renouvelables électriques. Nous avons montré précédemment que ce raisonnement ne peut tenir qu'en cas de bonnes récoltes agricoles et que la forte variabilité interannuelle et inter-saisonnière de la production de biomasse en fait une ressource clé pour la transition, mais dont il faut mesurer les limites, la variabilité étant trop souvent négligée dans ses stratégies de développement.

Le secteur de l'électricité utilise principalement trois grands leviers pour remédier à l'intermittence des énergies renouvelables : le stockage, la diversification des sources de production d'électricité et le foisonnement géographique et enfin les interconnexions avec les autres pays européens (DARTOIS et SUDERIE 2022). Voyons comment chacun de ces leviers peut s'appliquer à la biomasse énergie.

➤ Le stockage

Pour le système électrique, le levier du stockage n'est pas le plus évident car l'électricité se stocke mal. En France aujourd'hui, nos capacités de stockage électriques sont très majoritairement représentées par les barrages hydrauliques, en attendant que de nouvelles technologies de batteries se développent afin de pallier l'intermittence des énergies renouvelables sur une échelle de quelques heures. En revanche, les énergies fossiles se stockent très bien. Pour le gaz naturel, la France dispose de 130 TWh de capacités de stockage souterrain de gaz (soit environ un tiers de sa consommation annuelle), et pour le pétrole, la France dispose de stocks stratégiques permettant de couvrir environ 3 mois de consommation.

Ainsi, sans surprise, la biomasse une fois transformée en énergie, que ce soit du biogaz, du biocarburant ou des agro-granulés (cf encadré ci-dessous), se stocke particulièrement bien. A l'avenir, avec la réduction de consommation des énergies fossiles, on peut sans peine imaginer que les capacités de stockage de gaz et de carburants liquides français seront dévolus aux bioénergies (à condition toutefois qu'elles soient conservées). Pourtant, les quelques mois de consommation que représentent ces stocks pourraient ne pas être suffisants en cas de forte tension pluriannuelle sur les intrants en biomasse primaire, qui empêcheraient une reconstitution de ces stocks.

Le sujet du stockage pour la biomasse énergie s'applique donc en amont de la production de bioénergie, à la fois aux possibilités de **stockage des intrants agricoles eux-mêmes**, et éventuellement à l'**eau** nécessaire à l'irrigation des plantations pendant les mois les plus secs de l'année.

En ce qui concerne le stockage de céréales, FranceAgriMer estime que les capacités de stockage à la ferme des agriculteurs français sont de 31 millions de tonnes, soit la moitié de la collecte française de céréales (TIERS 2022). Un agriculteur sur deux disposerait d'un espace de stockage. De plus, les coopératives agricoles disposent également de leurs propres capacités de stockage. Le sujet du stockage des productions agricoles pour remédier à la variabilité et la saisonnalité des productions en plus de leur disparité géographique n'est donc pas nouveau mais au contraire bien connu de la profession (GIRARD et MASSON 2022)⁸.

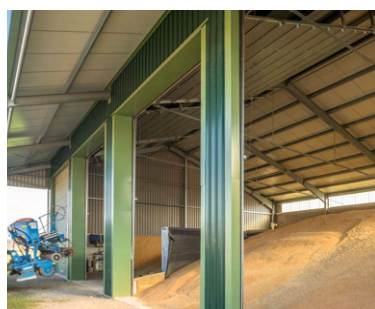
Ces stocks peuvent d'ailleurs être faits par tous les acteurs de la chaîne de la biomasse énergie : par les agriculteurs producteurs de biomasse ou par les énergéticiens qui la transforment en bioénergie. Il semble d'ailleurs que les capacités de stockage de biomasse en France soient assez importantes, ce qui permet à des énergéticiens de racheter certains sites et de les adapter au stockage particulier de biomasse énergie (CAMPARGUE 2023), malgré la tendance au renforcement de l'autonomie alimentaire dans les élevages qui devrait conduire à des besoins accrus de capacité de stockage de fourrages (MORISSET 2017).

Nous avons pu constater la présence de ces zones de stockage dans les exploitations d'élevage et de méthanisation que nous avons visitées dans le cadre de ce travail de mémoire : des stocks de céréales, de cultures intermédiaires et d'herbe ensilées étaient utilisés. Pour un des élevages visités, nous avons vu des capacités de stockage correspondant à 6 mois d'alimentation du cheptel.

Encadré 4 : illustration des principales techniques de stockage agricole⁹



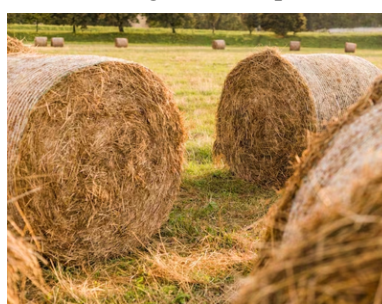
Stockage en silos



Stockage en entrepôt



Stockage en tas



Stockage en meules

⁸ Benoit Girard nous a ainsi montré sur son exploitation des dizaines de tonnes de betteraves qu'il stocke afin de pouvoir les vendre toute l'année pour répondre aux besoins de la grande distribution alors que la récolte a lieu à date fixe chaque année.

⁹ Lien des images : <https://www.aquaportail.com/definition-6723-silo.html>, <https://www.haltec.fr/reference/entrepot-de-vrac-056/>, <https://fr.freepik.com/photos-vecteurs-libre/meule-de-foin/19>, <https://fr.wikipedia.org/wiki/Ensilage#/media/Fichier:Fahrsilo.JPG>, <https://chambre-froide.pro/comment-conserver-les-fruits-et-legumes-dans-une-chambre-froide/>



Ensilage



Chambres froides

Néanmoins il subsiste de nombreux enjeux du stockage d'intrants agricoles, similaires aux considérations sur le stockage de l'électricité : coût, énergie (quel volume de quel intrant peut-on stocker), puissance (à quelle vitesse on peut ensuite puiser dans le stockage, l'accessibilité de la ressource stockée), durée dans le temps (combien de temps la production agricole peut-elle se stocker sans s'abîmer), et rendement (quelle perte de pouvoir méthanogène).

Le coût de mise en place des techniques de stockage (silos de report, dalles, murs, plateformes, cellules métalliques, etc), peut être un frein pour certaines exploitations. Par ailleurs, moins le stockage est cher à installer et à maintenir, plus il existe de risques de pertes de quantité et de qualité des produits stockés à cause d'un moins bon contrôle des conditions environnementales (température, humidité, ventilation) : infestation par des insectes, rongeurs, maladies, moisissures, pourritures.

Par exemple dans le cas de la méthanisation, la saisonnalité des CIVE implique de les conserver et d'avoir recours à des techniques de stockage. Des études montrent qu'avec un mauvais stockage, jusqu'à 25% de la matière récoltée peut être perdue par pourriture (BLANCHET et GUERAULT 2022), ce qui montre l'enjeu absolument considérable de cette étape dans la chaîne de valeur de la biomasse énergie. Généralement les CIVE sont conservées par ensilage, une méthode de conservation humide en conditions acides dans un milieu anaérobie déjà utilisée pour les fourrages. Il y a alors une science et des techniques particulières à déployer pour assurer une bonne conservation de la matière sans dégradation de son potentiel méthanogène (gestion du jus d'ensilage, durée de conservation pour atteindre l'optimum chimique, etc), mais on peut toutefois noter que l'ensilage pour utilisation énergétique est moins difficile à gérer que pour l'alimentation animale (où il faut contrôler d'autres paramètres chimiques comme les acides acétiques qui ne gênent pas la méthanisation). Enfin, ce stockage est limité dans le temps, à une ou deux années maximum d'après les agriculteurs rencontrés dans le cadre du mémoire, la matière perdant fortement en qualité au-delà.

Encadré 5 : le stockage des agro-granulés pour sécuriser le chauffage du quartier de la Défense

RAGT et IDEX ont mis en place un stockage de 65 000 tonnes d'agro-granulés près de Chartres (CAMPARGUE 2023; FREMAUX, COLLIN, et YON 2023), ce qui représente plus d'une année de chauffage du quartier de la Défense et permet une résilience certaine face à d'éventuelles variabilités de disponibilité des résidus agricoles utilisés dans la production des agro-granulés.

Un des enjeux majeurs du stockage des matières premières agricoles consiste en la **conservation et la stabilisation de ces matières**. Les agro-granulés produits par RAGT Energie et utilisés par IDEX sur leur site de production de chaleur urbain à la Défense répondent à ce défi.

En effet, les agro-granulés sont homogènes, raffinés et stabilisés par le processus de « pelletization » qui permet de les stocker pendant une longue durée (de 12 à 18 mois) sans dégradation notable de la matière. En ayant des particules fortement comprimées, le granulé a peu de contact avec l'air et a donc peu de risques de s'oxyder. Par ailleurs, un second défi est la **densité** de la biomasse et le **volume requis** pour le stockage de la matière agricole. Les agro-granulés ont une densité de 650 kg/m³ en silos, à comparer par exemple avec du miscanthus ensilé (120 kg/m³) ou en balle (450 kg/m³), ce qui permet de limiter le besoin en espace de stockage (en contrepartie, cette masse volumique importante peut entraîner une dégradation mécanique des granulés stockés dans la partie inférieure du silos, ce qui limite la hauteur utilisable).

➤ La diversification des sources de production et le foisonnement géographique

Pour plus de résilience, le système électrique français mise sur différentes technologies de production complémentaires. Le même raisonnement peut s'appliquer à la biomasse énergie.

D'une part, les **systèmes de production d'énergie par la biomasse** ont tout intérêt à être **peu spécifiques et adaptables** à un maximum de sources d'intrants différentes, afin d'augmenter leurs chances de ne pas être soumis à une pénurie de certaines productions. Par exemple, les méthaniseurs doivent pouvoir adapter leur ration au productible disponible suivant les mois de l'année. Les énergéticiens ont aussi intérêt à diversifier leurs contrats d'approvisionnement en matières premières avec différents fournisseurs, si possible avec une certaine dispersion géographique dans un territoire donné pour limiter leur exposition au risque. Pour les biocarburants, le développement de la filière de seconde génération, reposant sur des ressources en biomasse qui ne sont pas en concurrence avec l'alimentation¹⁰, permettra aussi de diversifier la provenance des intrants.

Du point de vue de la consommation finale, la **diversification** s'opère également **sur les formes de biomasse énergie utilisées**, entre des usages solides (combustion), liquides (biocarburants) ou gazeux (biogaz). Ainsi on peut noter que la biomasse de cycle long comme le bois étant moins soumise aux aléas climatiques intra-annuels, son utilisation pour les usages où elle peut être employée (par exemple certains usages chaleur, etc...) est moins risquée que le recours à la biomasse agricole. Par ailleurs, les systèmes de biomasse énergie encore au stade de la R&D comme la gazéification hydrothermale et la pyrogazéification rendront possibles de nouvelles flexibilités de conversions entre certains intrants et les formes de biomasse énergie finale associées (comme par exemple produire du biogaz à partir de matière lignocellulosique comme du bois, ce qui n'est pas possible aujourd'hui, mais pourrait demain répondre à une demande de gaz en période de tension sur les récoltes agricoles).

En ce qui concerne le **foisonnement géographique**, l'idée pour les renouvelables électriques est de bénéficier à l'échelle d'un territoire (pays, voire continent) de conditions de vent et de soleil différentes et donc d'assurer une production moyenne à chaque instant. Ce levier est difficilement transposable directement à la production de biomasse énergie.

¹⁰ Voir la liste de l'annexe IX de la directive énergie renouvelable (2018/2001/CE) : Algues, déchets municipaux, biodéchets des ménages, déchets industriels impropres à l'alimentation, paille, fumier et boues d'épuration, effluents d'huileries de palme, huiles de cuisson usagées, graisse animale, bagasse, marcs de raisins et lies de vin, coques, déchets et résidus provenant de la sylviculture et de la filière bois (écorces, branches, produits des éclaircies précommerciales, feuilles, aiguilles, cimes d'arbres, sciures de bois, éclats de coupe), autres matières cellulosiques non alimentaires (miscanthus).

Certes un maillage plus fin du territoire avec des méthaniseurs permettra d'améliorer en partie la résilience de la production de biogaz. En effet des intrants différents pourront être utilisés selon les régions (céréales dans le nord, fourrages dans le massif central, etc.), ce qui limite les risques de mauvaises récoltes simultanées, même si une corrélation de l'ordre de 0,3 est observée entre les différents types de cultures à l'échelle nationale.

Cela ne résoudra pas complètement le problème exposé dans le rapport car une partie significative des mauvaises années pour une culture le seront à l'échelle nationale, comme par exemple les canicules et sécheresses de 2003 ou 2022 qui ont affecté la France entière ; voire européenne, car comme nous le montrons dans la suite, les productions agricoles de la France et des pays limitrophes sont significativement corrélées.

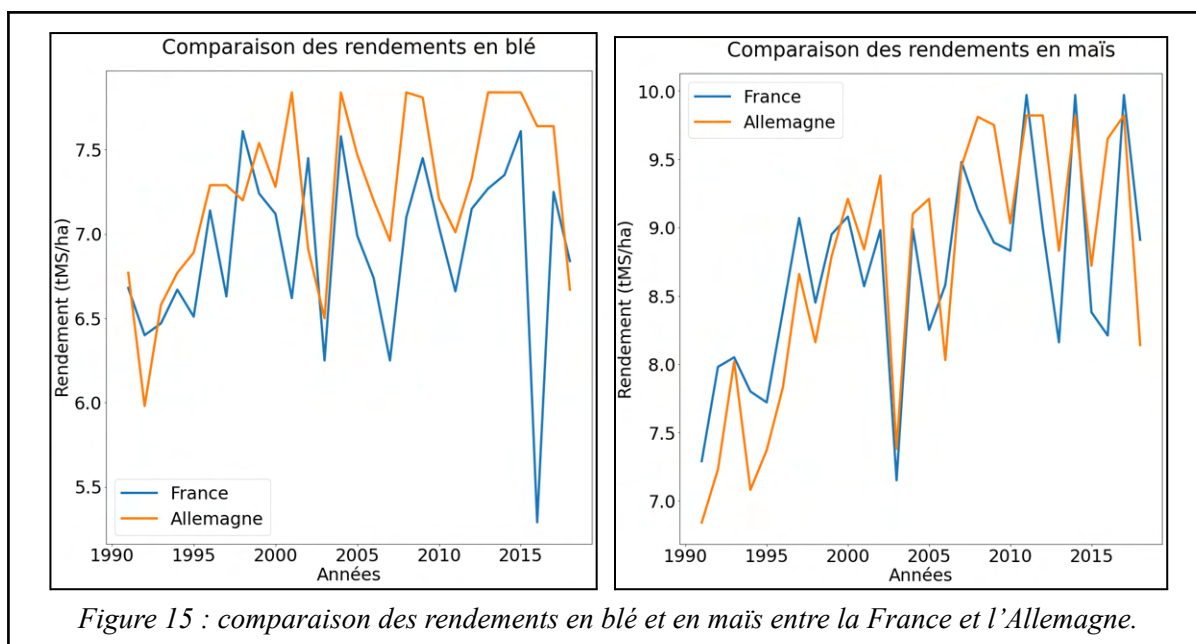
➤ Les interconnexions avec les autres pays

Les nombreuses interconnexions électriques et gazières avec les autres pays européens, ou pour le cas des énergies fossiles les terminaux d'échanges à l'échelle mondiale, sont d'autres moyens d'assurer la résilience du système énergétique.

En analysant les données disponibles sur les biocarburants consommés en France en 2020 (DGEC 2022), on note que les importations de cultures de l'étranger à vocation énergétique sont une réalité. Ainsi 97% du soja utilisé en intrant pour produire environ $\frac{1}{4}$ du biogazole consommé en France provient de l'étranger, essentiellement d'Amérique du Sud. De même, pour le colza, intrant de plus de 60% du biogazole consommé, 30% provient du Canada, 15% d'Ukraine, 7% d'Allemagne. En 2020, pour la filière bio essence, le maïs (40% des intrants) est en provenance d'Ukraine à 26%, d'Espagne et de Roumanie à 9%, de Bulgarie pour 6% et de Pologne pour 2%. Pourtant, en cas d'événement climatique extrême impactant les récoltes françaises, nous montrons dans l'encadré ci-dessous que les importations des pays limitrophes ne présentent qu'un potentiel limité.

Encadré 6 : dans quelle mesure pourra-t-on compter sur la solidarité européenne pour remédier aux années de mauvaises récoltes en France ?

Face à la variabilité du gisement, une solution envisageable pourrait être de se tourner vers nos voisins européens dans les années difficiles, soit pour s'approvisionner en matière première biomasse, soit directement en biomasse énergie comme du biogaz. Afin d'étudier la faisabilité de cette piste, nous nous sommes intéressés aux corrélations entre les rendements français et allemands dans le cas du blé et du maïs à partir des données de la FAO (RITCHIE, ROSADO, et ROSER 2022) (après soustraction des tendances de long terme). Ceux-ci sont respectivement de 0,53 et 0,56, ce qui suggère qu'un aléa climatique entraînant de mauvaises récoltes, a en général une extension spatiale qui dépasse l'échelle d'un pays. Une réponse à la variabilité par les recours à des importations devrait donc probablement être pensée à une échelle plus large que l'Europe.



Au-delà des corrélations entre les productions de biomasse des différents pays se posera la question du coût et de la faisabilité du transport. Dans le cas des biocarburants, l'échange international de biomasse est rendu possible par le faible coût du transport maritime et la localisation des bioraffineries à proximité des ports, en nombre limité. Par ailleurs, les importations internationales de biocarburants qui seraient produits dans d'autres pays du globe est également une possibilité, à condition de prendre en compte les effets de déforestation importée, sous peine de supprimer tous les effets positifs de la substitution de carburants sur les émissions de GES.

Pour la méthanisation, la situation est différente et deux possibilités peuvent être considérées : le transport d'un pays à l'autre de biomasse qui serait méthanisée à l'arrivée ou bien l'exportation d'une partie du biométhane produit localement. La première option est peu attrayante car la faible densité énergétique des intrants de méthanisation impliquerait des coûts élevés et des pertes d'énergie importantes lors du transport. Par ailleurs les unités de méthanisation sont fortement décentralisées et réparties sur le territoire, ce transport aurait donc lieu par camion, là aussi impliquant de forts coûts pour un bilan GES discutable. A la rigueur cette situation pourrait s'envisager pour des méthaniseurs industriels de grande taille situés à proximité des frontières ou des grands ports.

Le transport du biométhane vers la France est quant à lui peu cher et présente peu de difficultés techniques. Le réseau de gaz est construit avec des sens privilégiés (Est vers l'Ouest, Nord vers le Sud), avec un amont et un aval, ce qui place les pays européens dans des positions déséquilibrées. La France, en aval du réseau, pourrait donc importer facilement si sa production domestique diminue (et si les pays voisins sont en capacité d'exporter), mais serait limitée dans ses exportations par l'orientation des infrastructures actuelles. Par ailleurs, la production de biogaz étant décentralisée, la capacité de remonter du biogaz des réseaux de distribution aux réseaux de transport nécessitera des investissements dans des rebours, et au vu des projections fortement à la baisse de l'utilisation du gaz dans les années à venir, on peut se demander s'il sera encore rentable à horizon 2050 d'entretenir autant d'infrastructures gazières et un réseau aussi vaste.

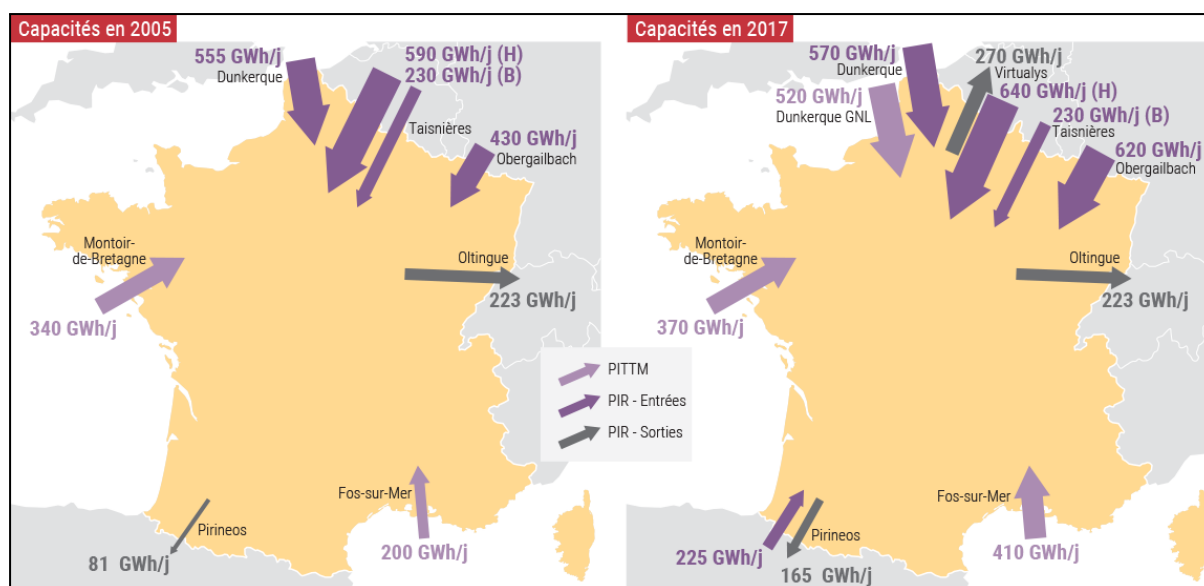


Figure 16 : interconnections du réseau gazier entre la France et ses voisins européens (CRE 2018).

Enfin, on peut questionner le réel surplus de biomasse qui serait disponible à l'étranger. L'Europe du sud, particulièrement exposée aux sécheresses, aura sans doute du mal à dégager de forts surplus, l'Allemagne aura son propre besoin domestique important de biomasse. Le potentiel pourrait surtout se situer en Europe de l'est (Pologne, Ukraine, Roumanie, Bulgarie, etc.) voire au Canada ou en Russie. En particulier, les hivers plus courts et plus doux dans ces deux derniers pays et les surfaces disponibles encore importantes pourraient y permettre une augmentation de la production agricole malgré le changement climatique. Mais il semble peu envisageable de compter en France sur la biomasse additionnelle, du fait de son éloignement ou du contexte géopolitique mondial.

Un dernier gisement pourrait enfin être trouvé dans les sous-produits issus des exportations françaises. La France exporte en particulier d'importants volumes de céréales et pourrait faire revenir les résidus non-utilisés par bateau. Cette option se heurte néanmoins à la question (évoquée précédemment) de la faible densité en valeur et en énergie des matériaux transportés.

L'ensemble des leviers de résilience présentés dans cette partie sont illustrés sur la ci-dessous. Beaucoup d'entre eux constituent des mesures préventives de bon sens, qui se heurtent cependant parfois à des limites physiques (dégradation de la qualité de la biomasse stockée après un certain délai) ou économiques (à court terme, certaines pratiques d'agriculture résiliente sont peu rentables, comme le passage en bio ou l'association de cultures). Aucun n'est donc une solution miracle permettant de résoudre seul les problèmes liés à la variabilité. Il faudra donc des efforts conjoints de tous les acteurs à chaque échelon de la chaîne de valeur pour que le système devienne suffisamment résilient. Le rôle de l'Etat, décrit plus en détails dans la section suivante, consistera donc à encourager ces efforts.

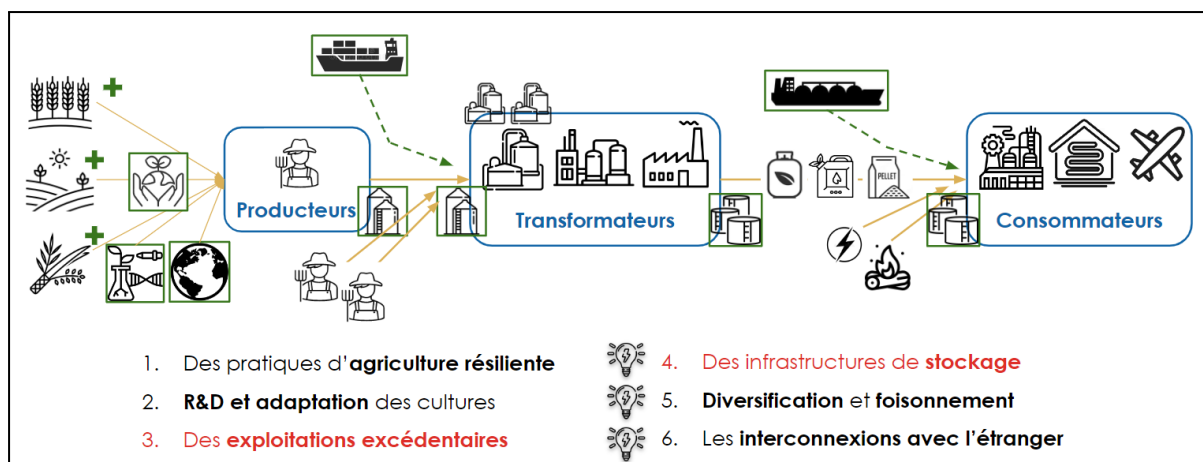


Figure 17 : cartographie des leviers pour augmenter la résilience de la production de bioénergies, à tous les niveaux de la chaîne de valeur du système agro-énergétique (en rouge les deux leviers pouvant sembler les plus efficaces).

C. Le rôle de l'Etat dans la résilience : garantir les bonnes conditions de marché

Dans sa stratégie de Bioéconomie de 2016 (MASA 2018), l'Etat français avait déjà pris acte avec justesse que les usages naissants de la biomasse, pour des secteurs telles que l'industrie et les transports devraient s'adapter à une production primaire variable : « Pendant la durée de vie des projets, des **formes de coordination** doivent être mises en place par l'amont et l'aval afin d'assurer les approvisionnements. Une **contractualisation équilibrée** peut faire partie des solutions permettant de mieux gérer les volumes, les qualités, les prix et de favoriser l'innovation collective. Ces relations doivent permettre à l'aval de tenir compte des **variabilités inhérentes à la production amont** (météorologie, maladies, évolution des systèmes de production...), tant en volume qu'en qualité, notamment dans le cas de matières très hétérogènes comme les biodéchets. [...] Réciproquement l'amont doit, dans les limites des contraintes qui lui incombent, mettre en œuvre des solutions pour se rapprocher des besoins des outils de valorisation. La recherche de ce dialogue renforcé peut se traduire par une consolidation des démarches de structuration des chaînes de valeur et des acteurs qui les portent (interprofessions, fédérations...).

Cela va à l'encontre de la tendance de l'industrie à standardiser les productions primaires pour les adapter à ses propres procédés (à l'image des systèmes agricoles, de pêche ou de foresterie fortement industrialisés). Pour Claire Tutenuit, déléguée générale d'Entreprises pour l'Environnement (TUTENUIT 2023), l'industrie et les transports n'accepteront pas de dépendre de matières premières aléatoires, variables d'ajustement une fois les besoins alimentaires tous satisfaits. Pour elle, il sera nécessaire d'allouer des volumes de biomasse « en base » pour les transports, ou certains usages matériaux, avec des contrats fermes d'approvisionnement.

Ainsi, le **rôle des contrats** entre les parties prenantes sera majeur pour garantir la résilience du système agro-énergétique. Comme évoqué avec des industriels (CAMPARGUE 2023), les acteurs qui ont conscience des fluctuations de l'approvisionnement en matières premières agricoles ont recours aux outils contractuels pour réduire leur exposition aux risques.

Cela peut passer par des contrats d’approvisionnement long terme, du *hedging* (revente du risque de production à un acteur tiers), des formules de révisions sophistiquées intégrant de multiples critères (évolutions du prix des matières premières agricoles ; évolution des conditions de productions industrielles : énergie, coût de la main d’œuvre, coût du matériel industriel ; évolution du prix de la logistique et des transports). Ces formules de prix intègrent en partie les risques et peuvent se répercuter en mode miroir à tous les niveaux de la chaîne de valeur, du producteur au consommateur final.

Le rôle de l’Etat est donc de **garantir que cette contractualisation reste possible** à des prix acceptables par tous les acteurs, tout en protégeant les parties faibles au contrat. Cela n’est pas toujours possible dans les conditions de marché. L’exemple par excellence d’une intervention de l’Etat pour pallier une défaillance du marché est le système de l’assurance récolte, récemment réformée en 2022 (détaillé dans l’encadré ci-dessous). Il est marquant de noter que le risque de plus en plus probable et non assurable vu par les assureurs est bien le même que celui que nous décrivons dans ce rapport : une forte variabilité des récoltes à cause d’événements climatiques extrêmes.

Encadré 7 : le rôle de l’Etat pour aider le système agricole face à la variabilité des récoltes - la réforme de l’assurance récolte

Kapsambelis évalue dans sa thèse l’impact de l’augmentation de fréquence et d’intensité des sécheresses extrêmes en 2050 sur certaines récoltes du point de vue de l’assureur. Elle en déduit une caractérisation du risque à deux niveaux (KAPSAMBELIS 2022), qualifiés d’ »horizontal » suivant l’étendue spatiale de l’événement, et de « vertical » suivant l’intensité de l’impact et ses conséquences. Elle en tire les conclusions suivantes pour les céréales et les prairies :

	Nombre d’agriculteurs touchés	Pertes de récolte	Risque
Céréales à paille	Très nombreux	Niveaux modérés	Horizontal
Prairies	Très nombreux	Niveaux très élevés	Horizontal et vertical

Tableau 9 : Impact de l’augmentation de la fréquence et de l’intensité des sécheresses extrêmes en 2050 (KAPSAMBELIS 2022).

Ainsi, les réponses assurantielles face à ces risques sont différentes. Des assureurs privés arriveront à compenser des risques horizontaux, mais s’ils devaient internaliser dans les prix d’assurances l’éventualité d’avoir à indemniser un risque à la fois horizontal et vertical, les primes résultantes seraient bien trop chères pour les agriculteurs. Cette défaillance de marché a été bien identifiée par l’Etat lors de la réforme de l’assurance récolte en 2022 (CAPERAA et al. 2023).

Cette réforme a par ailleurs l’objectif de faire davantage souscrire les agriculteurs à des assurances récoltes (qui sont subventionnées dorénavant à 70% par l’Etat via les aides PAC s’ils respectent les seuils réglementaires). D’abord pour mieux les protéger en cas d’événement climatique extrême dont les probabilités d’occurrence et d’intensité augmentent avec le changement climatique. Ensuite pour éviter que l’Etat n’ait trop souvent à déclarer le régime des calamités agricoles pour venir en aide aux agriculteurs, comme seul filet de secours.

Enfin pour que par l'augmentation du nombre de cotisants, les agriculteurs contribuent tous chaque année au pot commun qui les protège en cas d'aléa climatique. En 2023, seulement 30% des exploitations de grandes cultures, 30% des viticulteurs, 1% des exploitations ayant des prairies et 3% des arboriculteurs étaient couverts par des assurances multirisque climatique agricoles (ABADIE 2022).

Pour résoudre d'une part le défi d'assurer la protection des agriculteurs en prenant la garantie des risques systémiques pour que contrats d'assurance soient abordables, et d'autre part le défi d'inciter les agriculteurs à souscrire aux assurances, un système à trois étages a été créé, qui s'applique à toutes les productions agricoles (simplement avec des seuils différents, fixés par décret).

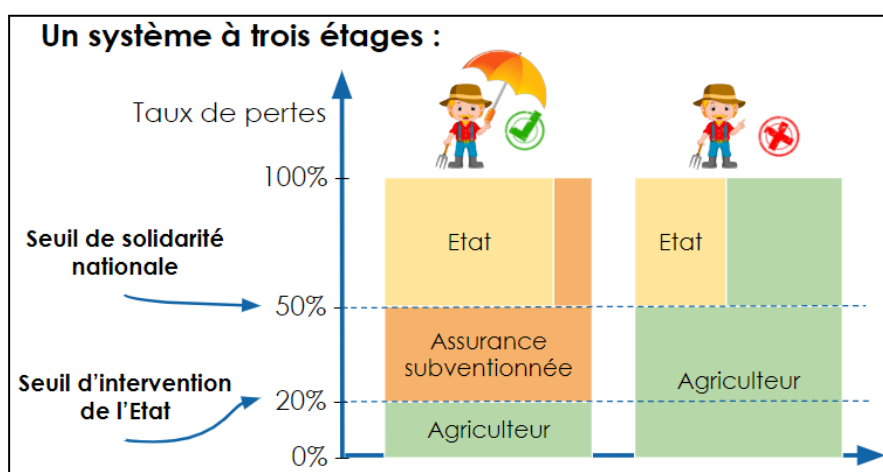


Figure 18 : Fonctionnement du dispositif assurantiel à trois étages instauré par la loi de mars 2022: répartition de la charge de la perte en fonction du taux de perte (illustration par le cas des grandes cultures).

En cas d'événement climatique responsable de pertes de récoltes, au-dessous d'un certain seuil dit « d'intervention de l'Etat », l'agriculteur assume seul les conséquences financières de ses pertes. Au-dessus du seuil d'intervention de l'État et sous le seuil dit d'intervention du fonds public (ou de solidarité nationale), si l'agriculteur est assuré, l'intégralité des pertes de la tranche concernée est remboursée par une compagnie d'assurance privée. Au-dessus de ce seuil, si l'agriculteur n'est pas assuré, l'Etat indemniserait, quelle que soit la production, 45% des pertes comprises dans cette tranche. Si l'agriculteur est assuré en revanche, l'Etat indemniserait, quelque soit la production, 90% des pertes comprises dans cette tranche et l'assurance les 10% restants.

En ce qui concerne les seuils, le seuil d'intervention de l'Etat est de 20% au minimum. Le seuil de solidarité nationale vaut par exemple 30% pour l'arboriculture et les prairies et 50% pour les grandes cultures (cf illustration de la figure ci-dessus).

La réforme de l'assurance récolte résume particulièrement bien le rôle que doit tenir l'Etat dans la gestion du risque de variabilité des productions. Le système de franchise de minimum 20% responsabilise les agriculteurs et encourage la mise en place de techniques agricoles résilientes face aux faibles aléas climatiques. Le système pousse aussi les agriculteurs à s'assurer, ce qui les fait participer au pot commun, tout en assurant leur résilience économique face à un événement extrême et mutualise le risque à l'échelle nationale.

Par ailleurs, l'Etat permet au secteur privé d'assurer une protection assurantielle qui ne serait pas rentable par nature, et il subventionne très fortement les contrats d'assurance réglementaires.

L'assurance récolte permet donc de remédier aux pertes de revenus des agriculteurs en cas d'événement climatique extrême. En revanche, les enjeux du système agro-énergétique sont plus larges car ils concernent aussi la **garantie des volumes de biomasse** en jeu, qu'on ne remplace pas par des compensations financières. Pour inclure cet aspect en renforçant le système de l'assurance récolte, l'Etat pourrait **tenir compte, dans le montant de la subvention de la prime d'assurance, des efforts de prévention** : la prime pourrait être modulée lorsque les exploitants ont investi dans du stockage, atteignent certains seuils de stockage à certaines dates clés, ou encore mettent en place des techniques agricoles résilientes contre la sécheresse.

Suivant des logiques similaires, ces garanties de l'Etat pourraient **permettre aux banques et aux assurances de continuer de prêter aux agriculteurs pour leurs investissements dans la biomasse énergie**. Ainsi pour les méthaniseurs ces mécaniques permettraient de faire baisser l'exposition aux risques des financeurs de projet et donc en contrepartie de limiter la pression qu'ils exercent sur les agriculteurs. Celle-ci résulte en des plans d'approvisionnement pas forcément vertueux pour l'environnement, comme évoqué précédemment, car ne reposant que sur des récoltes « assurées » (incitation aux cultures énergétiques avec des engrais et des produits phytosanitaires et non aux cultures intermédiaires ou à l'herbe, jugées trop incertaines). Si cela n'est pas à l'initiative des acteurs privés, il serait également souhaitable que l'Etat **mette fin aux engagements de volume d'injection** des méthaniseurs sur le réseau de biométhane, afin de limiter l'incitation à produire qui catalyse les conflits d'usages, comme expliqué dans les parties précédentes.

Les contraintes mensuelles de remboursement des prêts bancaires sont également un élément du cercle vicieux qui incite les méthaniseurs à continuer de privilégier la production énergétique au détriment d'autres usages même en cas de fort risque de pénurie. Pour remédier à cet effet pervers, l'Etat pourrait aussi permettre des **contractualisations nouvelles sur ses tarifs de rachat de biométhane, avec des incitations plus vertueuses**. Une suggestion pourrait être de s'inspirer du mécanisme mis en place sur la centrale géothermique de Bouillante en Guadeloupe (DEMARCO 2023), les tarifs pourraient être séparés en deux termes : un terme fixe qui rémunère l'investissement et les frais fixes et un terme complémentaire variable qui couvre la production en fonction de la quantité de gaz produite.



VI. Réagir face à un risque de pénurie, les leviers pour passer la crise

Le recours aux leviers présentés dans la partie précédente devrait permettre de lisser les fluctuations interannuelles normales de la production agricole, pourtant un risque de pénurie n'est pas à exclure. Une pénurie pourrait par exemple être imminente après trois années de sécheresse pluriannuelle à la taille caractéristique de l'Europe de l'Ouest. Si les récoltes sont mauvaises, que les stocks sont aux plus bas, le prix des intrants agricoles pourrait exploser et les tensions évoquées précédemment risquent de se cristalliser et de produire des effets économiques délétères.

Dans cette hypothèse, à la manière d'une tension sur l'eau (comme celle envisagée pour l'été 2023 dès la sortie de l'hiver) ou sur le gaz (à l'été 2022), nous ne voyons pas sur la biomasse un risque de pénurie soudaine, mais plutôt de pénurie se préparant sur plusieurs mois, mais dont les effets pourraient être dévastateurs (tout comme une pénurie d'eau ou de gaz) et qui appelle des mesures temporaires efficaces de gestion de crise.

A nouveau, un regard sur les pratiques du monde agricole et de celui de l'énergie offre une vision plus complète des défis à relever et des stratégies possibles pour gérer une crise potentielle sur la ressource.

A. Les leviers du monde agricole

Les leviers d'actions peuvent être définis à tous les niveaux de la chaîne, allant des producteurs aux consommateurs finaux et passant par les transformateurs. Au niveau des agriculteurs, les producteurs, il est possible face à un risque de pénurie de jouer avec les marges de manœuvres disponibles, quitte à s'autoriser de remettre en cause la hiérarchie des usages que l'on avait jusqu'à là tenu à préserver. Au niveau des transformateurs, le principal levier consistera en l'adaptation à la ressource disponible.

➤ Côté producteur : remettre en cause ponctuellement la hiérarchie des usages

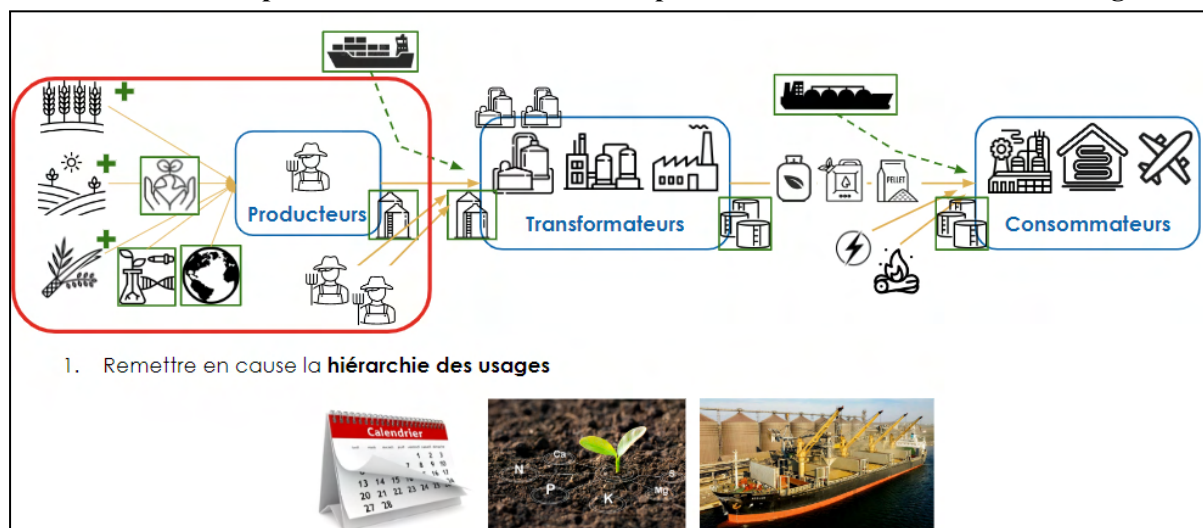


Figure 19 : Exemples de remises en cause de la hiérarchie des usages à la main des producteurs de biomasse.

La hiérarchie des usages de la biomasse précédemment évoquée est assez peu contestée dans la théorie, mais sa déclinaison pratique reste soumise à des considérations économiques et pratiques simples. Nous avons déjà évoqué en quoi les dynamiques des cours des denrées alimentaires et des tarifs de rachat pourraient amener les agriculteurs à privilégier un usage ou un autre de leur production. Analysons trois cas de remise en cause de la hiérarchie des usages qui permettent de dégager des surplus de biomasse, potentiellement pour des usages énergétiques :

- **Un décalage du calendrier des cultures alimentaires en faveur des CIVE**

Le développement des CIVE d'hiver évoqué dans ce rapport offre un exemple de remise en cause indirecte de la hiérarchie établie.

L'essentiel de la production en biomasse ayant lieu pendant quelques semaines au début du printemps, un épisode de gel tardif ou un déficit d'ensoleillement à cette période pourrait anéantir les efforts entrepris dans l'entretien de la CIVE. Dans notre calcul de la variabilité de la production énergétique des CIVE, nous avons en effet considéré que la culture ne serait alors pas récoltée. Cette hypothèse peut néanmoins être rediscutée dans un contexte de pénurie nationale. Dans une période où les cours alimentaires sont bas notamment, pourquoi ne pas attendre un peu plus et assurer une récolte tardive de CIVE? Et si la culture principale qui suit en pâtit, peut-on alors s'autoriser un recours accru à l'importation (ou une réduction des exportations) cette année-là?

- **Limiter les retours au sol et récolter plus de biomasse**

Une autre marge de manœuvre pourrait être envisagée du côté des retours au sol. Dès lors que certaines sources de biomasse, comme les résidus de cultures, qui étaient jusqu'alors presque systématiquement laissés sur place lors de la récolte, commenceront à être valorisés énergétiquement, la question de la juste fraction à prélever se posera. Bien sûr, il n'est pas question de réduire ces retours au sol en moyenne. Mais peut-on les réduire exceptionnellement en cas de pénurie pour garantir une continuité de la production de biogaz ou de combustible (agropellets)?

Les agriculteurs interrogés (GIRARD et MASSON 2022) expliquent que certains changements de pratiques sur les retours au sol visant à augmenter leur activité biologique ont des effets visibles au bout de 5 ou 6 ans environ, ce qui pourrait plaider en faveur de cette solution. Mais le problème est en réalité plus complexe. En effet, une sécheresse est encore plus redoutable pour un sol nu, et laisser sur place les résidus lors de la récolte est alors essentiel, pour ralentir l'assèchement des sols d'une part et pour limiter le ruissellement de l'autre. Un autre risque est la systématisation d'une année à l'autre de solutions d'abord pensées pour n'être actionnées qu'en cas de pénurie, provoquant un déficit de retour au sol sur le plus long terme.

- **Limiter les exportations**

Au cours de nos entretiens, certains de nos interlocuteurs (TUTENUIT 2023) ont suggéré qu'une des manières de dégager des volumes additionnels de biomasse pour des usages nationaux comme l'énergie, est de rogner sur la part conséquente de biomasse qui est exportée (notamment les céréales, comme on le voit sur la figure 1). Cette solution, non alignée avec les orientations actuelles du MASA qui raisonne généralement à volume d'exportations constant, est clivante car l'opinion répandue est souvent que les pays tempérés ont une responsabilité à fournir des céréales aux pays plus exposés aux sécheresses et aux agricultures moins productives. Cependant, l'approche se base sur des arguments contraires, consistant à dire que les exportations européennes, américaines ou asiatiques vers les pays africains, massivement subventionnées (par exemple par la Politique Agricole Commune dans l'Union Européenne), résultent en réalité en de la concurrence déloyale avec la paysannerie locale, génèrent de l'insécurité alimentaire pour les pays importateurs et conduisent à délaisser des céréales endémiques (mil, sorgho, fonio ...) pourtant plus adaptées aux écosystèmes secs locaux (TOULEMONDE 2022).

Ainsi la France sera face à un choix dans les années à venir, si comme nous le pensons, la pression sur la ressource biomasse tend à s'intensifier : quel est le juste degré d'exportations de céréales vers l'étranger ? Et si le niveau d'exportations actuel est trop élevé, comment le diminuer progressivement, en accompagnant et en préparant les pays aujourd'hui dépendants, sans brusquement couper les exportations en cas de risque de pénurie ?

➤ **Côté transformateur : l'adaptation à la ressource en biomasse disponible**

Tout comme en agroécologie, où les vaches se nourrissent en fonction de ce qui a poussé, avec des rations qui varient, l'un des leviers permettant de gérer un risque de pénurie est la **flexibilité des transformateurs**. C'est déjà le cas pour les fabricants d'aliments pour le bétail qui font varier leurs formulations en fonction des céréales disponibles et de leurs cours et qui ont par exemple utilisé plus d'orge que de blé en 2022 compte-tenu des disponibilités (FRANCE AGRIMER 2022). Pour le secteur de la biomasse-énergie, on ne peut qu'inciter les bioraffineries à avoir un processus leur permettant de travailler avec un maximum d'intrants différents : aujourd'hui de première génération, et demain issus de la seconde.

De même, les propriétaires de méthaniseurs doivent suffisamment maîtriser leur système pour être capables d'adapter sa ration en fonction des ressources disponibles, en la modulant. Ils peuvent être aidés en cela par les retours d'expérience de leurs pairs et des partages d'échanges et de connaissances. Ainsi des agriculteurs-méthaniseurs rencontrés au cours du mémoire nous ont expliqué comment ils faisaient varier les rations de leur méthaniseur au cours de l'année, en respectant certaines proportions d'intrants en fonction de leurs caractéristiques chimiques ou agronomiques (pourcentage de fumier/lisier, d'ensilages, etc...) pour ne pas perturber la biologie du méthaniseur. Les fournisseurs de méthaniseurs auront aussi leur rôle à jouer dans la conception de systèmes adaptables et flexibles.

B. L'inspiration du monde de l'électricité et de ses leviers pour empêcher le *black-out*

Même si le risque de pénurie de biomasse est, comme nous l'avons vu, assorti d'une temporalité assez longue, de plusieurs mois voire plusieurs années (le temps que les stocks se vident, et que plusieurs années de mauvaises récoltes à la suite s'enchaînent), il est instructif d'analyser les outils de gestion de crise du réseau électrique et son risque de pénurie à échelle de temps bien plus courte : le *black-out*¹¹. Ce dernier est un déséquilibre de l'offre et la demande, qui peut résulter en une perte prolongée et généralisée de contrôle du réseau électrique ayant pour conséquence une coupure de courant à une échelle plus ou moins large. Ce risque augmente avec la pénétration croissante des renouvelables électriques dans le mix et certains effets du changement climatique qui limitent l'utilisation d'unités pilotables comme les barrages hydroélectriques.

Dans le cadre de sa thèse menée avec RTE (GOUTALAND et al. 2023), Antoine Goutaland analyse les mesures traditionnellement utilisées par le réseau pour éviter les black-outs : le **pilotage de la demande par des restrictions d'usage volontaires ou imposées**, pouvant éventuellement mener à des actions de **délestage**, et enfin les **signaux-prix**. Il s'agit d'actions d'extrême recours, à la main du gestionnaire de réseau en cas d'imminence d'une situation de *black-out*. Dans tous les cas, ces stratégies peuvent inspirer des leviers d'action dans le monde de l'agro-énergie (et de manière similaire pourraient aussi s'appliquer à une réflexion sur le risque de pénurie d'eau).

➤ Le pilotage de la demande pour gérer la crise

¹¹ NB : la notion d'« intermittence » nous a amenés naturellement à nous tourner vers le monde de l'électricité auquel il est généralement associé. A posteriori, nous regrettons de ne pas avoir eu le temps d'analyser les plans de gestion de crise face à des risques de pénurie de gaz ou d'eau, qui nous semblent plus proches du risque de pénurie de biomasse que le risque de coupure du réseau électrique. Néanmoins les logiques à la main du gestionnaire du réseau sont tout à fait remarquables et leur transposition au monde de la biomasse permet de générer des idées nouvelles et très intéressantes.

En électricité, l'enjeu principal est l'équilibrage de l'offre et de la demande en temps réel, en particulier dans les périodes de pointes de consommation, où il n'est pas garanti que les moyens de production d'électricité non pilotables soient disponibles (par exemple en début de matinée ou en début de soirée). Ainsi, pouvoir décaler des consommations flexibles en dehors de ces périodes de pics de consommation (chauffe-eau fonctionnant en milieu de nuit ou de journée par exemple) permet de limiter l'amplitude de la pointe de demande et donc un surdimensionnement du réseau.

Pour la biomasse énergie, la temporalité est différente, il ne s'agit pas d'un équilibrage fin d'un réseau en temps réel, mais plutôt d'une réflexion sur l'adéquation de la demande et de la matière disponible à l'échelle de plusieurs semaines ou plusieurs mois.

- **Avant toute chose : une sobriété globale du système**

A l'image des consommations énergétiques à l'hiver 2022, qui ont été fortement réduites par les comportements de sobriété des usagers, afin de limiter la tension sur la ressource en biomasse et d'être plus résilient face à une quantité disponible variable, il convient d'en limiter les usages superflus et les gaspillages, par une **sobriété globale du système et une économie des ressources**. Par ailleurs, même si le CO₂ émis lors de la combustion de biomasse énergie est biogénique, donc techniquement comptabilisé comme neutre sur le climat, il est tout de même relâché dans l'atmosphère et donc moins vertueux que du CO₂ qui serait stocké, par exemple dans des matériaux. Toute économie est donc bonne à prendre.

- **Des réductions volontaires de consommation**

Une fois les usages superflus ou les gaspillages écartés, on peut considérer que les usages restants sont nécessaires ou justifiés et donc qu'ils entraîneront des tensions sur la ressource en cas de risque de pénurie. Malgré tout, même pour des usages pertinents de la biomasse, certains acteurs peuvent être flexibles sur leur consommation ou être en mesure de la décaler dans le temps de manière volontaire, ce qui peut aider à passer la crise. Par exemple, nous recommandons de renforcer la connaissance sur le fonctionnement des méthaniseurs à bas régime. En effet, la **modulation de puissance des méthaniseurs** permettrait de limiter leur consommation de matières premières qui pourraient servir à l'alimentation animale en cas de pression sur la ressource.

D'autres acteurs pourraient également réduire leur consommation temporairement : les bioraffineries et les usines d'agro-granulés peuvent ralentir leur production, et dans un cas extrême les éleveurs laitiers peuvent aussi diminuer la ration de leur cheptel quitte à diminuer la quantité de lait produite (sans bien sûr aller jusqu'à impacter la santé animale). Pour que ces stratégies fonctionnent dans la gestion de crise, les contrats de vente de la biomasse transformée (biogaz, biocarburant, agro-granulés) devront être adaptés à la variabilité de la production. Il est aussi possible de **flécher la ressource produite localement vers un usage optimisé** et non nécessairement en haut de la pyramide des usages. « Optimiser » la biomasse énergie signifie maximiser son rendement suivant son état et sa qualité : par exemple méthaniser la biomasse à fraction liquide importante, brûler celle qui est sèche, nourrir les vaches avec les productions à haute valeur nutritionnelle, etc... En contrepartie, cela implique d'importer de la biomasse étrangère pour les usages pour lesquels la biomasse locale disponible une certaine année n'est pas optimale.

- **Des restrictions d'usage**

Dans le cas des rationnements d'électricité, RTE négocie avec un consommateur important comme un site industriel une réduction de consommation qui est opérée directement par le consommateur. Pour ce faire, RTE ne définit pas les cibles à couper unilatéralement mais échange avec des organes nationaux ou territoriaux de coordination industrielle. Appliqué à la biomasse, et à un risque de pénurie de la ressource agricole, cela pourrait donner par exemple un **droit de préemption et d'achat prioritaire de récoltes, de produits stockés ou de résidus des industries agro-alimentaires par les éleveurs**. On peut aussi veiller à ne pas couper violemment certains méthaniseurs qui seraient mis à l'arrêt, mais plutôt à mieux répartir la ressource limitée pour que tous les méthaniseurs puissent continuer à tourner au ralenti et limiter les risques techniques d'arrêt évoqués précédemment. De même, comme nous l'avons expliqué, certains arguments sont en faveur d'une limitation des exportations de cultures à l'étranger en cas de tension sur la ressource, pour garantir les usages d'agro-énergie nationaux.

➤ Le délestage

Le second levier à la main du gestionnaire de réseau électrique pour gérer le risque de black-out est le **délestage**. Il consiste pour RTE à couper, à une maille géographique donnée, l'accès à l'électricité à certains consommateurs, classés suivant leur échelle de priorité en 5 tranches (les hôpitaux ou les infrastructures sensibles étant les dernières à couper par exemple), afin d'équilibrer l'offre et la demande électrique. Appliqué à la biomasse énergie, cette stratégie reviendrait, en cas de stocks de biomasse très faibles, de mauvaise récolte annoncée et de mauvaises conditions météorologiques annoncées ou redoutées, de **couper l'accès à la ressource en biomasse à certains usagers jugés non prioritaires dans la hiérarchie des usages**. Par exemple : un agriculteur aurait une clause dans son contrat de fourniture de cultures pour les biocarburants lui permettant de réduire son approvisionnement pour pouvoir en priorité nourrir son cheptel ou celui d'un éleveur local en difficulté en cas de situation avérée de stress sur la ressource. Par ailleurs, tout comme RTE peut faire appel pour augmenter la production d'électricité à des producteurs disposant d'une réserve de capacité, ou comme les diesels d'ultime recours des centrales nucléaires, pour la biomasse énergie, l'Etat pourrait accepter à l'avenir d'avoir recours de manière temporaire et exceptionnelle à des **stocks d'énergie fossile**, essence, gazole, et gaz comme « joker » en cas de très forte tension sur le biogaz ou les biocarburants.

➤ Les signaux-prix

Enfin, le dernier outil utilisé par RTE est le **signal-prix**, par exemple par le biais de la tarification incitative : la tarification dynamique, les contrats heures pleines/creuses, et des mécanismes où consommer à la pointe est pénalisé. Cela laisse envisager de nombreuses stratégies pour l'agro-énergie en cas de gestion de la pénurie comme de **surtaxer les usages non prioritaires**, ou apporter des subventions étatiques pour contribuer à l'achat de matières pour certains usages, cela reviendrait à assurer un **bouclier tarifaire**, sur les fourrages par exemple. L'Etat pourrait aussi constituer des stocks qu'il revendrait hors marchés dans les situations de crise. Un **tarif progressif** pourrait également s'instaurer sur les achats de biomasse, pour ne pas pénaliser les usages essentiels mais inciter à la sobriété. Enfin, pour éviter que les agro-énergéticiens ne soient incités à produire des bioénergies en cas de tension sur la ressource primaire, il pourrait être envisagé de taxer leur consommation pour les usagers finaux afin de limiter la demande (à condition d'assurer l'équité et la justice sociale du système).

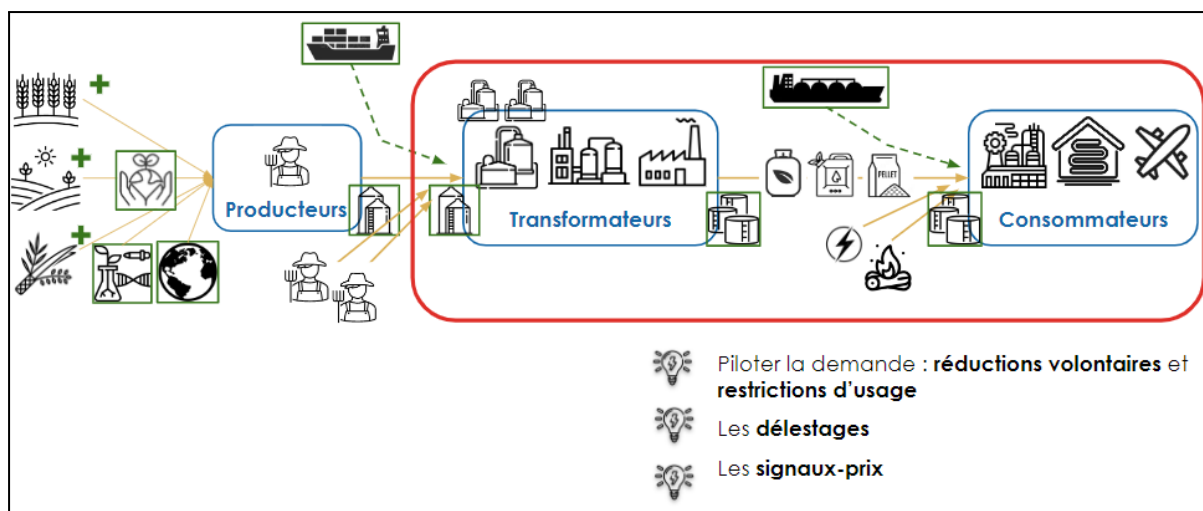


Figure 20 : Synthèse des leviers de gestion de crise en cas de risque de pénurie de biomasse, inspirés par le monde de l'électricité.

C. Un nouveau cadre de pensée : le risque de pénurie comme péril commun

RTE constate pourtant des limites aux méthodes traditionnelles de gestion du risque de *black-out* (GOUTALAND et al. 2023), qui n'arrivent pas à maximiser trois critères à la fois : l'**effectivité** (pour éviter la situation de *black-out*), l'**efficience** (ou le coût économique global), et l'**équité** (juste répartition du coût entre les individus). Pour y remédier, RTE se tourne vers des travaux de recherche récents et innovants (DEMONSANT et al. 2023) qui proposent l'application d'un cadre de pensée de « péril commun » pour concevoir de nouvelles stratégies face aux enjeux du changement climatique, tout en garantissant l'effort équitable de toutes les parties prenantes.

Penser le risque de *black-out* comme une situation de péril commun, donc comme un risque grave qui concerne l'ensemble d'une communauté liée au réseau, permet d'appliquer la **règle des avaries communes**. Ce concept d'équité du droit maritime, permet de faire émerger de nouvelles stratégies de répartition de l'effort et des dépenses entre des acteurs menacés par un même péril. Ainsi, dans les expéditions maritimes, face à un grave événement de mer ou danger, le capitaine peut procéder à des sacrifices pour assurer le « salut commun » (comme verser par-dessus bord des marchandises). Un principe d'équité oblige ensuite toutes les personnes intéressées dans l'expédition à contribuer à la dépense qui a été faite (donc à participer au préjudice des propriétaires des biens qui ont été sacrifiés pour sauver l'ensemble du navire), ceci proportionnellement à l'intérêt qu'ils ont eu à être eux-mêmes sauvés (donc par exemple à leur quote-part de la valeur de l'expédition). La clé de répartition des efforts et des dépenses est donc fixée en amont, bien avant qu'une situation de crise se présente.

Appliqué au système électrique, ce cadre de pensée permet de penser de nouvelles stratégies de coupure des acteurs pour éviter le *black-out*, en se basant sur l'utilité des consommateurs (ou leur propension à payer) pour ne pas être coupés du réseau. Une fois la crise passée, les coûts de dédommagements seraient répartis entre tous les acteurs, en particulier ceux qui n'ont pas été coupés et qui rembourseraient les efforts des autres. Antoine Goutaland montre les effets positifs théoriques de cette approche, qui résout le trilemme efficacité, efficience et équité, tout en générant un effet de solidarité et en construisant un jeu coopératif de facto (GOUTALAND et al. 2023).

Ce cadre de pensée prend également tout son sens dans le cas de la gestion d'un risque de pénurie sur la biomasse. En effet, comme nous l'avons montré à de nombreuses reprises, **les usagers de la biomasse ont des utilités économiques et des intérêts différents pour les ressources primaires** : un éleveur qui pense à la survie de son cheptel n'aura pas la même volonté d'avoir accès à des intrants agricoles qu'un agriculteur méthaniseur qui cherche à maintenir une production minimale sur son installation ou que l'avionneur qui souhaite produire des biocarburants durables. Ils n'auront pas non plus la même capacité de financement et de contractualisation de la matière première. La question de la **répartition optimale des efforts à faire entre les acteurs** se pose alors, ainsi que celle de la **juste intervention de l'Etat** dans le cas où les parties prenantes n'arrivent pas à se mettre d'accord. Par ailleurs, nos entretiens sur le terrain nous ont permis de mettre en exergue la diversité des formes et des usages de la biomasse rien que sur le territoire national, aussi il semble clair que la **réponse face à un risque de pénurie ne sera pas unique** à l'échelle de la France.

Nous sommes convaincus, que de la même manière qu'il est pertinent d'avoir des « cellules de crise sécheresse » autour des préfets pour réagir en cas de risque de pénurie d'eau, il y a un **besoin de gouvernance locale autour de la biomasse, transverse**, capable de réunir tous les acteurs autour de la table pour **anticiper les crises, et de garantir la coordination entre les parties prenantes**. Pour cela, nous détaillons dans la partie suivante l'organe déjà existant qui nous semble approprié dans ce rôle : les cellules biomasses, dont il reste à renforcer les pouvoirs.

Concrètement, grâce à ces cellules biomasse renforcées, il serait possible de **mettre en pratique le cadre de réflexion du péril commun**. Dans ce système, en situation normale, hors crise, les usagers de la biomasse se réunissent autour de ce « capitaine » et définissent leur utilité à avoir un accès garanti à telle ou telle forme d'intrant biomasse. En cas de risque de pénurie, les acteurs les plus flexibles accepteraient de limiter leur consommation de biomasse, de la décaler dans le temps, et seraient a posteriori dédommagés par les acteurs qui ont continué de consommer de la biomasse car c'était important pour eux (pour éviter l'arrêt d'un méthaniseur par exemple), au prorata de leur utilité économique à accéder à cette biomasse. L'Etat pourrait alors aider les éleveurs pour lesquels l'accès à cette biomasse est clé, ou leur allouer des quotas en cas de crise. Ce modèle des avaries communes et d'un effort commun où tous les acteurs participent pourraient aussi permettre d'investir collectivement dans des infrastructures de résilience (stockage, etc...) ou des techniques de résilience (R&D sur les nouvelles cultures, etc...).

D. Le rôle de l'Etat dans la gestion de crise : une gouvernance plus interventionniste

En cas de risque avéré de pénurie de biomasse agricole, une intervention des pouvoirs publics sera probablement nécessaire, à la fois pour garantir à certains usagers prioritaires l'accès à la ressource dont ils auront besoin et pour fournir une assurance à ceux qui en seront privés. Sur le réseau électrique, c'est RTE qui prend ces décisions en cas de crise dans l'intérêt de tous. Il faudra des acteurs pour remplir un rôle similaire dans le cas de la biomasse, même si cette tâche sera rendue plus complexe par la rencontre de mondes qui ne se côtoyaient jusque-là que très peu : l'agriculture, l'environnement, l'industrie, l'énergie, les transports, etc.

- **A l'échelle locale : des cellules biomasse régionales renforcées**

Pour réaliser des **arbitrages régionaux transverses pertinents entre tous les usagers de la biomasse**, comme évoqué dans la partie précédente, nous pensons qu'il n'est pas nécessaire de créer une nouvelle instance de gouvernance ad hoc, mais plutôt que les cellules biomasses semblent être l'organe le plus pertinent, déjà existant, et qu'il n'y aurait qu'à renforcer ses pouvoirs lui permettant d'exercer cette mission. Aujourd'hui les cellules biomasse rassemblent plusieurs directions régionales étatiques (DRAAF, DREAL, DREETS¹²) ainsi que l'ADEME (cf figure ci-dessous) autour du préfet de région. Elles se contentent d'émettre des avis consultatifs sur des grands projets de biomasse énergie, dans le cas de candidatures aux appels à projet de la Commission de Régulation de l'Energie ou de l'ADEME, ainsi que de rédiger les schémas régionaux biomasse.

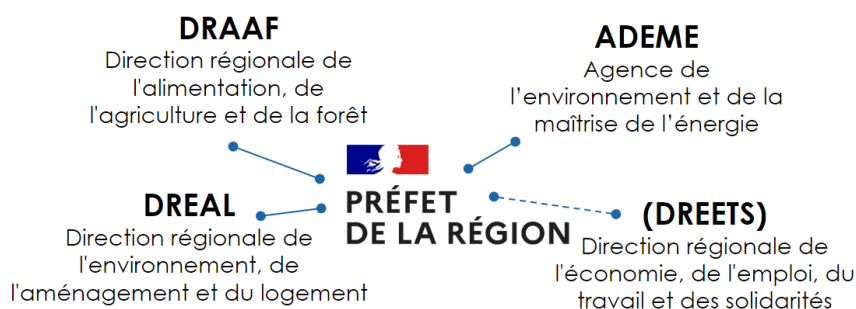


Figure 21 : Les directions régionales rassemblées autour du préfet de région et qui constituent les «cellules biomasse». NB : la DREETS n'est pas incluse dans toutes les régions.

Leur **périmètre pourrait être élargi pour inclure tous les usages de la biomasse**, et pas seulement l'énergie car comme nous l'avons vu, les conflits d'usages potentiels dans les années à venir seront transverses. En plus de rédiger des **schémas régionaux biomasse élargis** hors énergie, par exemple en lien avec les plans d'alimentation territoriaux, ces instances devraient **en assurer le suivi et le respect**. Leur **avis** sur les projets fortement consommateurs de biomasse et leurs plans d'approvisionnement devrait être **conforme et non plus seulement consultatif**. Leur échelle d'action permettrait aussi d'en faire des organes de référence pour **assurer le dialogue local entre toutes les parties prenantes** : filières professionnelles, collectivités, chambres d'agriculture, service déconcentrés, France Agrimer, etc... et permettre de déterminer collectivement les vocations d'usages de la biomasse produite ou importée en région. Finalement, ces cellules pourraient aussi, hors cas de crise, effectuer une **analyse de vulnérabilité** de la région face à une potentielle pénurie de biomasse agricole et **anticiper un plan de gestion de pénurie**, qui pourrait être inspiré des éléments décrits dans la partie précédente.

- **A l'échelle nationale : vers une gouvernance interministérielle de la biomasse**

La gouvernance de la biomasse sera nécessairement interministérielle. Le rapport rendu au Ministère de l'Agriculture par la mission Corps des mines - INSP sur les conflits d'usages de la biomasse (BACHMANN et al. 2023) préconise comme point de départ le renforcement des moyens d'actions de l'Observatoire Nationale des Ressources en Biomasse (ONRB), qui pourrait être placé auprès de France Stratégie, et suggère de charger le SGPE de répartir l'usage de la biomasse par ministère à travers des « budgets biomasse » territorialisés.

¹² Direction Régionale de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt, Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement, Direction Régionale de l'Economie, de l'Emploi, du Travail et des Solidarités

L'avis récemment rendu au Conseil Économique, Social et Environnemental (FEREY et TUTENUIT 2023) va dans le même sens et propose deux options :

1. Créer un espace de dialogue plus large au sein de France Agrimer pour élargir ses missions aux questions énergétiques et climatiques et aux services écosystémiques rendus par les agrosystèmes, et élargir l'ORNB à l'ensemble des usages de la biomasse sous gouvernance interministérielle ;
2. Ou ajouter conjointement le Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires (MTECT) aux tutelles de France Agrimer et le MASA aux tutelles de l'ADEME, puisque celle-ci inclut dans ses missions des enjeux touchant à la biomasse et à l'alimentation.

Nous abondons dans le sens de l'une ou l'autre de ces options et pensons que cette gouvernance croisée prendrait tout son sens pour assurer une gouvernance concertée sur les différents usages de la biomasse avec une stratégie nationale, complémentaire à la vision terrain et régionalisée des cellules biomasse.

Finalement, toute la difficulté du rôle de l'Etat dans la gouvernance de la biomasse sera de résoudre pour les autres acteurs le paradoxe d'un engagement fort sur un chemin incertain. L'Etat devra jouer un rôle d'équilibriste et jouer juste entre incitations, régulation et prise en charge du risque afin de permettre un développement à la fois durable et résilient de la biomasse-énergie.



CONCLUSION

Ce rapport cherche dans un premier temps à fournir une première estimation de la variabilité de la biomasse agricole à l'horizon 2050. Nous montrons en particulier que l'essentiel du gisement additionnel exploitable pour la production de biométhane, constitué par les CIVE d'hiver, les résidus de culture et l'herbe des prairies, sera soumis à cette variabilité. En fonction des conditions météorologiques, la récolte de CIVE pourrait varier d'un facteur 3 à 4 et celle d'herbe et de résidus de 50% si aucune stratégie n'est mise en place pour anticiper ce risque. Cela pourrait représenter des variations interannuelles de l'ordre de 40% sur la production totale de biogaz.

Le rapport détaille ensuite les risques pour le système agro-énergétique d'une telle variabilité et propose un tour d'horizon des solutions qui pourraient être adoptées pour la limiter. Celles-ci s'appuient à la fois sur les connaissances du monde agricole (par exemple : choix de variétés plus résilientes, stockage de biomasse, pratiques agroécologiques) et sur celles du monde de l'électricité (par exemple : stockage, interconnexions à l'échelle européenne, pilotage de la demande) qui a déjà dû penser les réponses à l'intermittence avec le développement des énergies renouvelable.

Face au paradoxe constitué par la nécessité de s'engager vers des sources d'énergie décarbonées n'offrant pas la garantie d'une production et d'un revenu stables pour les acteurs et pour garantir le respect de pratiques durables et un usage souhaitable de la ressource produite, l'Etat aura un rôle crucial à jouer dans la gouvernance de la biomasse. Ce rôle pourrait se faire plus interventionniste en cas de crise ou de risque de pénurie pour garantir un partage équitable de la ressource.

ANNEXE : Liste des visites et entretiens effectués hors mission collective INSP- Corps des Mines

	NOM, Prénom	Structure	Fonctions
Visites terrain (4)	BASSIN Béatrice	GAEC Les Mauvinières (Vieilles Maisons sur Joudry, Loiret, 45)	Polyculteur-Éleveur bovin allaitant et volailles en intégration
	COLIN Xavier JOSEPH Frédéric	IDEX, chaufferie aux agro-granulés de la Défense	Directeur biomasse Directeur régional en charge d'IDEX la Défense
	COUTELIER Emmanuel	EARL Buisson Genoï (Bray Saint Aignan, Loiret, 45)	Polyculteur-Éleveur bovin lait et volailles
	GIRARD Benoit MASSON Jérôme	GAEC de la Bate (Bray Saint Aignan, Loiret, 45)	Maraîchers

Entretiens	NOM, Prénom	Structure	Fonctions
Elus (1)	MATHIEU Sylvain	Région Bourgogne-Franche Comté	Conseiller régional délégué en charge des forêts et montagnes Président du Parc Naturel Régional du Morvan
Administration et acteurs étatiques (16)	BOUVATIER Sébastien LAURENCEAU Martin LHERMITTE Serge REALLON Sylvain	Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté Alimentaire	Adjoint au Sous-directeur de la performance environnementale et de la valorisation des territoires Chargé de mission politique nationale changement climatique (atténuation et adaptation) Chef de Service Compétitivité et Performance Environnementale Sous-directeur filières forêt-bois, cheval et bioéconomie
	CLAUSE Emmanuel DUPUIS Pascal	Conseil général de l'économie (CGE)	Membres associés, rapporteurs de la mission biomasse
	DUHALDE Michel PODESTA Gwenaël	Ministère de la Transition Ecologique et de la Cohésion des Territoires - DGEC	Adjoint au chef du bureau Politique climat et atténuation Adjoint à la cheffe du bureau Emissions, projections, modélisations
	DRON Dominique	Conseil général de l'économie (CGE)	Membre associée
	HAJJAR Joseph JOBERT Frédéric SCHULZ Lohengrine	Secrétariat général à la Planification écologique (SGPE)	Directeur de programme climat Directeur de programme Directrice de programme économie circulaire
	JEANNIN Thomas	Direction Générale des Entreprises (DGE)	Directeur de projet
	LAVERGNE Richard	Conseil général de l'économie (CGE)	Membre associé

	LEROY Chloé	Ardenne Métropole	Chargée d'opérations agriculture et agro-alimentaire
	PIGNON Claire	Chambre départementale d'Agriculture des Ardennes	Chargée de mission expert
	POSTEL-VINAY Grégoire	Conseil général de l'économie, de l'industrie, de l'énergie et des technologies (CGEJET)	Chef de la mission des Annales des Mines, chargé des relations avec le Conseil d'Analyse Stratégique
	PREVOT Henri	Ministère de l'Agriculture	Retraité, ex-Délégué de massifs forestiers pour le Sud-Ouest, Ministères de l'agriculture et de l'industrie
	ROURE Françoise	OCDE	Présidente du groupe de travail Biotechnologies, nanotechnologies et technologies convergentes
	SORIANO Sébastien	IGN	Directeur Général
	TONNET Nicolas	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise d'Energie (ADEME) - Service Forêts, alimentation et bioéconomie	Responsable Innovation et Energie Responsable des ressources et usages de la biomasse pour Transition(s) 2050.
	TUTENUIT Claire	Conseil Economique Social et Environnemental (CESE) Entreprises pour l'Environnement	Membre du Conseil Déléguée générale
	WEENS Maëva	Chambre régionale d'Agriculture Grand Est	Chef de projet autonomie azotée et protéique
Experts, scientifiques, universitaires (8)	AUBERT Pierre-Marie	IDDRI	Directeur des politiques alimentaires et agricoles
	BENOIST Anthony	CIRAD	Chercheur
	CADIOU Jeanne	IDDRI / INRAE	Thèse sur les interactions entre sociologie et agronomie dans le cadre du déploiement de la méthanisation en région Grand Est
	COUTURIER Christian	SOLAGRO et NEGAWATT	Président
	FOSSE Julien	INRAe, France Stratégie	Président de l'INRAe des Hauts de France Ex directeur du département développement durable et numérique de France Stratégie
	GROSS Clémence	ICare	Consultante Senior
	GUILLON Emmanuel	Université de Reims Champagne-Ardenne	Professeur
	LE MASSON Pascal WEIL Benoit	Centre de Gestion Scientifique - Mines Paris - PSL	Professeur, Directeur Adjoint Professeur, Directeur Adjoint
Associations, syndicats et interprofessions (3)	DAUGER Olivier	Fédération Nationale des Syndicats d'Exploitants Agricoles (FNSEA) Chambre d'Agriculture Hauts-de-France	Administrateur et Membre de la Commission Environnement Président

	DEMARCO François	La Fabrique Ecologique	Président du groupe de travail alimentation, élevage et stockage de carbone
	ROUX Frédéric-Georges	Centre Régional de la Propriété Forestière (CRPF) PACA Interprofession régionale de la filière Forêt-Bois (Fibois Sud) Union Régionale des Syndicats de Forestiers Privés (Fransylva PACA)	Ex-Vice-Président Ex-Vice-Président Ex-Président
Entreprises, industriels, acteurs privés (6)	CAMPARGUE Matthieu	RAGT Energie	Directeur Général
	COSTA de BEAUREGARD Berold		Propriétaire forestier privé à Autun (Saône-et-Loire, 71)
	DELGOVE Julien	EnerBioFlex	Président
	DRAHI Etienne	TotalEnergies	Directeur des projets de recherche pour le déploiement durable du photovoltaïque
	HOLLEAUX Didier ERBS Guillaume HAAS Benjamin TERRISSE Frederic	ENGIE	Vice-Président Exécutif Directeur d'ENGIE Impact Directeur Régulation France Directeur général adjoint, ENGIE BioZ
	PHILIPON Pierre	Scierie Philipon (La Chaise-Dieu, Haute-Loire, 43)	Président Directeur Général

BIBLIOGRAPHIE

Articles, ouvrages et sites internet

- ABADIE, Aurélie. 2022. « Assurance récolte : à la recherche d'un modèle gagnant-gagnant ». *L'Argus de l'Assurance*.
<https://www.argusdelassurance.com/les-assureurs/assurance-recolte-en-quete-d-un-modele-gagnant-gagnant.195152>.
- AGRESTE. 2022. « Graph'Agri 2022|Agreste, la statistique agricole ». <https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/disaron/GraFra2022Integral/detail/>.
- ALATERRE, Julien, Clara HERER, et François VILLEREZ. 2015. « Méthanisation, Dans quels cas financer son développement ? ». *Études de l'environnement*.
https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-01651222/file/2015_memoire_methanisation_on_ALATERRE_HERER_VILLEREZ.pdf.
- AREC IDF. 2022. « Bilan de fonctionnement 2020 des unités de méthanisation en Ile-de-France ». https://www.arec-idf.fr/fileadmin/DataStorage/user_upload/Bilan_methanisation_2020_-_rapport_complet_-_vf2.pdf.
- AUBERT, Pierre-Marie, Sylvain DOUBLET, Christian COUTURIER, et Florin MALAFOSSE. 2023. « Biomasse et neutralité climat en 2050 : gérer la rareté pour maintenir des écosystèmes productifs et résilients », IDDRI, *Document de propositions*.
https://www.iddri.org/sites/default/files/PDF/Publications/Catalogue%20Iddri/Propositions/202303-PB0323-biomasse%20neutralite_0.pdf.

- BACHMANN, Anne, Malika BENYETTOU, Alexis BITAUDEAU, François CHALLET, Fabien DEROUBAIX, Arthur FOURNY, Martin HUGUENY, et al. 2023. « Quels leviers et moyens d'action pour anticiper et apporter une réponse aux conflits d'usages sur la biomasse ? Illustration par trois cas remarquables : les cultures intermédiaires, le recul de l'élevage et la hausse de la demande en bois énergie », *Rapport sur commande Institut National du Service Public - Corps des Mines*.
- BLANCHET, François, et Hubert GUERALT. 2022. « Guide de réussite des CIVE en Pays de la Loire ». Aile Asso.
<https://aile.asso.fr/wp-content/uploads/2022/03/Dossier-de-reussite-des-CIVE-VF.pdf>.
- CAPERAA, Damien, Jean CATRY, Jean-Baptiste FLIELLER, Loïc FOUQUET, Pierre FRODE, Corentin HENNION, Thomas LABRO, et Lucille LACOSTE. 2023. « La réforme de l'assurance des récoltes en France. Quels enjeux et débats autour de la loi du 22 mars 2022 ? » *Les controverses de Mines Paris*.
- CARPON, Arnaud. 2016. « Les amidonniers peinent à valoriser des blés 2016 de mauvaise qualité ». Terre-net.
<https://www.terre-net.fr/2016/article/124194/les-amidonniers-peinent-a-valoriser-des-bles-2016-de-mauvaise-qualite>.
- CARTON, Sophie, Florent LEVAVASSEUR, et Mickaël HUGONNET. 2022. « Performances agronomiques et environnementales de la méthanisation agricole sans élevage », *Analyse (Ministère de l'agriculture, de l'alimentation, de la pêche, de la ruralité et de l'aménagement du territoire)*. <https://hal.inrae.fr/hal-03714590>.
- CHAMBRE D'AGRICULTURE DES LANDES. 2017. « Essai de production de CIVE (cultures intermédiaires à vocation énergétique) en interculture du maïs en vue de l'alimentation d'un méthaniseur ». Chambre d'Agriculture des Landes.
https://landes.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Nouvelle-Aquitaine/101_Inst-Landes/Documents/techniques_et_innovations/PV/resultats_experimentations_2017/essai_productions_CIVE.pdf.
- CRE. 2018. « Interconnexions gazières ». Commission de Régulation de l'Énergie.
<https://www.cre.fr/Gaz-naturel/Reseaux-de-gaz-naturel/Interconnexions>.
- DARTOIS, Pierrick, et Marie SUDERIE. 2022. « Couvrir nos besoins énergétiques: 2050 se prépare aujourd'hui ». *Presses des Mines - Transvalor la Fabrique de l'industrie*.
- DE RAVIGNAN, Antoine, Marc DECONCHAT, Florin MALAFOSSE, et Madeleine CHARRU. 2021. « LE BOIS ÉNERGIE État des lieux, lieux de controverse », *SOLAGRO Afterres 2050*.
- DEMONSANT, Charlotte, Armand HATCHUEL, Kevin LEVILLAIN, et Blanche SEGRESTIN. 2023. « Le changement climatique comme péril commun. Réconcilier action climatique et justice sociale ». *Paris : Presses des Mines, collection Économie et gestion*.
- DGEC. 2022. « Panorama 2020 des biocarburants incorporés en France ».
<https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Panorama%202020%20des%20biocarburants%20incorpor%C3%A9s%20en%20France.pdf>.
- DREAL BRETAGNE. 2022. « Synthèse des bilans de fonctionnement des unités de méthanisation sur l'année 2020 en Bretagne ».
https://aile.asso.fr/wp-content/uploads/2022/03/20220121_DREAL_bilan_methanisation_vdf.pdf.
- FEMENIA, Fabienne, Alexandre GOHIN, et Alain CARPENTIER. 2010. « The Decoupling of Farm Programs: Revisiting the Wealth Effect ». *American Journal of Agricultural Economics* 92 (3): 836-48. <https://doi.org/10.1093/ajae/aap029>.
- FEREY, Pascal, et Claire TUTENUIT. 2023. « Quels besoins de gouvernance pour les différents usages de la biomasse ? ». Le Conseil économique social et environnemental.
<http://www.lecese.fr/travaux-publies/quels-besoins-de-gouvernance-pour-les-differents-usages-de-la-biomasse>.
- FRANCE AGRIMER. 2022. « Maïs grain : des disponibilités suffisantes pour répondre aux besoins de l'alimentation animale | FranceAgriMer - établissement national des produits de l'agriculture et de la mer ».
<https://www.franceagrimer.fr/Actualite/Conseils-specialises/Grandes-cultures/2022/Mais-grain-des-disponibilites-suffisantes-pour-repondre-aux-besoins-de-l-alimentation-animale>.

- GOUTALAND, Antoine, Charlotte DEMONSANT, Armand HATCHUEL, Kevin LEVILLAIN, Blanche SEGRESTIN, et Gérald VIGNAL. 2023. « Gérer le risque de black-out. Pour une application du modèle du péril commun ». *Revue française de gestion* 309 (2): 101-17. <https://doi.org/10.3166/rfg.309.101-118>.
- « GRDF - Projet Méthanisation | La vente du biométhane ». s. d. projet-methanisation. Consulté le 20 juin 2023. <https://projet-methanisation.grdf.fr/>.
- HAUET, Jean-Pierre. 2019. « Les énergies intermittentes : jusqu'où ? » *Annales des Mines - Responsabilité et environnement* N° 93 (1): 25. <https://doi.org/10.3917/re1.093.0025>.
- INRAE. 2020. « L'Initiative internationale "4 pour 1000" - Les sols pour la sécurité alimentaire et le climat ». <https://4p1000.org/>.
- IPCC. 2021. « Climate Change 2021: The Physical Science Basis - IPCC Working Group Ii contribution to the Sixth Assessment Report ». <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/figures/chapter-8/>.
- JOUVEN, Magali, Laurence Puillet, Christophe PERROT, Thomas POMEON, João-Pedro DOMINGUEZ, Thierry BONAUDO, et Muriel TICHIT. 2018. « Quels équilibres végétal/animal en France métropolitaine, aux échelles nationale et « petite région agricole » ? » *INRAE Productions Animales* 31 (4): 353-64. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2018.31.4.2374>.
- KAPSAMBELIS, Dorothee. 2022. « Modélisation d'événements climatiques extrêmes sur les productions agricoles à horizon 2050: Application à la gestion économique du risque », *Economies et finances*.
- LA FABRIQUE ECOLOGIQUE. 2022. « Les prairies et l'élevage des ruminants au cœur de la transition agricole et alimentaire ». *La fabrique écologique* (blog). <https://www.lafabriqueecologique.fr/les-prairies-et-lelevage-de-ruminants-au-coeur-de-la-transition-agricole-et-alimentaire/>.
- LAMY GRANDIDIER, Claire. 2020. « Les bovins consomment 89 % des fourrages produits en France ». *Mon Cultivar Élevage*. <https://www.mon-cultivar-elevage.com/content/les-bovins-consomment-89-des-fourrages-produits-en-france>.
- MASA. 2018. « Une stratégie bioéconomie pour la France - Plan d'action 2018-2020 ». Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire. <https://agriculture.gouv.fr/une-strategie-bioeconomie-pour-la-france-plan-daction-2018-2020>.
- MERCIER, Antoine, et Corentin REISS. 2021. « Industrialo-technique ou agro-écologique ? Face au changement climatique : quel choix stratégique ? ». *Mémoire du Corps des Mines*.
- MORISSET, Jean-Marie. 2017. « Localisation des silos agricoles nécessaires à l'exploitation ». Sénat. 2 novembre 2017. <https://www.senat.fr/questions/base/2017/qSEQ171101837.html>.
- MOURJANE, Ilyas, et Julien FOSSE. 2022. « Biomasse forestière : un gisement sous contraintes ». *Note à paraître de France Stratégie*.
- QUENNESSON, Arthur, et Sophie DECAUX. 2020. « Produire de la biomasse et du méthane avec la double culture dédiée ». Filabiom. <http://www.agro-transfert-rt.org/wp-content/uploads/2020/10/filabiom-fiches-double-culture.pdf>.
- RITCHIE, Hannah, Pablo ROSADO, et Max ROSER. 2022. « Crop Yields ». *Our World in Data - FAO*. <https://ourworldindata.org/crop-yields>.
- SOLAGRO. 2016. « Afterres2050 - Un horizon pour l'agriculture et l'alimentation ». *Afterres2050*. <https://afterres2050.solagro.org/>.
- « Stratégie Nationale Bas-Carbone ». 2015. Ministères Écologie Énergie Territoires. révisée en 2018-2019. <https://www.ecologie.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc>.
- TIERS, Nathalie. 2022. « Stockage à la ferme : un calcul gagnant pour les agriculteurs et les coopératives ». *Terre-net*. <https://www.terre-net.fr/stockage-des-cereales/article/209195/stockage-a-la-ferme-un-calcul-gagnant-pour-les-agriculteurs-et-les-cooperatives>.
- TOULEMONDE, Marie. 2022. « Comment sortir l'Afrique de sa dépendance aux céréales importées – Jeune Afrique ». *JeuneAfrique.com*. <https://www.jeuneafrique.com/1324825/economie/comment-sortir-lafrique-de-sa-dependance-aux-cereales-importees/>.

TRADING ECONOMICS. 2023. « Wheat trading price - 25y ». *Trading Economics*.
<https://tradingeconomics.com/commodity/wheat>.

« Vaches allaitantes - La baisse du cheptel est plus importante que prévu - Élevages bovins lait et viande, Tendances des marchés ». 2023. *Agri Mutuel* (blog).
<https://www.agri-mutuel.com/elevage/la-baisse-du-cheptel-est-plus-importante-que-prevu/>.

VAISS, Pierre. 2023. « La biomasse et la neutralité carbone ». Groupe de travail 1, Comité de prospective de la CRE.

Entretiens cités

AUBERT, Pierre-Marie. 2023. Entretien avec Pierre-Marie Aubert, directeur des politiques alimentaires et agricoles à l'IDDRI.

CAMPARGUE, Matthieu. 2023. Entretien avec Matthieu Campargue, directeur général de RAGT Energie.

DEMARCO, François. 2023. Entretien avec François Demarcq, référent énergie et président du groupe de travail alimentation, élevage et stockage de carbone pour La Fabrique Ecologique.

DRAHI, Etienne. 2022. Entretien avec Etienne Drahi, directeur des projets de recherche pour le déploiement durable du photovoltaïque chez TotalEnergies.

DRON, Dominique. 2023. Entretien avec Dominique Dron, membre associée du Conseil Général de l'Économie.

FAUCHERON, Bruno. 2023. Entretien avec Bruno Faucheron, Polyculteur-Éleveur bovin lait biologique à Cheveuges (Ardennes, 08).

FREMAUX, Benjamin, Xavier COLLIN, et Thibault YON. 2023. Entretien avec IDEX.

GIRARD, Benoit, et Jérôme MASSON. 2022. Entretien avec Benoit Girard et Jérôme Masson, maraîchers à Bray Saint Aignan (Loiret, 45).

HOLLEAUX, Didier, Benjamin HAAS, Frederic TERRISSE, et Guillaume ERBS. 2023. Entretien avec ENGIE.

LEPAGE, Jean-Christophe. 2023. Entretien avec Jean-Christophe Lepage, polyculteur-éleveur bovin lait et méthaniseur à Bazeilles (Ardennes, 08).

LHERMITTE, Serge, Sébastien BOUVATIER, Sylvain REALLON, et Martin LAURENCEAU. 2022. Entretien avec la Direction Générale de la Performance Environnementale du Ministère de l'Agriculture.

QUAAK, Jacques-Pierre. 2023. Entretien avec Jacques-Pierre Quaak, Polyculteur - éleveur bovin allaitant - méthaniseur à Chaumes-en-Brie (Seine-et-Marne, 77).

TUTENUIT, Claire. 2023. Entretien avec Claire Tutenuit, déléguée générale d'Entreprises pour l'Environnement et membre du Conseil Economique Social et Environnemental.