







QUELLES **BIOMASSES** POUR LA TRANSITION **ÉNERGÉTIQUE ?**



Solagro

Ce rapport a été réalisé par Solagro avec le soutien financier de GRDF.

Rédaction et coordination de l'étude - Simon Métivier, Sylvaine Berger - Solagro

Réalisation des fiches ressources et valorisation - Simon Métivier, Sylvaine Berger, Céline Porhel, Nicolas Bijon, Florin Malafosse, Christian Couturier, Frédéric Coulon - Solagro

Réalisation graphique - Équipe communication de Solagro (Rapport final), Groupe Rouge Vif (Fiches)

Crédits photo - Solagro, Adobe Stock

- Version 3 - Octobre 2024 -

Sommaire

1 LE BESOIN D'ÉCLAIRER LE DÉBAT Page 4

2 BIOMASSE ET BIOÉNERGIES : CONTEXTE ET ENJEUX Page 6

2.1 La biomasse et l'usage des terres....6
2.2 L'agriculture....7
- Les caractéristiques de l'agriculture en France....7
- Bioénergies et agriculture....8

2.3 La forêt et les haies....9
- Les forêts et les haies....9
- Puits de carbone de la forêt....9

2.4 Les déchets....10
2.5 La question du carbone et des enjeux de biodiversité....11
- La question du carbone....11
- Impact sur la biodiversité....12

3 DES DONNÉES POUR OBJECTIVER LE DÉBAT Page 13

3.1 Méthode et hypothèses....13
- Ressources considérées....13
- Vision prospective des ressources de biomasse....14
- Filières de valorisation possible de la biomasse....16

3.2 Évaluation de la ressource et filières de valorisation....17
- Potentiel de ressources biomasse....17
- Potentiel de production d'énergie, selon vecteur et cas d'usage final....19
- Résultat de l'analyse multi-critères des filières de valorisation....21
- Analyse des différentes filières de valorisation de la biomasse....22

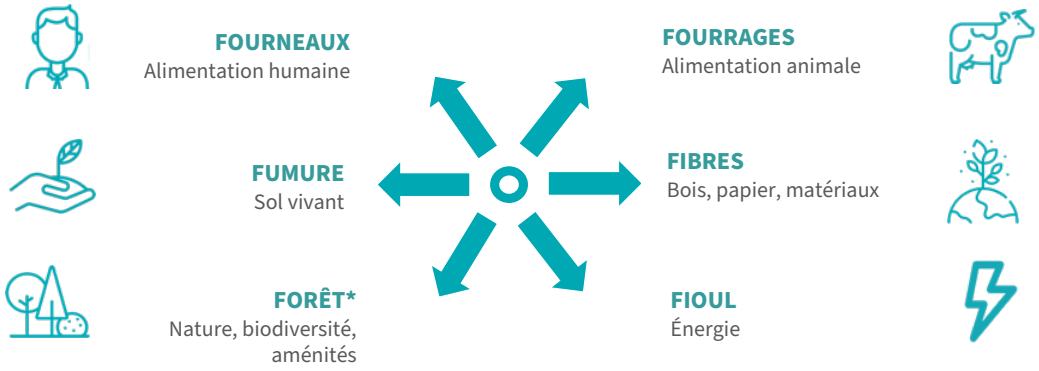
4 CONCLUSIONS ET ENSEIGNEMENTS Page 25

4.1 Les ressources....25
4.2 Les filières de valorisation....25
4.3 Les usages finaux....26

5 ANNEXES ET BIBLIOGRAPHIE Page 28

1 LE BESOIN D'ÉCLAIRER LE DÉBAT

Les « terres », et la biomasse qu'elles produisent, fournissent des biens de consommation et des services écosystémiques qui correspondent aux aménités environnementales et sociétales (Figure 1). La répartition actuelle de ces usages est l'héritage d'un système anthropologique, résultat de contraintes biophysiques, de facteurs culturels, de choix politiques et socioéconomiques.



* Foresta (VII° Siècle) : « territoire soustrait à l'usage général » ; « proscription de culture, d'habitation »

Figure 1 : Les six «F» synthétisant les usages - Afterres2050

Si la question de la mobilisation énergétique de la biomasse demeure une question sensible, elle ne peut pour autant être ignorée. L'atteinte de la «neutralité carbone» en 2050 suppose en effet d'abandonner l'usage des énergies fossiles et de recourir uniquement à des sources d'énergie décarbonées.

L'électricité, aujourd'hui vecteur énergétique décarboné privilégié, ne représentera pourtant, en France et à cet horizon, qu'environ 50% de l'énergie finale (contre 25% aujourd'hui). Toutes les stratégies de décarbonation reposent sur une électrification croissante des usages et un développement des bioénergies : la grande majorité des scénarios de prospective énergétique accordent ainsi une place plus importante aux bioénergies, qu'il s'agisse de biomasse solide, liquide ou gazeuse. En effet, certains secteurs et usages demeurent plus difficilement électrifiables que d'autres, que ce soit à cause de limites technologiques (besoin de chaleur haute température, transports terrestres lourds et/ou longue distance, transport maritime, transport aérien), de contraintes pratiques (difficulté d'installation de pompes à chaleur électrique dans certains logements) ou pour des considérations d'efficacité énergétique. L'autre moitié de notre consommation d'énergie devra être en partie assurée par la biomasse, une source d'énergie « multi-usages », aujourd'hui insuffisamment prise en compte dans le débat public.

Qu'il s'agisse d'exercices nationaux, tels que la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) (MTES 2020) ou les scénarios « Transition(s) 2050 » (ADEME 2021) ; européens, tel que « Fit-for-55 » ou encore ceux du GIEC (GIEC 2022), les scénarios de transition accordent systématiquement une part plus importante aux bioénergies par rapport à aujourd'hui. À titre d'exemple, les scénarios à l'échelle mondiale qui permettent de limiter le réchauffement climatique à moins de 1,5°C mobilisent plus de 100 exajoules (EJ) de biomasse en 2050, soit le double de la valeur actuelle (GIEC 2022).

1 LE BESOIN D'ÉCLAIRER LE DÉBAT

La ressource globale de biomasse est une quantité finie : les surfaces métropolitaines sont anthropisées et une augmentation significative de la quantité de biomasse - du fait des limites en eau et en nutriments - semble peu probable sans impacter l'environnement (sol, biodiversité, air). Les enjeux climatiques et la nécessité d'insérer nos modes de production et de consommation au sein des limites planétaires imposent des arbitrages dans la mobilisation de la biomasse.
Des choix liés à la biomasse sont donc nécessaires, au niveau national comme sur chacun des territoires concernés, que ce soit au niveau a) de l'utilisation des espaces agricoles et forestiers, b) des usages et c) des filières de valorisation, fonction de leur efficacité et leurs externalités. Il semble alors essentiel de dresser l'inventaire de l'ensemble des ressources de biomasse, qu'elles soient d'origine agricole, forestier, ou encore liées à la fin des cycles (déchets) afin d'en appréhender leurs réalités et leurs conditions de mobilisation avant de s'intéresser aux différentes filières de production de bioénergies capables de les valoriser.
Face aux enjeux d'arbitrage de cette ressource finie, il convient d'éclairer la décision publique en mobilisant des critères autant énergétiques qu'environnementaux.

Ainsi, cette étude propose d'évaluer les différentes ressources, aujourd'hui et à horizon 2050 en prenant appui sur le scénario Afterres2050, puis d'évaluer les différentes technologies de valorisation énergétique de cette biomasse à travers une grille de critères (11 critères au total : technico-économiques, environnementaux, intégration territoriale). L'objectif est ainsi d'éclairer le débat sur les options pour mobiliser efficacement cette biomasse dans le contexte de transition énergétique, sans pénaliser les usages prioritaires de la biomasse que sont l'alimentation, le maintien de la fertilité des sols et la production de matériaux.

Sans avoir vocation à réaliser les arbitrages entre les filières, ce travail vise à mieux définir ce qu'est la biomasse-énergie et son potentiel, en identifiant la ressource potentielle primaire et finale selon les filières de valorisation. Chaque filière faisant l'objet d'une analyse multicritères permettant de situer son intérêt vis-à-vis des ressources de biomasse quantifiées.







2 BIOMASSE ET BIOÉNERGIES : CONTEXTE ET ENJEUX

Le besoin d'éclairage sur la mobilisation de la biomasse à des fins énergétiques nécessite une prise de recul afin de comprendre les enjeux concernant l'usage des terres, qu'elles soient agricoles ou forestières. Ainsi, il est proposé dans ce chapitre de faire un point sur les définitions mais également sur l'état des lieux et les enjeux liés aux ressources primaires que sont les produits issus de l'agriculture, les produits de la forêt et des arbres hors forêt, ainsi que la question des déchets.

2.1 La biomasse et l'usage des terres

Le terme de biomasse désigne, dans le domaine de l'énergie, toute matière organique renouvelable, quelle qu'en soit l'origine, pouvant être transformée dans une forme d'énergie exploitable par les sociétés humaines. En écologie, la biomasse désigne la masse totale des organismes vivants. Il existe un rapport étroit entre biomasse et énergie, puisque toute biomasse est une forme d'énergie : la photosynthèse alimentée par l'énergie solaire, organise le gaz carbonique (fournisseur de carbone) et l'eau (fournisseur d'hydrogène) sous forme de glucides, lipides et protides, qui constituent l'ensemble des matières vivantes. C'est la rupture des liaisons atomiques ainsi créées entre carbone et hydrogène, par oxydation (combustion) ou fermentation (digestion), qui restitue cette énergie sous forme de calories alimentaires et de bioénergies sous différentes formes.

La biomasse « primaire » est celle qui est produite par les écosystèmes naturels ou cultivés, forêt, agriculture et espaces verts. La biomasse « secondaire » est issue des premières étapes de transformation de la biomasse récoltée, par exemple les connexes de scierie ou les sous-produits des industries agroalimentaires. Enfin, la biomasse « tertiaire » comprend l'ensemble des biomasses en fin de vie : biodéchets des ménages, des entreprises, déchets de bois en fin de vie, effluents industriels et municipaux.

En 2020, l'usage des terres en France, représentant 55 millions d'hectares au total, est réparti comme suit :

31% de forêts - *soit 17 millions hectares de forêts exploitables et inaccessibles*

52% de terres arables - *soit 28,6 millions hectares de grandes cultures annuelles, prairies, vignes, vergers...*

17% de sols non-productifs - *soit 9,4 millions hectares de sols artificialisés, landes, rochers, lacs*

Les sols artificialisés continuent d'augmenter au détriment des surfaces agricoles (cultures principalement), alors que les surfaces de forêts s'étendent sur les terres arables (principalement prairies) (*Figure 2*).

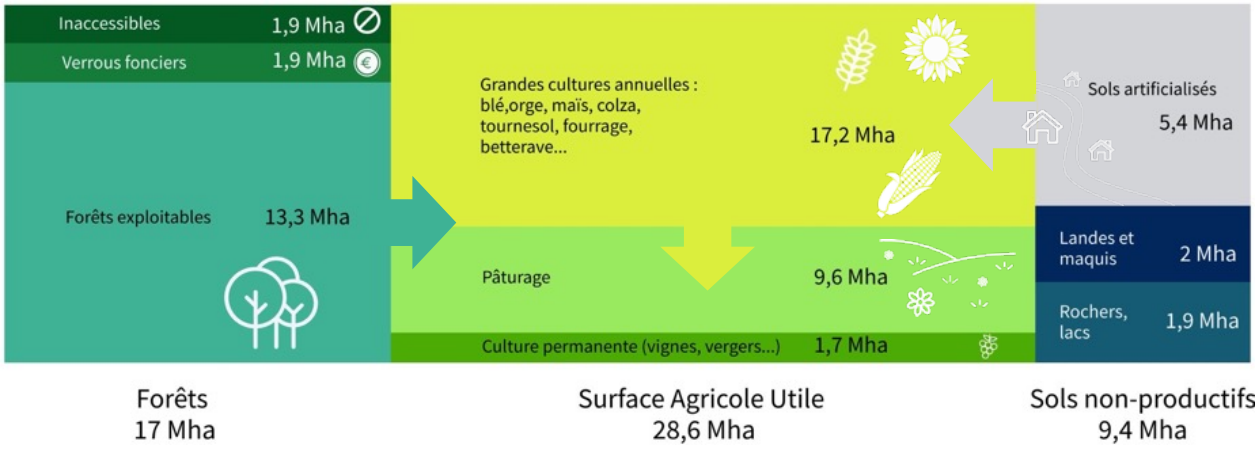


Figure 2 : Utilisation du territoire en 2020, en France Métropolitaine - SGPE

L'usage des terres aboutit à la production de biomasse végétale : fourrages, résidus de cultures, graines/fruits/légumes et bois. Ainsi, chaque année en France métropolitaine, la production de biomasse est évaluée à une valeur de l'ordre de 315 MtMS (millions de tonnes de matières sèches). De ce total, la quantité de biomasse mobilisée aujourd'hui pour des usages énergétiques représente une fraction limitée (40 MtMS) (CESE 2023), soit :

- 27 MtMS sous forme de bois énergie – forêt, hors forêt, déchets (soit environ 100 TWh),
- 5 à 6 MtMS de résidus de cultures, couverts intermédiaires et déjections animales en méthanisation (soit environ 13 à 15 TWh [1]),
- 4 à 5 MtMS de grains/racines (colza, blé, betterave) transformés en biocarburants de première génération (soit environ 20 TWh).

2.2 L'agriculture

Les caractéristiques de l'agriculture en France

La « Ferme France » se caractérise par une ferme d'élevage (bovins, porcins, volailles) : 70% de la surface agricole utile est dédiée à l'alimentation des animaux. Toutefois, les cheptels bovins et porcins voient leur nombre de têtes décroître de façon importante depuis plusieurs années.
Globalement, les cultures sont produites à partir de rotations culturales assez courtes, avec peu de légumineuses (plantes capables de symbiose fixatrice de l'azote de l'air), et consommatrices d'intrants (engrais minéraux, pesticides, herbicides).
Les surfaces en agriculture biologique sont en constante augmentation depuis 2013, et représentent près de 2,78 millions d'hectares fin 2021, soit 13% des exploitations agricoles françaises.
Les surfaces dédiées à la production de biomasse hors usages alimentaires (surfaces liées à la production de carburants 1ère génération, de biogaz, de textiles, de biomatériaux, les surfaces pour les chevaux) sont de l'ordre de 1,5 millions d'hectares, soit de l'ordre de 5% des terres arables.

1 | Fin 2022, environ 9 TWh de biométhane injecté sur le réseau de naturel et 4 à 6 TWh/an de biogaz cogénéré

BIOMASSE ET BIOÉNERGIES : CONTEXTE ET ENJEUX

Bioénergies et agriculture

La production alimentaire n'a jamais été l'unique finalité de l'agriculture (ex : productions de matériaux comme le coton, le lin, la laine ou le chanvre). Au regard des enjeux de décarbonation, la contribution de l'agriculture au bilan énergétique doit connaître une croissance très rapide sans nuire à la souveraineté alimentaire.
Ainsi, les marges de manœuvre de mobilisation de la ressource pour l'énergie dans l'espace agricole nécessiteront des modifications des pratiques culturales, avec notamment l'introduction de cultures intermédiaires à vocation énergétique (CIVE) qui présentent de nombreux avantages pour l'environnement[2], et la valorisation des résidus de cultures (qui doit néanmoins se faire en respectant un certain taux de retour au sol de la matière organique – retour qui peut aussi être assuré par l'épandage des digestats[3] de méthanisation[4]).
En outre, la baisse du cheptel, déjà engagée et confortée par la nécessité de réduire la consommation de protéines animales pour la santé ainsi que pour limiter les émissions de gaz à effet de serre, entraînera la « libération » de surfaces au profit, dans une combinaison à déterminer, des fonctions de protection (biodiversité, stockage de carbone, aménités environnementales) et des fonctions de production répondant aux enjeux actuels (alimentation humaine végétale, matériaux, énergie).

La question de l'azote, nutriment nécessaire pour la croissance des plantes, est également cruciale avec cette évolution de l'agriculture. Il existe deux manières d'introduire de l'azote dans un agro-système :

LA FIXATION SYMBIOTIQUE

Processus biologique qui permet de convertir l'azote de l'air ambiant (N_2) en azote ammoniacal (NH_3) assimilable par les plantes. Cette symbiose fixatrice d'azote est assurée les légumineuses (luzerne, le trèfle, le lupin par exemple), le lin et les bactéries du sol.

LA VOIE THERMOCHIMIQUE

Par le biais du procédé Haber-Bosch, développé au début du XX^{ème} siècle qui permet la synthèse de l'ammoniac à partir d'hydrogène (H_2), produit actuellement à partir de méthane (CH_4, gaz fossile), et de l'azote de l'air (N_2). Ce procédé de production de l'azote minéral de synthèse est très énergivore. À noter également que la France est le 4ème importateur mondial d'engrais de synthèse, dont les principaux pays producteurs sont la Chine et la Russie.

En parallèle, le retour au sol de la matière organique, pour alimenter la biologie des sols et participer du stockage du carbone dans les sols doit être amélioré. Le retour au sol des matières organiques, qu'il soit lié aux pratiques agricoles (couverts végétaux) ou à la fertilisation organique par les produits résiduaires organiques (PRO)[5], y compris ceux destinés à une valorisation énergétique, constitue un point d'attention essentiel. Prélever et valoriser la biomasse implique nécessairement la prise en compte des enjeux de stockage du carbone dans les sols et du cycle de l'azote.

2 | La couverture des sols en période intercultures évite l'érosion des sols ou le lessivage des nutriments par les pluies (donc la pollution des eaux de surface ou souterraines) et la minéralisation de la matière organique (déstockage de carbone du sol).

3 | Le digestat est constitué de bactéries excédentaires, matières organiques non dégradées et matières minéralisées. Après traitement, il peut être utilisé comme compost.

4 | Source : La Fabrique Écologique, 2023

5 | Effluents d'élevages bruts ou traités, composts, digestats, effluents

2.3 La forêt et les haies

Les forêts et les haies

Les forêts françaises occupent actuellement 17 millions d'hectares, soit 31% du territoire métropolitain (la quatrième superficie d'Europe après la Suède, la Finlande et l'Espagne). La forêt française est composée majoritairement de feuillus (72%) et de résineux (28%), principalement en montagne et dans le département des Landes (40). Elle est majoritairement privée (75%), avec de nombreux propriétaires, ce qui peut constituer un verrou pour l'accès aux ressources. Le taux de boisement, c'est-à-dire la surface occupée par la forêt divisée par la surface totale, est en moyenne de 31%. Pour autant, la répartition des forêts n'est pas uniforme sur l'ensemble du territoire (Figure 3). On constate des différences significatives selon les départements : alors que certains massifs « productifs » sont déjà exploités à la limite, voire au-delà de leurs capacités biologiques, de très nombreuses forêts demeurent peu, voire pas du tout exploitées pour leur bois.

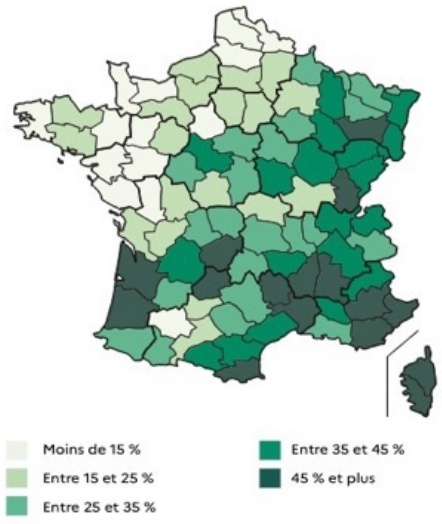


Figure 3 : Taux de boisement par département, France métropolitaine

La surface occupée par les forêts a énormément progressé depuis le milieu du XIX^{ème} siècle principalement par le fait de différents phénomènes : la baisse des besoins en surface de l'agriculture liée à l'augmentation des rendements, à l'exode rural, aux réglementations de protection des forêts, liées notamment au nouveau regard sur les espaces naturels et en particulier les paysages forestiers. Ainsi, l'évolution des surfaces forestières en France métropolitaine est décorrélée des consommations de bois. A contrario, les infrastructures agroécologiques arborées (haies, bosquets et alignements d'arbres) ont reculé de 188 000 hectares durant la période 2010-2018, au profit principalement des terres agricoles.

Puits de carbone de la forêt

Si les forêts françaises offrent d'importantes ressources non mobilisées, les impacts du changement climatique sont déjà présents avec une hausse de la mortalité et des accidents sanitaires (notamment liés aux scolytes, insectes xylophages s'attaquant principalement aux épicéas), une hausse de l'indice de feux de forêt et une réduction de l'accroissement des arbres. De ce fait, depuis 2016, le puits de carbone de la forêt décroit fortement.
En effet, concernant l'accroissement naturel, une augmentation était observée depuis les années 1990, lié au gain de surface et la jeunesse des surfaces forestières, mais ces 5 dernières années ont enregistré un réel changement de tendance : les années chaudes et sèches ralentissent la croissance des arbres.

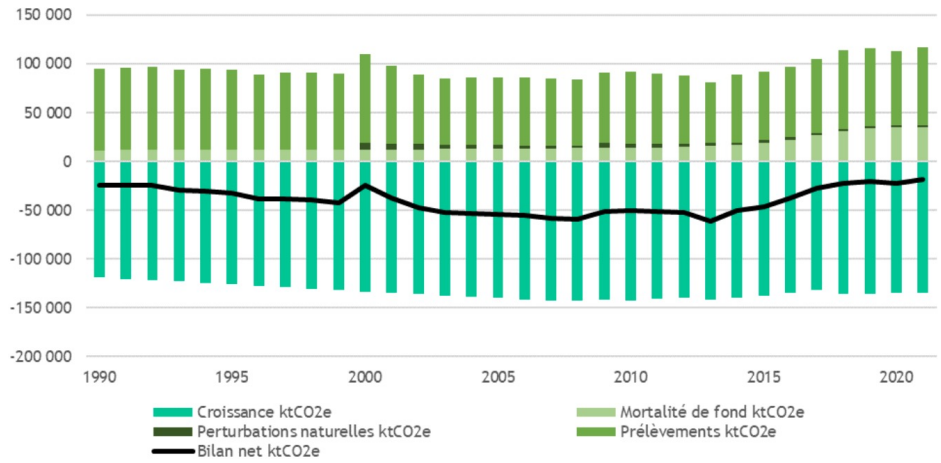


Figure 4 : Bilan net CO_2 pour le sous-secteur forêt de l'UTCATF, métropole uniquement en $KtCO_2e$ - CITEPA, rapport SECTEN 2023.

Ainsi, la résilience des espaces forestiers apparaît comme un critère principal qui doit guider les choix de gestion de la forêt à l'avenir.

2.4 Les déchets

La France produit aujourd'hui près de 326 millions de tonnes de déchets (déchets de ménages, des entreprises et de la construction) soit presque 5 tonnes par Français et par an, dont 580 kg/hab/an pour les déchets des ménages.
Les pouvoirs publics s'orientent, depuis plus de 10 ans, dans une politique de gestion de déchets sur la réduction de la production, la hiérarchisation des modes de traitement en privilégiant la réduction, la réutilisation, le recyclage et la valorisation avant l'élimination (Loi dite "AGEC", février 2020[6] notamment) :

- → Réduction de 15 % des Déchets Ménagers et Assimilés (DMA) entre 2010 et 2030 (interdiction progressive des plastiques jetables, réduction des plastiques, réduction de moitié du gaspillage alimentaire...) ;
- → Développement du réemploi (créer un indice de réparabilité, allongement de la durée de vie des produits, création de nouvelles filières de réemploi...) ;
- → Augmentation de la valorisation matière et organique : atteindre 65 % de valorisation de déchets non dangereux en 2025 ;
- → Développement des filières de Responsabilité Élargie des Producteurs (REP) : réemploi, écoconception, incorporation de matière recyclée, création de nouvelles filières sur les produits et matériaux ;
- → Réduction de 50 % des déchets non dangereux enfouis (2010 à 2025) ;
- → Tri à la source des biodéchets pour l'ensemble des producteurs (entreprises, ménages) depuis le 1er janvier 2024.

6 | Loi n° 2020-105 du 10 février 2020 relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire.

Ces objectifs sont applicables pour l'ensemble des déchets y compris ceux issus de la biomasse: biodéchets et déchets de papiers/cartons des ménages et des entreprises, déchets de bois en fin de vie, effluents industriels, boues urbaines issues des stations d'épuration.

La production de ces déchets devrait donc baisser dans les années à venir même pour une augmentation de la population. L'enjeu de leur valorisation n'en reste pas moins important, notamment du fait que les filières de collecte, voire de valorisation, démontrent une maturité variable, certaines sont étant déjà largement construites (papiers/cartons, bois, effluents, boues urbaines), tandis que d'autres demeurent à un état de développement embryonnaire (biodéchets, CSR).

D'après la pyramide des usages, les déchets ne pouvant être évités ou réemployés doivent prioritairement être valorisés par des filières permettant un retour au sol (digestat co-produit de la méthanisation ou compost pour le compostage) avant de pouvoir être, le cas échéant, valorisés énergétiquement par d'autres filières.

Cas des Combustibles Solides de Récupération (CSR)

Les déchets non recyclables et/ou non triés (plastiques, mousses, résidus de tri, bois non triés...) peuvent faire l'objet d'une valorisation en CSR qui peuvent être valorisés pour la production d'énergie.
Ces CSR entrent partiellement dans le périmètre des bioénergies car une fraction qui les compose n'est pas biogénique (environ 40-50% aujourd'hui en moyenne en masse, avec des écarts selon le type de CSR).
La production de CSR est difficile à estimer à moyen-long terme du fait : d'une part d'une augmentation des capacités de production de CSR et d'autre part d'une amélioration du tri et de la collecte des matériaux vers la valorisation matière (papiers/cartons et les plastiques), voire d'énergie (déchets de bois).

2.5 La question du carbone et des enjeux de biodiversité

La question du carbone

Jouant un rôle de « squelette » des molécules organiques, le carbone est essentiel dans la formation de la biomasse végétale et par conséquent des bioénergies. Le caractère renouvelable des énergies « carbonées », dépend de la durée du cycle de renouvellement de la biomasse et des conditions de sa production.

Il est alors nécessaire de distinguer la durée cycles du carbone :

- D'une part, un cycle long du carbone, propre aux énergies fossiles issues de la décomposition des végétaux produits il y a des millions d'années qui ne sont pas comptabilisées comme de la biomasse, de même que la tourbe dont le cycle de renouvellement est de l'ordre du millénaire.

- D'autre part, des cycles courts : comme des cycles annuels (agriculture), au cours desquels le gaz carbonique émis lors de la combustion de la biomasse est égal à la quantité de CO_2 capté par photosynthèse dans l'année écoulée, pour lequel le bilan carbone est neutre.

- Pour des cycles pluriannuels du carbone, comme celui de la forêt, l'approche est nécessairement plus complexe :

  → Prélever peu de bois d'un massif forestier par rapport à la production naturelle de biomasse par la photosynthèse (accroissement) permet de stocker du carbone dans l'écosystème forestier ;

  → Prélever davantage de bois d'un massif forestier et l'utiliser en bioénergie en substitution des énergies fossiles.

Ainsi, si le premier cas est intéressant d'un point de vue du bilan carbone pour une forêt jeune (en pleine croissance) et sous contrainte climatique et sanitaire faibles, le deuxième cas présente un intérêt sur le temps long, avec un massif dont la croissance ralentit et est soumis à des pressions sanitaires ou des risques d'incendies. Or, il est à prévoir que le deuxième cas soit plus fréquemment observé.

Impact sur la biodiversité

Les conditions de production de la biomasse, agricole comme forestière, ont un impact sur la biodiversité. Une agriculture ou une exploitation forestière intensives sont susceptibles d'avoir des impacts négatifs, néanmoins certaines pratiques telles que l'introduction de haies, l'agroforesterie, l'implantation de cultures pérennes à vocation énergétique sur des terres arables ou la pratique raisonnée d'éclaircies en forêt, peuvent utilement contribuer au maintien ou à l'enrichissement de la biodiversité.
Ainsi, la production de bioénergies peut générer des externalités positives aux productions primaires de bois d'œuvre (forêt) ou alimentaires (agriculture) :

→ La valorisation d'une partie des résidus forestiers en énergie peut permettre le financement des opérations de sylviculture orientées vers la production de bois matériau, de travaux sanitaires ou de prévention des incendies ;
→ La valorisation du bois de haies pour le chauffage favorise leur conservation ;
→ La méthanisation des cultures intermédiaires est un facteur d'encouragement à cette pratique agroécologique.

Au sein de l'Union européenne, les directives dites « RED II » et « RED III »[7] sur les énergies renouvelables fixe des exigences de durabilité à l'utilisation des bioénergies en termes d'efficacité énergétique, de réduction des émissions de gaz à effet de serre, de pérennité des puits de carbone, et d'impact sur la biodiversité.

7 | *Directive (UE) 2023/2413 du Parlement européen et du Conseil du 18 octobre 2023 modifiant la directive (UE) 2018/2001, le règlement (UE) 2018/1999 et la directive 98/70/CE en ce qui concerne la promotion de l'énergie produite à partir de sources renouvelables, et abrogeant la directive (UE) 2015/652 du Conseil.*

3 DES DONNÉES POUR OBJECTIVER LE DÉBAT

3.1 Méthode et hypothèses

Ressources considérées

La quantification de la ressource en biomasse est réalisée pour la France métropolitaine, sur la période 2020 à 2050. Chaque ressource fait l'objet d'une évaluation de son potentiel théorique, en suivant dans la mesure du possible la méthodologie suivante :

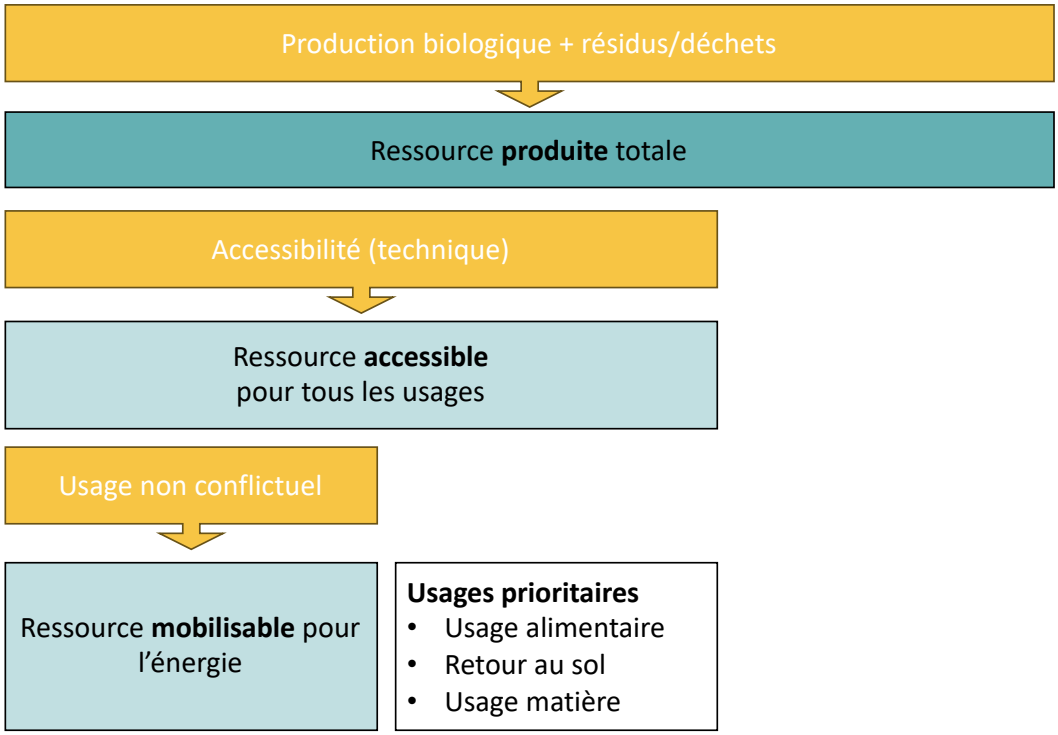


Figure 5 : Méthodologie d'évaluation de la ressource

Les ressources primaires sont directement extraites de l'environnement, que ce soit du bois des forêts ou des arbres hors forêt, mais aussi des produits de l'agriculture.
Les cultures énergétiques dédiées ne sont pas inclues dans le périmètre; le développement d'une filière durable de méthanisation ne devant pas entrer en concurrence avec la production alimentaire.
Les ressources secondaires sont des co-produits de la transformation de la biomasse. Il s'agit des coproduits des transformations du bois pour la production de bois d'œuvre, de meubles, mais aussi de la filière pâte à papier (liqueur noire).
Côté agriculture, la partie non alimentaire des cultures peut être mobilisée, tout comme les effluents d'élevage, et, plus en aval de la filière, les déchets de l'industrie agroalimentaire.
Enfin, les déchets en fin de vie sont aussi quantifiés, que ce soit les déchets issus du bois au sens large (bâtiment, meubles...) mais aussi tous les biodéchets des ménages, des commerces et de la restauration collective, ainsi que les boues des stations d'épuration des eaux usées.

Les Combustibles Solides de Récupération (déchets ultimes de déchets de plastiques ou de ressources fossiles, déchets de bois, papiers/cartons) sont pris en compte dans le potentiel, prenant en compte la part biogénique comme la part non biogénique étant donné que ces déchets sont aujourd'hui produits principalement en mélange et qu'ils se traitent avec des procédés similaires à ceux de la biomasse.

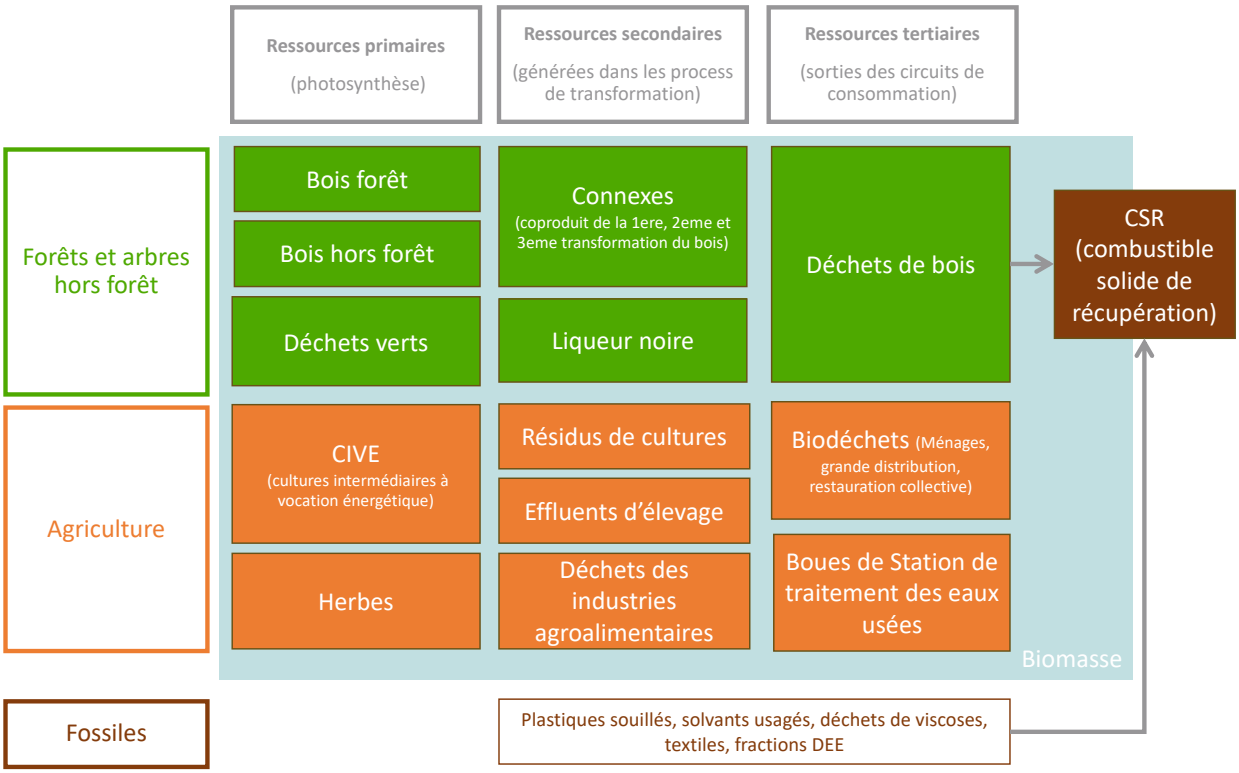


Figure 6 : Les différentes ressources issues de la biomasse pour un usage énergie

Vision prospective des ressources de biomasse

Sur sa dimension prospective (horizon 2050), l'étude s'appuie sur le scénario Afterres2050[8] qui interroge l'utilisation qui est faite des terres, sur le périmètre France, pour des activités telles que l'agriculture, la sylviculture et la pêche. Pour les déchets en fin de vie (déchets de bois, biodéchets, CSR, déchets IAA), la vision prospective est basée sur une revue bibliographique et notamment les scénarios Transition(s) 2050 de l'ADEME.

Le scénario Afterres2050 est un scénario normatif, visant à décrire un chemin de transition écologique équilibré permettant de répondre aux enjeux auxquels sont confrontés les agriculteurs, les forestiers et l'ensemble de la société française : ralentir la course du dérèglement climatique (évolution des températures, augmentation des phénomènes extrêmes), décarboner les usages énergétiques, faire face à la stagnation des rendements et à la perte des terres agricoles, lutter contre les pollutions (eau, air, sol) et la perte de biodiversité.

8 | *Dernière publication complète (SOLAGRO 2017), dernières mises à jour sur (https://afterres2050.solagro.org) (Solagro 2024)*

3 DES DONNÉES POUR OBJECTIVER LE DÉBAT

Le scénario Afterres2050 est basé sur l'évolution du régime alimentaire des Français, des pratiques agricoles et du flux import-export, dont il est possible de rappeler certaines des hypothèses constitutives et résultats :

→ *Régime alimentaire : vers plus de sobriété, meilleur pour la santé et pour l'environnement*

Réduction de la surconsommation alimentaire d'un facteur 3 (en valeur énergétique) et d'un facteur 2 (en valeur protéinique)

Division par 2 des **pertes et gaspillages alimentaires**

Réduction de la quantité de protéines animales (**-50%** de viande et **-20%** de produits laitiers) au profit des **protéines végétales** (légumineuses **x5**)

Augmentation de 65% de la consommation de **coquillages et crustacés** et **division par 4** de la consommation de **poissons**

→ *Systèmes agricoles : moins d'élevage et de meilleure qualité, l'agroécologie généralisée*

Ruminants **augmentation du temps de pâture** et de l'herbe dans la ration, **réduction du cheptel de 54%**, avec des races mixtes lait-viande

Porcs et volailles **Généralisation des productions sous labels**, réduction (en nombre de places) de **60%** pour les porcs et **50%** pour les poulets de chair

70% d'agriculture biologique et **30% de production intégrée** (semis direct, couverts végétaux, cultures associées...)

90% de réduction des produits phytosanitaires, 5% de surfaces en **infrastructures agroécologiques** avec doublement du linéaire de haies (+750 000 km)

Division par 2,5 des engrais azotés de synthèse

Division par 5 des émissions d'ammoniac et **par 2 le solde d'azote au sol**, multiplication par 5 des quantités d'azote par fixation symbiotique

Réduction de 10% des surfaces irriguées et de **30% de la consommation d'eau d'irrigation** **Division par 3** de la consommation en été

→ *Les flux d'import-export : plus sobres et respectueux de l'environnement*

Réduction des flux d'imports et d'exports en distance, volumes et surfaces

Abandon des importations de soja (tourteaux, huile) **et d'huile de palme**

Réduction des importations de produits à base de bois et arrêt de l'importation de bois tropicaux

Réduction de la pression de pêche pour reconstituer les stocks

FOCUS

Les bioénergies dans le scénario Afterres2050

Concernant plus spécifiquement la production d'énergie à partir de biomasse, l'utilisation des terres proposée dans le scénario Afterres2050 repose sur :

- → Le ralentissement de l'artificialisation des sols ;
- → L'augmentation de la surface de forêts et du linéaire de haies ;
- → La généralisation des couverts végétaux ;
- → L'augmentation des surfaces de cultures pérennes (type taillis à courte rotation) ;
- → Le développement de la méthanisation, afin de boucler le cycle de l'azote, facteur clé des rendements agricoles ;
- → Une augmentation du prélèvement en forêt (+ 12 millions de m^3 d'ici 2050, similaires aux scénarios S1 et S2 de l'ADEME[9], pour les usages bois d'œuvre, bois d'industrie et bois énergie, en se basant sur une évolution des pratiques sylvicoles vers davantage de sylviculture à couvert continu, mais aussi sur la sortie des pratiques intensives (mécanisation lourde, plantations régulières de résineux, coupes rases...) ;
- → Une stabilisation de la demande en bois d'œuvre et en bois d'industrie.

Filières de valorisation possible de la biomasse

Ce travail se concentre ainsi sur les filières de valorisation énergétique matures et en cours de développement qui permettent de produire, à partir de la biomasse, deux types de vecteurs énergétiques : des substituts au diesel et au kérosène, et du méthane. La combustion, principale voie de valorisation actuelle de la biomasse énergie, est aussi décrite.
La filière biomasse-to-hydrogène n'est pas étudiée, la voie électrolyse semble préférable pour la production d'hydrogène du fait d'un potentiel important d'électricité renouvelable.

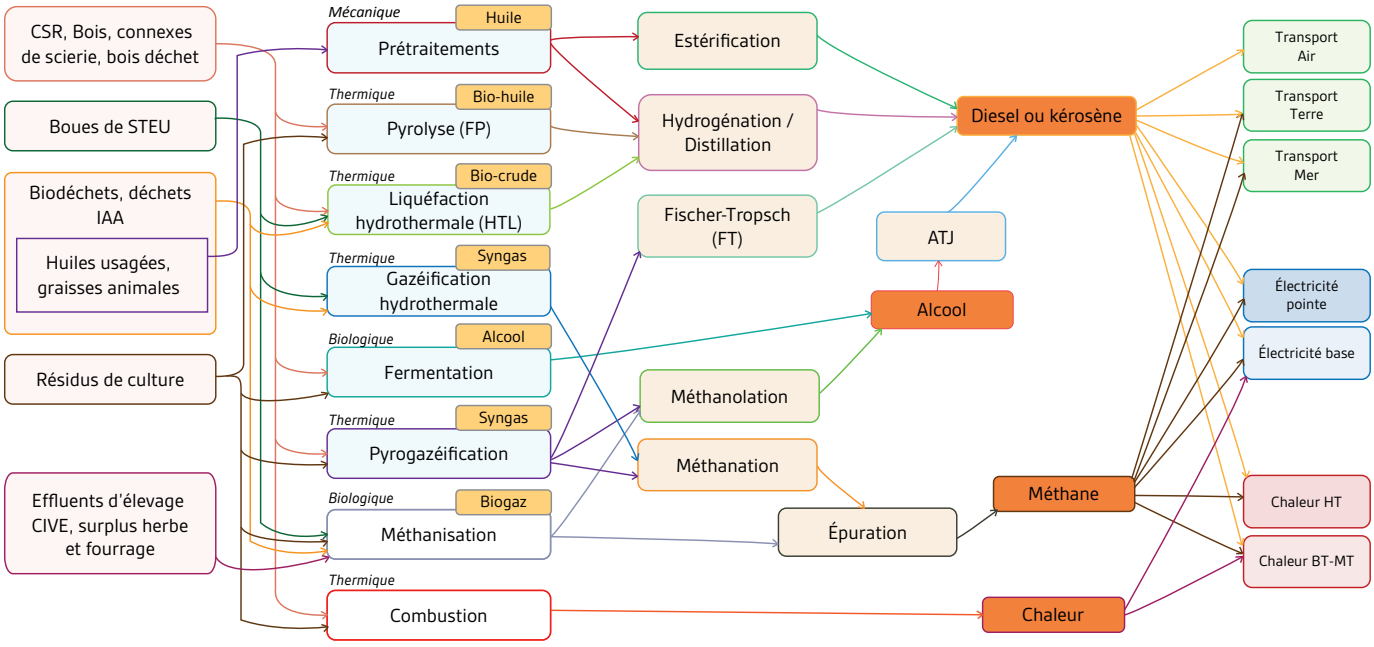


Figure 7 : Filières possibles de conversion de la biomasse pour des usages énergétiques

9 | *ADEME. 2021. « Transition(s) 2050 ». Horizons.*

La combustion reste aujourd'hui la voie la plus répandue : elle convertit directement la biomasse en chaleur. Des voies biologiques, telles que la méthanisation et la fermentation, permettent de produire du méthane ou du méthanol pour la première et de l'éthanol pour la deuxième. D'autres voies thermiques ou thermochimiques décomposent la matière organique (la pyrolyse, la pyrogazéification, la liquéfaction et gazéification hydrothermale) pour produire des hydrocarbures à chaîne courte (méthane) ou plus longues (carburants liquides sous forme de kérosène, diesel…), voire des alcools (méthanol). Les alcools peuvent être utilisés directement comme combustible ou carburant mais peuvent aussi être convertis en hydrocarbures liquides pour être plus facilement intégrés aux usages actuels, et notamment accéder à une valorisation comme carburant aérien. Aujourd'hui, seules les filières de combustion, de méthanisation avec production de méthane et le traitement des huiles et des graisses par estérification ou hydrogénation sont matures.

3.2 Évaluation de la ressource et filières de valorisation

Potentiel de ressources biomasse

Le potentiel de ressources pour 2050 s'élève à 100 MtMS, dont environ 60% provient de l'agriculture, 20% de la forêt et 20% des déchets des ces filières. Ce potentiel est mobilisable dès lors que ces ressources sont valorisées pour la production d'énergie avec un retour au sol des sous-produits. En effet, vis-à-vis des enjeux de durabilité des sols en agriculture, il est essentiel que la valorisation des ressources issues de l'agriculture assure un retour au sol de la matière organique[10] stable d'une part (qualité « amendante », enjeu de stockage de carbone dans les sols, et dans une moindre mesure enjeu de vie biologique des sols) et d'autre part des nutriments N, P, K (qualité fertilisante).

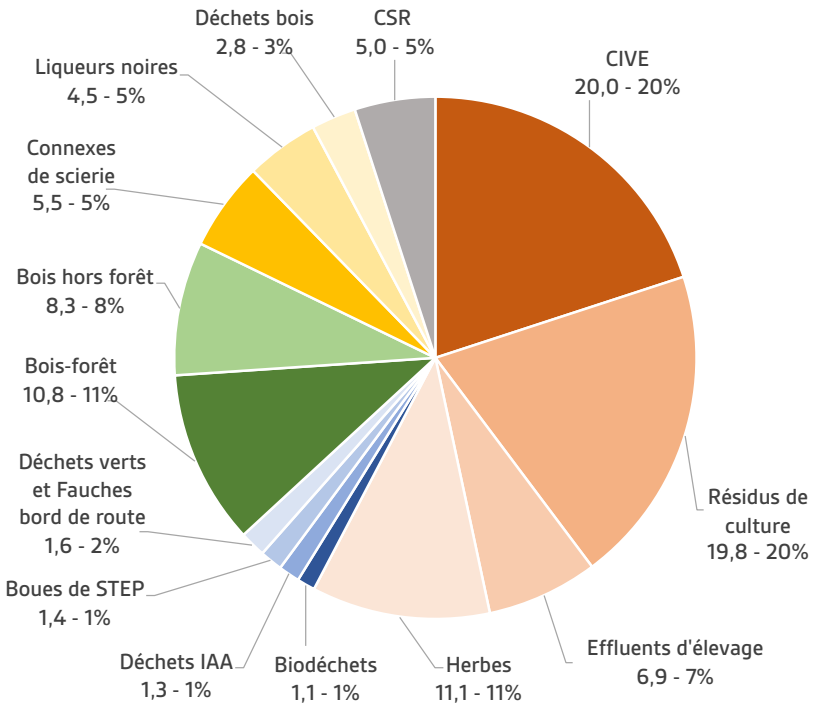


Figure 8 : Répartion des 100 MtMS de ressources potentielles de biomasse, pour une valorisation énergétique en 2050, Solagro

La seule filière de valorisation permettant ce double retour au sol est la filière méthanisation. Elle rend possible la valorisation d'une grande partie des résidus de culture (20 MtMS/an), des effluents d'élevage (7 MtMS/an), des surplus d'herbes (11 MtMS/an), mais aussi de développer les cultures intermédiaires (20 MtMS/an) qui génèrent des co-bénéfices agronomiques et environnementaux (voir la fiche « Ressources » sur les CIVE, §5.2). Elle permet également de valoriser les biodéchets et les déchets des industries agroalimentaires pour un peu plus de 1 MtMS/an chacun.

10 | *« En particulier la restitution de biomasse (retour au sol) et la contribution au cycle de la matière organique (maintien des résidus, intercultures, retour au sol des composts/digestats, etc.) doivent demeurer la priorité pour préserver voire augmenter les stocks de carbone des sols et les services écosystémiques associés. » (ADEME 2024)*

3 DES DONNÉES POUR OBJECTIVER LE DÉBAT

Sans retour au sol, le potentiel de ressources à 2050 est limité à 43 MtMS, une partie des ressources agricoles ne pouvant être mobilisées sans impacter la fertilité des sols. Au total, les ressources issues de l'agriculture représentent au maximum 58 MtMS/an (si retour au sol, sinon 5 MtMS). Les ressources primaires de bois (forêt et hors forêt) représentent 18 MtMS/an, les déchets ou co-produits du bois 13 MtMS/an, et les déchets biodégradables (biodéchets, déchets des IAA, boues de STEU, déchets verts) 5 MtMS/an. Les CSR ajoutent un potentiel de 5 MtMS/an.

Chaque ressource peut accéder à différentes filières de valorisation permettant une production d'énergie, sous la forme d'un vecteur principal (carburant liquide, gaz ou chaleur). Toutes les filières de valorisation ne sont pas nécessairement compatibles avec les ressources (Tableau 1), par exemple il n'est pas possible de méthaniser du bois.
Chaque ressource fait l'objet d'une fiche descriptive détaillée donnant le potentiel énergétique et son usage final pour chaque filière de valorisation (voir §5.2).

MtMS		Estérification de déchets gras	Hydrogénation de déchets gras	Pyrolyse rapide	Liquéfaction hydrothermale	Gazéification hydrothermale	Pyrogazéification (Fisher Tropsch)	Pyrogazéification (méthanation)	Pyrogazéification (méthanolation)	Fermentation	Méthanisation (méthanolation)	Méthanisation (Épuration)	Combustion
Fiche ressource	Vecteur final												
#1	CIVE (Culture intermédiaire à vocation énergétique)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20,0	20,0	-
#2	Résidus culture	-	-	4,8	-	-	4,8	4,8	4,8	4,8	19,8	19,8	4,8
#3	Effluents élevage	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6,9	6,9	-
#4	Herbes	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11,1	11,1	-
#5	Biodéchet (ménage, GMS, Resto)	0,1	0,1	-	-	-	-	-	-	-	1,1	1,1	-
#6	Déchets IAA	0,4	0,4	-	1,3	1,3	-	-	-	-	1,3	1,3	-
#7	Boues de STEP	-	-	-	1,4	1,4	-	-	-	-	1,4	1,4	-
#8	Déchets verts non ligneux + Tontes bord de route	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,6	1,6	-
#9	Bois énergie issu de forêt	-	-	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	10,8	-	-	10,8
#10	Bois énergie hors forêt	-	-	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	-	-	8,3
#11	Connexes scieries	-	-	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	-	-	5,5
#12	Liqueurs noires	-	-	-	4,5	4,5	-	-	-	-	-	-	4,5
#13	Bois déchet	-	-	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	-	-	2,8
#14	CSR	-	-	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	-	-	-	5,0
Total		**0,4**	**0,4**	**37,2**	**39,6**	**39,6**	**37,2**	**37,2**	**37,2**	**32,2**	**63,2**	**63,2**	**41,7**

Tableau 1 : Ressources mobilisables par filière de valorisation, en 2050 (non cumulable entre filières), en Mt MS/an

Potentiel de production d'énergie, selon le vecteur et le cas d'usage final

La quantification du potentiel d'énergie selon le vecteur énergétique principal (chaleur, méthane, carburant liquide) a été réalisée sur l'ensemble des ressources compatibles (Tableau 2). La description détaillée des filières de valorisation se trouve sur les fiches « valorisation » (§5.2). En complément, plusieurs cas d'usage final (Figure 9) : chaleur basse température (chauffage), chaleur haute température (usage industriel type four verrier), électricité de pointe, carburant pour les poids lourds (biocarburant liquide ou bioGNV), carburant pour le maritime (biocarburant liquide ou bioGNV) et pour le transport aérien (biocarburant liquide) ont également été quantifiés à partir du potentiel du vecteur principal et des rendements de conversion (Tableau 2). La description détaillée des cas d'usage et de leurs hypothèses de calcul sont dans la fiche « critère » (§5.2).

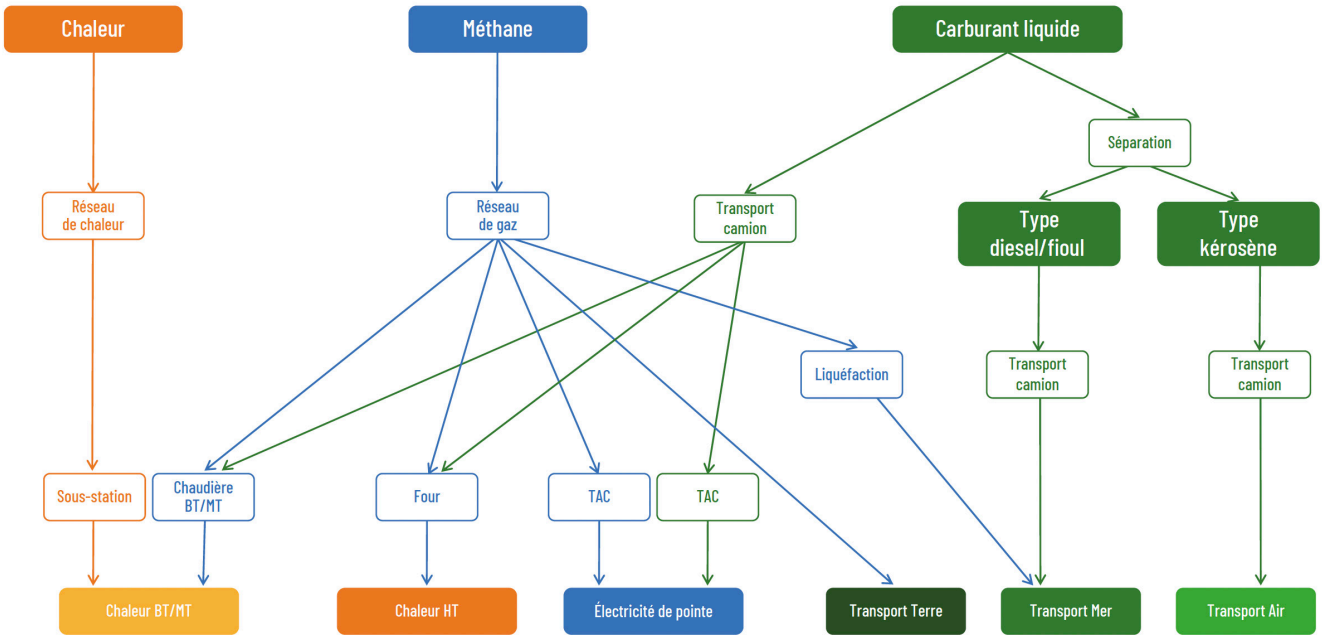


Figure 9 : Chaînes de valorisation possible des vecteurs énergétiques principaux et hypothèses de rendement

DES DONNÉES POUR OBJECTIVER LE DÉBAT

Filières de valorisation		Ressources mobilisables	Énergie produite (vecteur principal)		Selon usage final				
					Chaleur BT- MT	Chaleur HT	Électricité pointe	Carburants co-produits	
								Poids-lourd ou maritime	Aérien
		MtMS	Type	TWh	TWh	TWh	TWh	TWh	TWh
#1	Estérification de déchets gras	0,4		4,8	4,4	2,9	1,7	1,5	3,3
#2	Hydrogénation de déchets gras	0,4		5,1	4,8	3,1	1,8	1,6	3,5
#3	Pyrolyse rapide	37,2		93,8	87,0	56,3	32,9	29,3	64,5
#4	Liquéfaction hydrothermale	39,6		119,1	110,5	71,5	41,8	37,2	81,9
#5	Gazéification hydrothermale	39,6		131,2	121,2	78,4	45,9	108,9	0,0
#6	Pyrogazéification (Fisher Tropsch)	37,2		97,5	90,4	58,5	34,2	27,8	69,7
#7	Pyrogazéification (méthanation)	37,2		123,8	114,4	74,0	43,3	102,8	0,0
#8	Pyrogazéification (méthanolation)	37,2		82,2	76,3	49,3	28,9	8,7	73,5
#9	Fermentation	32,2		48,7	45,2	29,2	17,1	15,8	32,8
#10	Méthanisation (méthanolation)	63,2		146,8	136,1	88,1	51,5	15,6	131,2
#11	Méthanisation (épuration)	63,2		156,6	144,7	93,6	54,8	156,1	0,0
#12	Combustion	41,7		204,6	184,6	0,0	0,0	0,0	0,0

Tableau 2 : Potentiel de production d'énergie par vecteur et selon cas d'usage final à partir des ressources biomasses pour les 12 filières de valorisation

À NOTER

- → Les ressources mobilisables identifiées pour une filière ne sont pas forcément cumulables avec celles des autres filières (voir Tableau 1) ;
- → Pour une filière donnée, les potentiels de production d'énergie par usage final ne sont pas cumulables entre eux, sauf pour les filières carburant liquide pour lesquels les usages carburants sont cumulables (Poids-lourd/maritime plus carburant aérien)
- → Pour les combustibles ou carburants, les énergies sont exprimées en Pouvoir Calorifique Supérieur (PCS).

La combustion et la méthanisation offrent les potentiels de production d'énergie les plus importants du fait d'un accès plus large à la biomasse pour la méthanisation et d'un rendement énergétique élevé pour la combustion.

Résultat de l'analyse multi-critères des filières de valorisation

Chaque filière a fait l'objet d'une analyse multi-critères : 10 indicateurs ont été renseignés (Tableau 3) à partir des données bibliographiques disponibles permettant de caractériser les filières selon 3 catégories de critères :

Critères techniques - bilan massique, maturité technologique, bilan énergétique, taux de retour énergétique ;

Critères environnementaux - retour au sol du carbone et des nutriments, facteur d'émissions GES, polluants atmosphériques ;

Critères économiques et d'intégration territorial - coût de production, taille des unités, usage local à extra-territorial de l'énergie produite.

Chaque fiche « Filière de valorisation » (§5.2) détaille ces différents critères ; en annexe, le Tableau 3 synthétise les critères pour l'ensemble des filières.

			Critères techniques			Critères environnementaux				Critères économiques et intégration territorriale		
N° Fiche	Filières	Vecteur principal produit	Maturité	Co-produits chimique / énergétique	Taux retour énergétique vecteur principal	Retour au sol carbone	Retour au sol Nutriment	Émissions de GES (geq CO_2 /MWh)	Polluants atmosph.	Coût de production	Taille des unités (ktMS/an)	Usage du vecteur énergétique
#1	Estérification de déchets gras			Glycérine	> 10			50 - 50		€	10 - 800	Princ. extra-territorial
#2	Hydrogénation de déchets gras			-	5 à 10			50 - 80		€	100 - 2000	Princ. extra-territorial
#3	Pyrolise rapide			Naphta	< 5			-20 - 100		€€	100 - 3000	Princ. extra-territorial
#4	Liquéfaction Hydrothermale			Naphta	< 5			50 - 50		€€€	90 - 300	Princ. extra-territorial
#5	Gazéification Hydrothermale			CO_2 biogénique	> 10			-		€€€	4 - 50	Local à territorial
#6	Pyrogazéification (Fisher Tropsh)			CO_2 biogénique, Naphta	5 à 10			10 - 130		€€	70 - 1000	Princ. extra-territorial
#7	Pyrogazéification (méthanation)			CO_2 biogénique	> 10			50 - 50		€€	20 - 500	Local à territorial
#8	Pyrogazéification (méthanolation)			CO_2 biogénique	5 à 10			-		-	80 - 600	Princ. extra-territorial
#9	Fermentation			CO_2 biogénique	> 10			80 - 240		€€€	30 - 5000	Princ. extra-territorial
#10	Méthanisation (méthanolation)			CO_2 biogénique	< 5			-		-	3 - 100	Princ. extra-territorial
#11	Méthanisation (épuration)			CO_2 biogénique	> 10			40 - 40		€€	3 - 100	Local à territorial
#12	Combustion			-	> 10			10 - 20		€	0 - 100	Princ. local

Combustible brut (pour production de chaleur directe) Gaz (méthane, injectable dans les réseaux) Carburant liquide (substitut diesel, kérosène, fioul)

L'échelle des critères est précisée dans la « Fiche Critère ». Le détail des critères est donné dans les Fiches « Filières de valorisation ».

Tableau 3: Synthèse des critères de caractérisation des filières de valorisation de la biomasse

Analyse des différentes filières de valorisation de la biomasse

Face à la grande diversité des ressources issues de la biomasse décrites ci-dessus, toutes les filières de valorisation énergétique ne sont, pour des questions techniques, pas adaptées pour traiter tous les types de gisements. Il s'agit donc d'estimer les potentiels totaux (en 2050) compatibles de chacune des filières mais aussi de mesurer les externalités (à la fois environnementales – retour au sol, émissions de GES, polluants atmosphériques – et socioéconomiques – coût de production, taille des unités, usages).

Combustion

La filière combustion présente le plus grand potentiel de production d'énergie (près de 205 TWh/an de chaleur) et ce, malgré une ressource compatible de 42 MtMS/an, soit environ 40% du potentiel de ressource biomasse identifié en 2050. Filière historique et donc mature, présentant des coûts faibles et de très bons rendements, la filière combustion compte néanmoins plusieurs défauts :

- → Un usage restreint : en chaleur basse ou moyenne température et en production d'électricité de base ou semi-base. Aucun usage carburant n'est rendu possible, ni en production d'électricité de pointe dont le besoin va se renforcer avec la pénétration de l'éolien et du photovoltaïque dans le mix électrique ;
- → Une dégradation complète de la matière organique et une volatilisation de l'azote, rendant impossible leur retour au sol (seul le phosphore et le potassium peuvent faire l'objet d'un retour au sol via l'épandage des cendres) ;
- → Des enjeux qui peuvent être importants sur la qualité de l'air, selon la localisation, la taille des installations et les combustibles utilisés.

Méthanisation

La méthanisation présente le deuxième potentiel le plus important de production d'énergie avec 157 TWhPCS/an de production potentielle de méthane, reposant sur une mobilisation maximum de 63 MtMS/an de biomasse.

Cette filière est mature, et présente le très grand avantage de permettre un retour au sol de la matière organique stable et de l'ensemble des nutriments (N,K,P)[11] .
Elle reste plus onéreuse que la combustion mais permet, grâce au vecteur méthane et à l'infrastructure existante, d'accéder à une très grande diversité d'usages (chaleur, électricité, carburant sauf aérien) sans modification massive des équipements, tout en s'affranchissant des contraintes temporelles et géographiques d'adéquation ressource/usage. La production de méthanol directement à partir du biogaz issu de méthanisation pourrait permettre de produire des carburants aériens mais cette voie doit encore prouver sa faisabilité industrielle et ses performances. Enfin, il est important de noter que les ressources compatibles avec la méthanisation n'entrent pas en concurrence avec ceux de la combustion (Tableau 1).

11 | *« En particulier la restitution de biomasse (retour au sol) et la contribution au cycle de la matière organique (maintien des résidus, intercultures, retour au sol des composts/digestats, etc.) doivent demeurer la priorité pour préserver voire augmenter les stocks de carbone des sols et les services écosystémiques associés. » (ADEME 2024)*

Pyrogazéification

La pyrogazéification présente un potentiel de ressource de biomasse compatible de 37 MtMS/an, pouvant permettre la production, selon le procédé de conversion aval, de 124 TWhPCS/an de méthane, ou de 82 (voie méthanol) à 97 TWhPCS/an (voie Fischer-Tropsch) de carburant liquide (kérosène/diesel). Aucun de ces procédés n'est complétement mature. La valorisation en méthane reste le plus proche de la maturité, suivi par le Fischer-Tropsch, et enfin la voie méthanol.

Ces procédés présentent néanmoins le grand intérêt de produire des vecteurs énergétiques permettant de desservir tous les usages énergétiques, et ce à partir de matière ligneuse (bois et dérivés). Ils ont également l'avantage de pouvoir réduire les émissions de polluants dans l'air.

La pyrolyse rapide peut valoriser le même type de ressources avec un potentiel de production similaire au Fischer-Tropsch (94 TWhPCS/an), avec un niveau de maturité plus élevé et des coûts plus bas.

Procédés hydrothermaux

Les procédés hydrothermaux peuvent accéder à un potentiel de ressources compatibles de 40 MtMS/an. Le potentiel de production est de l'ordre de 119 (voie liquéfaction) à 131 TWhPCS/an (voie gazéification)[12]. Ils restent moins matures que les procédés en pyrogazéification, mais présentent l'intérêt de pouvoir théoriquement récupérer et recycler l'ensemble des nutriments, azote compris (mais pas de matière organique).

Fermentation

La filière fermentation, bien que plus proche de la maturité que les filières thermochimiques, présente un rendement plus faible (49 TWhPCS/an de carburant pour 32 MtMS/an de ressources) et des coûts assez élevés.

Estérification et hydrogénation

Enfin, les filières qui permettent de traiter les déchets d'huiles et graisses (estérification et hydrogénation) ont des performances techniques (rendement) et économiques très intéressantes dues à la spécificité des intrants qui présentent une formulation déjà proche des hydrocarbures. Cette particularité se traduit par une ressource particulièrement rare et estimée à 0,5 MtMS/an, pour un potentiel de production de 6 TWhPCS/an de carburants liquides.

12 | L'écart reste à valider, il existe peu de données, et avec des écarts significatifs, voir les fiches "valorisation".

Éléments complémentaires concernant les filières thermochimiques pour la production de méthane

Pour accéder aux ressources non méthanisables, il est aussi possible d'avoir recours aux filières thermochimiques. L'intérêt peut être d'offrir une alternative à la combustion dans certains cas d'usage de chaleur basse ou moyenne température vis-à-vis d'enjeux de qualité de l'air, donc pour des usages dans des zones urbaines, mais aussi de faciliter l'adéquation offre/demande dans certains territoires à l'avenir. L'intérêt peut également être d'apporter plus d'énergie aux secteurs contraints tels que la chaleur haute température, l'électricité de pointe et les carburants pour les transports (hors aviation). La pyrogazéification (méthanation) permettrait cette production supplémentaire avec les meilleurs rendements et des coûts parmi les plus faibles. Ces performances restent néanmoins à valider avec le déploiement de la technologie.
Si ses performances techniques se confirment et si les coûts s'améliorent, la gazéification hydrothermale pourrait également démontrer un intérêt en apportant une solution permettant de gérer certains intrants dans les zones où le retour au sol peut s'avérer être difficile (typiquement les boues de STEU) en alternative ou en complément de la méthanisation.

Éléments complémentaires concernant les filières thermochimiques pour la production de carburant liquide

La pyrolyse rapide constitue la filière la plus développée et semble présenter le meilleur bilan économique. La liquéfaction hydrothermale, moins avancée, pourrait permettre d'améliorer légèrement le rendement et de mieux récupérer les nutriments. La voie gazéification + méthanol, même si le rendement global (kérosène+diesel) reste moins bon que ses alternatives, maximise la production de kérosène. Une autre voie pourrait être le recours à la méthanisation pour produire du méthanol puis des carburants aériens, ce qui semble avoir le meilleur rendement mais un TRE faible : les performances de cette filière restent dans tous les cas à préciser.
S'il était nécessaire de produire des carburants aériens à partir de biomasse autrement que par les filières huile et graisse, il faudrait mobiliser des filières thermochimiques non encore complètement matures. Les ressources mobilisables, essentiellement ligneuses, rentreraient en concurrence avec la filière combustion, sauf en cas de recours à la filière méthanisation (méthanolation).

4 CONCLUSIONS ET ENSEIGNEMENTS

4.1 Les ressources

La ressource globale de biomasse est une quantité finie. Les enjeux climatiques et la nécessité d'insérer nos modes de production et de consommation au sein des limites planétaires imposent des arbitrages dans la mobilisation de la biomasse. Avant tout, les usages prioritaires de la biomasse que sont l'alimentation, le maintien de la fertilité des sols et la production de matériaux déterminent la quantité de biomasse mobilisable pour la production d'énergie.



Au-delà de ces contraintes, le potentiel de biomasse mobilisable pour la production d'énergie dépend fortement des filières de valorisation, pour des questions de compatibilité technique aussi bien que pour des enjeux de retour au sol de la matière organique stable et des nutriments : d'un potentiel total de 100 MtMS/an (soit de l'ordre de 340 TWh[13]), il chute à 43 MtMS/an (205 TWh/an de chaleur) si l'on n'utilise pas la méthanisation, seule filière permettant le retour au sol à la fois de la matière organique stable et des nutriments.
Les ressources issues de l'agriculture représentent 60% du potentiel, le bois issu de forêts ou hors forêts 20%, le reste correspond aux déchets (20%).

4.2 Les filières de valorisation

La combustion reste un moyen techniquement et économiquement performant pour la valorisation de la biomasse, mais son usage se réduit principalement à la chaleur basse et moyenne température. Elle fait par ailleurs face à des enjeux de qualité de l'air et de non-retour au sol de la matière organique stable et de l'azote, ce qui limite le potentiel de biomasse mobilisable (42 MtMS/an sur les 100 MtMS/an identifiés).

La méthanisation, autre filière mature (production de biométhane), permet d'accéder à un potentiel de ressources très important d'environ 60 MtMS/an (157 TWhPCS/an) tout en assurant un retour au sol de la matière organique stable et des nutriments. Cette filière de valorisation permet de répondre à une diversité d'usages (chaleur basse ou haute température, électricité, carburant), en s'affranchissant, grâce aux infrastructures et réseaux existants, des contraintes temporelles et géographiques d'adéquation ressource/usage.



13 | *Ce qui représente par exemple un total de 338 TWh, composé de 157 TWhPCS de biométhane (63 MtMS de ressources biodégradables, en considérant les résidus de cultures valorisés en méthanisation) plus 181 TWh de chaleur par combustion valorisant 37 MtMS de biomasse ligneuse.*

La filière traitant les déchets d'huile et de graisse (par estérification ou hydrogénation) est la troisième filière mature, mais représente un potentiel extrêmement limité de 5 MtMS/an (soit 6TWhPCS/an de carburant liquide). Elle reste la seule filière (hormis les filières de biocarburants 1G) mature à pouvoir produire du carburant aérien à partir de biomasse.

Les voies de conversion thermochimique n'ont pas atteint le stade de maturité commerciale, mais elles permettraient de valoriser la matière ligneuse non méthanisable en différents vecteurs énergétiques tout en en diminuant l'émission de polluants atmosphériques. Parmi les plus proches de la maturité, la pyrogazéification (méthanation) présente un bon taux de retour énergétique, suivi par la pyrogazéification (Fischer-Tropsch) et la pyrolyse rapide. Les procédés hydrothermaux restent moins avancés techniquement, avec des coûts potentiellement supérieurs mais pourraient apporter une solution alternative à la méthanisation en cas de contraintes fortes sur les possibilités de retour au sol sont moins avancés pour certains intrants humides (boues de STEU). La voie gazéification présente un meilleur taux de retour énergétique.

Enfin, la filière fermentation, même si elle expérimente ses premières unités commerciales, reste néanmoins pénalisée par de faibles performances énergétiques (rendement, facteur GES) et économiques.



4.3 Les usages finaux

L'étude a permis d'exposer les différentes filières énergétiques possibles permettant la valorisation de la biomasse. Celles-ci se distinguent par différents critères, dont le vecteur principal produit (chaleur, gaz, carburant) qui conditionne l'usage final.

Pour la production de chaleur basse ou moyenne température, toutes les biomasses peuvent être mobilisées ainsi que tous les vecteurs intermédiaires. La combustion présente les meilleures performances énergétiques (rendement, TRE)[14] , mais aussi certains inconvénients avec l'absence de retour au sol de matière organique ou de nutriment et des enjeux sur la pollution de l'air. La filière méthanisation est la seule filière alternative mature et avec un potentiel significatif pour contribuer à décarboner efficacement cet usage final (chaleur) tout en permettant un retour au sol de la matière organique (digestat).

14 | Hormis les filières huile et graisse mais qui sont marginales en termes de potentiel.

4 CONCLUSIONS ET ENSEIGNEMENTS

Concernant les usages de chaleur haute température dans l'industrie, mais aussi la production d'électricité de pointe, seules les filières produisant un vecteur énergétique gazeux ou liquide permettent de satisfaire complétement ce besoin. La méthanisation avec production de méthane est la seule filière mature et avec un potentiel important.

Pour la production de carburant aérien, la biomasse doit être convertie en carburant liquide. Les seules filières matures sont les filières estérification, ou HVO, mais le potentiel est extrêmement limité, de l'ordre de 3 ou 4 TWhPCS de carburant en 2050[15], basé sur des déchets d'huile ou de graisse. Pour augmenter le potentiel de production de carburants aériens, il faudrait passer par des filières non encore complètement matures, telles que, par ordre de maturité, la pyrolyse rapide, la fermentation, la pyrogazéification (Fisher-Tropsch), la liquéfaction hydrothermale ou la pyrogazéification (méthanolation). Ces filières présentent néanmoins l'inconvénient d'offrir un taux de retour énergétique inférieur aux filières utilisant la biomasse en combustion ou pour produire du méthane. De plus, à la différence des précédents usages, ces filières reposent sur une valorisation extra-territoriale de la biomasse ce qui rendra plus complexe leur mise en œuvre.

Pour les carburants maritimes et routiers, on retrouve les mêmes filières de valorisation possibles que pour l'aérien, auxquelles s'ajoute la production de biométhane, avec en premier lieu la filière mature de méthanisation qui présente un potentiel important. Dans ce cas, le biométhane est soit utilisé directement bioGNC, soit après une étape de liquéfaction sous forme de bioGNL (biométhane liquéfié). Enfin, Il est important de souligner que ces biocarburants liquides sont coproduits avec le carburant aérien (sauf pour les filières méthane).







15 | *Pour rappel, l'étude ne prend pas en compte de ressources basées sur des cultures énergétiques, filière généralement appelée 1G.*

5 ANNEXES

Bibliographie principale

ADEME. 2021. « Transition(s) 2050 ». Horizons. https://www.ademe.fr/les-futurs-en-transition/les-scenarios

ADEME. 2024. « Biomasse : enjeu stratégique de la transition écologique ».

CESE. 2023. « Quels besoins de gouvernance pour les différents usages de la biomasse? »

GIEC. 2022. « Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change - Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change ».

La Fabrique Ecologique. 2023. « Les bioénergies : quelle place dans la transition énergétique ? »
MTES. 2020. « Stratégie nationale bas-carbone ».

Solagro. 2017. Le scénario Afterres2050: version 2016. Toulouse: Solagro. http://afterres2050.solagro.org/wp-content/uploads/2015/11/Solagro_afterres2050-v2-web.pdf .

Solagro. 2024. « La forêt & la filière Bois : un rôle déterminant dans la transition écologique » https://solagro.org/medias/publications/f134_afterres-foret-bois.pdf

Solagro. 2024. « Site Afterres 2050 ». https://afterres2050.solagro.org/

Aubert, P.-M., Doublet, S., Couturier, C., Malafosse, F. 2023. Biomasse et neutralité climat en 2050: gérer la rareté pour maintenir des écosystèmes productifs et résilients. Iddri, Document de propositions N°03/23.

5 ANNEXES

Liste des fiches de présentation des résultats

14 fiches permettant de dresser l'inventaire des différents types de biomasses étudiées dans cette étude et de prendre la mesure de leurs enjeux propres que sont les produits issus de l'agriculture, les produits de la forêt et des arbres hors forêt, ainsi que la question des déchets.

- *Fiche 1 : CIVE*
- *Fiche 2 : Résidus de cultures*
- *Fiche 3 : Effluents d'élevage*
- *Fiche 4 : Herbes*
- *Fiche 5 : Biodéchets*
- *Fiche 6 : Déchets d'industries agro-alimentaires*
- *Fiche 7 : Boues de STEP*
- *Fiche 8 : Déchets verts*
- *Fiche 9 : Bois forêt*
- *Fiche 10 : Bois hors-forêt*
- *Fiche 11 : Connexes*
- *Fiche 12 : Liqueurs noires*
- *Fiche 13 : Déchets de bois*
- *Fiche 14 : Combustibles Solides de Récupération*

12 fiches permettant d'étudier les filières permettant de valoriser les différents types de biomasse en les soumettant à différents critères quantitatifs et qualitatifs.

- *Fiche 1 : Estérification de déchets gras*
- *Fiche 2 : Hydrogénation de déchets gras*
- *Fiche 3 : Pyrolyse rapide*
- *Fiche 4 : Liquéfaction hydrothermale*
- *Fiche 5 : Gazéification hydrothermale*
- *Fiche 6 : Pyrogazéification (Fischer-Tropsch)*
- *Fiche 7 : Pyrogazéification (méthanation)*
- *Fiche 8 : Pyrogazéification (méthanolation)*
- *Fiche 9 : Fermentation*
- *Fiche 10 : Méthanisation (méthanolation)*
- *Fiche 11 : Méthanisation (épuration)*
- *Fiche 12 : Combustion*

5 ANNEXES

Bibliographie par fiche

Fiches ressource

Fiche 1 : CIVE

Solagro. 2017. Le scénario Afterres2050: version 2016. Toulouse: Solagro. http://afterres2050.solagro.org/wp-content/uploads/2015/11/Solagro_afterres2050-v2-web.pdf.
Solagro. 2024. « Site Afterres 2050 ». https://afterres2050.solagro.org/.
Solagro. 2024. Expertise interne
Agreste, données statistiques agricoles (RA, SAA...)

Fiche 2 : Résidus de cultures

Solagro. 2017. Le scénario Afterres2050: version 2016. Toulouse: Solagro. http://afterres2050.solagro.org/wp-content/uploads/2015/11/Solagro_afterres2050-v2-web.pdf.
Solagro. 2024. « Site Afterres 2050 ». https://afterres2050.solagro.org/.
Solagro. 2024. Expertise interne
AGRO-TRANSFERT ressources et Territoires, ARVALIS, FRCA Picardie, COOPENERGIE. , 2008. « Exporter des pailles sans risque pour l'état organique des sols »
CITEPA. 2013. « Méthodologie d'estimation des quantités de matière sèche et d'azote contenues dans les résidus de culture en France ».
INRA et IGN. 2017. « Quel rôle pour les forêts et la filière forêt-bois françaises dans l'atténuation du changement climatique?»
Solagro. 2023. « Afterres2050 Forêt & Bois - un rôle déterminant dans la transition écologique ».
Agreste, données statistiques agricoles (RA, SAA...)

Fiche 3 : Effluents d'élevage

Solagro. 2017. Le scénario Afterres2050: version 2016. Toulouse: Solagro. http://afterres2050.solagro.org/wp-content/uploads/2015/11/Solagro_afterres2050-v2-web.pdf.
Solagro. 2024. « Site Afterres 2050 ». https://afterres2050.solagro.org/.
Solagro. 2024. Expertise interne
Solagro, Bio Intelligence Service, ADEME . 2009. ClimAgri®
Agreste, données statistiques agricoles (RA, SAA...)

Fiche 4 : Herbes

Solagro. 2017. Le scénario Afterres2050: version 2016. Toulouse: Solagro. http://afterres2050.solagro.org/wp-content/uploads/2015/11/Solagro_afterres2050-v2-web.pdf.
Solagro. 2024. « Site Afterres 2050 ». https://afterres2050.solagro.org/.
Solagro. 2024. Expertise interne
Agreste, données statistiques agricoles (RA, SAA...)
Couturier C., Laboubée C., Doublet S. 2020. « La méthanisation, outil favorable à la transition agroécologique ». Agronomie Environnement & Société. https://doi.org/10.54800/tuo313

Fiche 5 : Biodéchets

ADEME. 2021. « Déchets chiffres-clés L'essentiel 2020 »
Espelia, Solagro, GRDF. 2021. « Guide à destination des collectivités pour réussir le tri à la source des biodéchets dès 2024 »
INSEE. 2022. « Dénombrement des équipements (commerce, services, santé...) en 2021 » Base permanente des équipements (BPE).
INSEE 2012. INSEE résultats N°60. https://www.insee.fr/fr/statistiques/1281004?sommaire=2117924
https://www.restaurationcollectivena.fr/restauration-collective/
Ministère de l'éducation nationale. https://www.education.gouv.fr/les-chiffres-cles-du-systeme-educatif-6515
INSEE. « Régimes scolaires des lycéens : la distance du domicile au lycée, facteur le plus in-fluent ». Insee Analyses Pays de la Loire No 99. https://www.insee.fr/fr/statistiques/6005356#consulter
MAAPRAT. 2011. « PERTES ET GASPILLAGES ALIMENTAIRES »
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche. 2023.
https://data.enseignementsup-recherche.gouv.fr/explore/dataset/fr-esr-atlas_regional-effectifs-d-etudiants-inscrits/information/?disjunctive.rgp_formations_ou_etablissements&sort=-rentree
https://data.drees.solidarites-sante.gouv.fr – Bases statistiques SAE
ADEME. 2021. « Calcul simplifié du gaspillage alimentaire en restauration collective »

5 ANNEXES

Bibliographie par fiche

Fiche 6 : Déchets d'Industries Agro-Alimentaires (IAA)
ADEME . 2019. « Industries agroalimentaires : moins de pertes pour plus de performance
Solagro, GRDF. 2017. « Etude du potentiel de biométhane à partir des effluents des Industries Agro-Alimentaires ».

Fiche 7 : Boues de STEP
https://assainissement.developpement-durable.gouv.fr/pages/data/carteIntSteu.php

Fiche 8 : Déchets verts
ADEME, CEDEN, Biomasse Normandie. 2008. « Audit des plateformes de compostage de dé-chets organiques en France »
Solagro. 2024. Expertise interne

Fiche 9 : Bois forêt
Solagro. 2023. « Afterres2050 Forêt & Bois - un rôle déterminant dans la transition écologique ».
Ministère de l'agriculture. 2021. « Programme National de la Forêt et du Bois - PNFB 2016-2026)
ADEME. 2021. « Transition(s) 2050 ». Horizons.
AGRESTE. 2022 (et précédente). « Récolte de bois et production de sciage »
MTES. 2020. « Stratégie nationale bas-carbone ».
INRA et IGN. 2017. « Quel rôle pour les forêts et la filière forêt-bois françaises dans l'atténuation du changement climatique? »

Fiche 10 : Bois hors Forêt
Afac-Agroforesteries, Solagro. 2023. « Publication de chiffres récents sur la disparation des haies en France »
ADEME, IFN, FCBA, Solagro. 2009. « Biomasse forestière, populicole et bocagère disponible pour l'énergie à l'horizon 2020 ».
Solagro. 2023. « Afterres2050 Forêt & Bois - un rôle déterminant dans la transition écologique ».

Fiche 11 : Connexes
INRA et IGN. 2017. « Quel rôle pour les forêts et la filière forêt-bois françaises dans l'atténuation du changement climatique? »
Solagro. 2023. « Afterres2050 Forêt & Bois - un rôle déterminant dans la transition écologique ».

Fiche 12 : Liqueurs noires
COPACEL. 2022. « Rapport statistique 2022 de l'industrie papetière française. »
Solagro. 2023. « Afterres2050 Forêt & Bois - un rôle déterminant dans la transition écologique ».

Fiche 13 : Bois déchets
Solagro. 2023. « Afterres2050 Forêt & Bois - un rôle déterminant dans la transition écologique ».
Federec. 2022 (et antérieur) « Rapport annuel »
GDBat. 2022. « Déchets Bois du Batiment »
ADEME. 2021. « MODECOM 2017 - Campagne nationale de caractérisation des déchets ména-gers et assimilés »
INSEE. 2020. « La production de déchets d'activités économiques (DAE) »
ADEME. 2021. « Bilan national du recyclage »
ADEME. 2023. « Chiffres de la REP DEA »

Fiche 14 : Combustibles Solides de Récupération (CSR)
ADEME. 2021. « MODECOM 2017 - Campagne nationale de caractérisation des déchets ména-gers et assimilés »
ADEME. 2022. « Bilan national du recyclage »

Comparaison aux autres scénarios
ADEME. 2021. « Transition(s) 2050 ». Horizons.
ADEME, GRDF, GRTgaz, Solagro, et AEC. 2018. « Un mix de gaz 100% renouvelable en 2050 ? » Rapport complet. http://www.ademe.fr/mix-gaz-100-renouvelable-2050.
Agrosolutions. 2022. « Évolution des systèmes agricoles en France : quels impacts sur la disponibilité et les flux de biomasse méthanisable ? »
ENGIE. 2021. « Geographical analysis of biomethane potential and costs in Europe in 2050 ».
France Stratégie. 2021. « La biomasse agricole : quelles ressources pour quel potentiel énergétique ? » Document de travail.
Gas for climate et Guidehouse. 2022. « Biomethane production potentials in the EU ».
WWF. 2022. « Biomasse : un réel potentiel pour la transition énergétique ? »

5 ANNEXES

Bibliographie par fiche

Fiches valorisation

Fiche 1 : Estérification de déchets gras

IEA. 2019. « Comparison of Biofuel Life Cycle Analysis Tools ». Technical report.
Imperial College London et Concawe. 2021. « Sustainable biomass available in the EU to 2050 ».
Kroft. 2020. « The potential of drop-in biofuels for the maritime industry ».
NREL. 2018. « 2016 Bioenergy Industry Status Report ».
Vyas, Amish P., Jaswant L. Verma, et N. Subrahmanyam. 2010. « A Review on FAME Produc-tion Processes ». Fuel 89 (1): 1-9. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.08.014.

Fiche 2 : Hydrogénation de déchets gras

Abdullah, Bawadi, Syed Anuar Faua Ad Syed Muhammad, et Nik Azmi Nik Mahmood. 2017. « Production of Biofuel via Hydrogenation of Lignin from Biomass ». In New Advances in Hydro-genation Processes - Fundamentals and Applications, édité par Maryam Takht Ravanchi. InTech. https://doi.org/10.5772/66108.
Bann, Seamus J., Robert Malina, Mark D. Staples, Pooja Suresh, Matthew Pearlson, Wallace E. Tyner, James I. Hileman, et Steven Barrett. 2017. « The Costs of Production of Alternative Jet Fuel: A Harmonized Stochastic Assessment ». Bioresource Technology 227 (mars): 179-87. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.12.032.
ICAO. 2021. « CORSIA Default Life Cycle Emissions Values for CORSIA Eligible Fuels ».
ICCT. 2019. « The cost of supporting alternative jet fuels in the European Union ».
IEA. 2019. « Comparison of Biofuel Life Cycle Analysis Tools ». Technical report.
IEA. 2020. « Advanced Biofuels – Potential for Cost Reduction ».
Imperial College London et Concawe. 2021. « Sustainable biomass available in the EU to 2050 ».
Kroft. 2020. « The potential of drop-in biofuels for the maritime industry ».
Monteiro, Rodolpho R. C., Isabela A. Dos Santos, Maria R. A. Arcanjo, Célio L. Cavalcante, Francisco M. T. De Luna, Roberto Fernandez-Lafuente, et Rodrigo S. Vieira. 2022. « Production of Jet Biofuels by Catalytic Hydroprocessing of Esters and Fatty Acids: A Review ». Catalysts 12 (2): 237. https://doi.org/10.3390/catal12020237.
Vyas, Amish P., Jaswant L. Verma, et N. Subrahmanyam. 2010. « A Review on FAME Produc-tion Processes ». Fuel 89 (1): 1-9. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.08.014.
Wei, Hongjian, Wenzhi Liu, Xinyu Chen, Qing Yang, Jiashuo Li, et Hanping Chen. 2019. « Rene-wable Bio-Jet Fuel Production for Aviation: A Review ». Fuel 254 (octobre): 115599. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.06.007.

Fiche 3 : Pyrolyse rapide

Bann, Seamus J., Robert Malina, Mark D. Staples, Pooja Suresh, Matthew Pearlson, Wallace E. Tyner, James I. Hileman, et Steven Barrett. 2017. « The Costs of Production of Alternative Jet Fuel: A Harmonized Stochastic Assessment ». Bioresource Technology 227 (mars): 179-87. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.12.032.
Imperial College London et Concawe. 2021. « Sustainable biomass available in the EU to 2050 ».
Kroft. 2020. « The potential of drop-in biofuels for the maritime industry ».
Mohabeer. 2018. « Bio-oil production by pyrolysis of biomass coupled with a catalytic de-oxygenation treatment ».
NREL. 2010. « Techno-Economic Analysis of Biomass Fast Pyrolysis to Transportation Fuels ».
NREL. 2020. « Ex Situ Catalytic Fast Pyrolysis of Lignocellulosic Biomass to Hydrocarbon Fuels: 2020 State of Technology ».
Trippe, Frederik, Magnus Fröhling, Frank Schultmann, Ralph Stahl, et Edmund Henrich. 2010. « Techno-Economic Analysis of Fast Pyrolysis as a Process Step Within Biomass-to-Liquid Fuel Production ». Waste and Biomass Valorization 1 (4): 415-30. https://doi.org/10.1007/s12649-010-9039-1.
Uddin, M. N., Kuaanan Techato, Juntakan Taweekun, M. Mofijur, M. G. Rasul, T. M. I. Mahlia, et S. M. Ashrafur. 2018. « An Overview of Recent Developments in Biomass Pyrolysis Technolo-gies ». Energies 11 (11): 3115. https://doi.org/10.3390/en11113115.

Fiche 4 : Liquéfaction hydrothermale

Bann, Seamus J., Robert Malina, Mark D. Staples, Pooja Suresh, Matthew Pearlson, Wallace E. Tyner, James I. Hileman, et Steven Barrett. 2017. « The Costs of Production of Alternative Jet Fuel: A Harmonized Stochastic Assessment ». Bioresource Technology 227 (mars): 179-87. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.12.032.
De Jong, Sierk, Ric Hoefnagels, Elisabeth Wetterlund, Karin Pettersson, André Faaij, et Martin Junginger. 2017. « Cost Optimization of Biofuel Production – The Impact of Scale, Integration, Transport and Supply Chain Configurations ». Applied Energy 195 (juin): 1055-70. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.109.
Grande, Lucía, Ivan Pedroarena, Sophia A. Korili, et Antonio Gil. 2021. « Hydrothermal Liquefac-tion of Biomass as One of the Most Promising Alternatives for the Synthesis of Advanced Liquid Biofuels: A Review ». Materials 14 (18): 5286. https://doi.org/10.3390/ma14185286.

Bibliographie par fiche

Imperial College London et Concawe. 2021. « Sustainable biomass available in the EU to 2050 ».
Kroft. 2020. « The potential of drop-in biofuels for the maritime industry ».
PNNL. 2017. « Conceptual Biorefinery Design and Research Targeted for 2022: Hydrothermal Liquefaction Processing of Wet Waste to Fuels ».

Fiche 5 : Gazéification hydrothermale

Baudouin, David, Daniil Salionov, Frédéric Vogel, et Saša Bjelić. 2021. « Advanced Analytical Study of Process Streams for a Rational Optimization of Hydrothermal Gasification ». ACS Engi-neering Au 1 (2): 134-47. https://doi.org/10.1021/acsengineeringau.1c00010.
Gassner, Martin, Fréderic Vogel, Georges Heyen, et François Maréchal. 2011. « Optimal Pro-cess Design for the Polygeneration of SNG, Power and Heat by Hydrothermal Gasification of Waste Biomass: Thermo-Economic Process Modelling and Integration ». Energy & Environ-mental Science 4 (5): 1726. https://doi.org/10.1039/c0ee00629g.
Mulke, Robert. 2022. « La Gazéification Hydrothermale Une technologie innovante, au centre de l'économie circulaire, pour valoriser localement quasi complètement des déchets organiques humides ». Présenté à Decarboner le mix gazier, comment amplifier le mouvement ?
Mulke, Robert, Jean-Baptiste Castaing, Mathieu Morel, et Violette Donat. 2022. « GAZÉIFICA-TION HYDROTHERMALE LIVRE BLANC».

Fiche 6 : Pyrogazéification (Fischer-Tropsch)

Bann, Seamus J., Robert Malina, Mark D. Staples, Pooja Suresh, Matthew Pearlson, Wallace E. Tyner, James I. Hileman, et Steven Barrett. 2017. « The Costs of Production of Alternative Jet Fuel: A Harmonized Stochastic Assessment ». Bioresource Technology 227 (mars): 179-87. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.12.032.
Dietrich, Ralph-Uwe, Friedemann G. Albrecht, Simon Maier, Daniel H. König, Stefan Estelmann, Sandra Adelung, Zoé Bealu, et Antje Seitz. 2018. « Cost Calculations for Three Different Ap-proaches of Biofuel Production Using Biomass, Electricity and CO 2 ». Biomass and Bioenergy 111 (avril): 165-73. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.07.006.
Hannula, Ilkka. 2016. « Hydrogen Enhancement Potential of Synthetic Biofuels Manufacture in the European Context: A Techno-Economic Assessment ». Energy 104 (juin): 199-212. https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.119.
Hillestad, M., M. Ostadi, G.d. Alamo Serrano, E. Rytter, B. Austbø, J.G. Pharoah, et O.S. Bur-heim. 2018. « Improving Carbon Efficiency and Profitability of the Biomass to Liquid Process with Hydrogen from Renewable Power ». Fuel 234 (décembre): 1431-51. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.08.004.
ICAO. 2021. « CORSIA Default Life Cycle Emissions Values for CORSIA Eligible Fuels ».
IEA. 2020. « The Role of Renewable Transport Fuels in Decarbonizing Road Transport Produc-tion Technologies and Costs ».
———. 2021. « Progress in commercialization of biojet/sustainable aviation fuels (SAF) : tech-nologies, potential and challenges ».
Imperial College London et Concawe. 2021. « Sustainable biomass available in the EU to 2050 ».
Khan, M. Anwar H., Sophia Bonifacio, Joanna Clowes, Amy Foulds, Rayne Holland, James C. Matthews, Carl J. Percival, et Dudley E. Shallcross. 2021. « Investigation of Biofuel as a Potential Renewable Energy Source ». Atmosphere 12 (10): 1289. https://doi.org/10.3390/atmos12101289.
Kroft. 2020. « The potential of drop-in biofuels for the maritime industry ».
Neuling, Ulf, et Martin Kaltschmitt. 2018. « Techno-Economic and Environmental Analysis of Avi-ation Biofuels ». Fuel Processing Technology 171 (mars): 54-69. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.09.022.
Wei, Yi-Ming, Le-Le Zou, Kai Wang, Wen-Jin Yi, et Lu Wang. 2013. « Review of proposals for an Agreement on Future Climate Policy: Perspectives from the responsibilities for GHG reduction ». Energy Strategy Reviews, East Asian Energy System Management Challenges, 2 (2): 161-68. https://doi.org/10.1016/j.esr.2013.02.007.

Fiche 7 : Pyrogazéification (méthanation)

Alamia, Alberto, Anton Larsson, Claes Breitholtz, et Henrik Thunman. 2017. « Performance of Large-Scale Biomass Gasifiers in a Biorefinery, a State-of-the-Art Reference: Evaluation of the GoBiGas Gasifier ». International Journal of Energy Research 41 (14): 2001-19. https://doi.org/10.1002/er.3758.
Alamia, Alberto, Stefania Òsk Gardarsdòttir, Anton Larsson, Fredrik Normann, et Henrik Thun-man. 2017. « Efficiency Comparison of Large- Scale Standalone, Centralized, and Distributed Thermochemical Biorefineries ». Energy Technology 5 (8): 1435-48. https://doi.org/10.1002/ente.201600719.
Hannula, Ilkka. 2016. « Hydrogen Enhancement Potential of Synthetic Biofuels Manufacture in the European Context: A Techno-Economic Assessment ». Energy 104 (juin): 199-212. https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.119.
Imperial College London et Concawe. 2021. « Sustainable biomass available in the EU to 2050 ».
Larsson, Anton, Ingemar Gunnarsson, et Freddy Tengberg. 2018. « The GoBiGas Project Demonstration of the Production of Biomethane from Biomass via Gasification ». https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27352.55043.

Bibliographie par fiche

Thunman, Henrik, Christer Gustavsson, Anton Larsson, Ingemar Gunnarsson, et Freddy Tengberg. 2019. « Economic Assessment of Advanced Biofuel Production via Gasification Using Cost Data from the GoBiGas Plant ». Energy Science & Engineering 7 (1): 217-29. https://doi.org/10.1002/ese3.271.

Fiche 8 : Pyrogazéification (méthanolation)

Atsonios, Konstantinos, Jun Li, et Vassilis J. Inglezakis. 2023. « Process Analysis and Compara-tive Assessment of Advanced Thermochemical Pathways for E-Kerosene Production ». Energy 278 (septembre): 127868. https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127868.
Bube, Stefan, Nils Bullerdiek, Steffen Voß, et Martin Kaltschmitt. 2024. « Kerosene Production from Power-Based Syngas – A Technical Comparison of the Fischer-Tropsch and Methanol Pathway ». Fuel 366 (juin): 131269. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131269.
Conti. 2019. « A techno-economic assessment for optimizing methanol pro- duction from woody biomass for maritime transport in Sweden ».
De Fournas, Nicolas, et Max Wei. 2022. « Techno-Economic Assessment of Renewable Metha-nol from Biomass Gasification and PEM Electrolysis for Decarbonization of the Maritime Sector in California ». Energy Conversion and Management 257 (avril): 115440. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115440.

Fiche 9 : Fermentation

Bann, Seamus J., Robert Malina, Mark D. Staples, Pooja Suresh, Matthew Pearlson, Wallace E. Tyner, James I. Hileman, et Steven Barrett. 2017. « The Costs of Production of Alternative Jet Fuel: A Harmonized Stochastic Assessment ». Bioresource Technology 227 (mars): 179-87. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.12.032.
ICAO. 2021. « CORSIA Default Life Cycle Emissions Values for CORSIA Eligible Fuels ».
IEA. 2020. « The Role of Renewable Transport Fuels in Decarbonizing Road Transport Produc-tion Technologies and Costs ».
Imperial College London et Concawe. 2021. « Sustainable biomass available in the EU to 2050 ».
Neuling, Ulf, et Martin Kaltschmitt. 2018. « Techno-Economic and Environmental Analysis of Avi-ation Biofuels ». Fuel Processing Technology 171 (mars): 54-69. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.09.022.
Wei, Hongjian, Wenzhi Liu, Xinyu Chen, Qing Yang, Jiashuo Li, et Hanping Chen. 2019. « Rene-wable Bio-Jet Fuel Production for Aviation: A Review ». Fuel 254 (octobre): 115599. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.06.007.

Fiche 10 : Méthanisation (méthanolation)

Atsonios, Konstantinos, Jun Li, et Vassilis J. Inglezakis. 2023. « Process Analysis and Compara-tive Assessment of Advanced Thermochemical Pathways for E-Kerosene Production ». Energy 278 (septembre):127868. https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127868.
Bube, Stefan, Nils Bullerdiek, Steffen Voß, et Martin Kaltschmitt. 2024. « Kerosene Production from Power-Based Syngas – A Technical Comparison of the Fischer-Tropsch and Methanol Pathway ». Fuel 366 (juin):131269. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131269.
Rinaldi, Riccardo, Giorgia Lombardelli, Manuele Gatti, Carlo Giorgio Visconti, et Matteo Carmelo Romano. 2023. « Techno-Economic Analysis of a Biogas-to-Methanol Process: Study of Differ-ent Process Configurations and Conditions ». Journal of Cleaner Production 393 (mars):136259. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136259.
Energo, Entretien, 2024
Solagro. 2024. Calculs bilan matière et énergie

Fiche 11 : Méthanisation (épuration)

ADEME. 2015. « Panorama et évaluation des différentes filières d'autobus urbains ».
ADEME. 2022. « Analyse technicoéconomique de 84 unités de méthanisation - PROdige : pro-gramme d'acquisition et de diffusion de références sur la méthanisation agricole ».
ADEME et SCANIA. 2018. « Mesures des émissions de polluants des autocars Euro 6 au gaz naturel, à l'éthanol et au diesel ».
CENEX. 2019. « Dedicated to gas : An innovative UK research project to assess the viability of gas vehicules ».
Equilibre, CRMT, et IFSTTAR. 2018. « Analyse des consommations et émissions de CO2 et NOx sur poids-lourds GNV et diesel ». Rapport complémentaire.
ADEME. 2024. Base Carbone, https://base-empreinte.ademe.fr
Solagro. 2024. Expertise interne

Bibliographie par fiche

Fiche 12 : Combustion
ADEME. 2010. « Evaluation des couts d'exploitation associés aux chaufferies biomasse ».
ADEME. 2018. « Etude sur le chauffage domestique au bois ».
ADEME. 2023. « Emissions atmosphériques des chaufferies bois de puissance inférieure à 1 MW ».
Danish Energy Agency. 2022. « Technology data - Industrial process heat ».
ADEME. 2024. « TEchnology data - generation of electricity and district heating ».



Solagro

Retrouvez toute notre actualité sur :
www.solagro.org

Prenez part aux transitions et rejoignez
l'association en devenant adhérent·e

Solagro
75 voie du TOEC CS 27608
31076 TOULOUSE cedex 03
et
13 ter place Jules Ferry 69006 LYON

05 67 69 69 69
solagro@solagro.asso.fr