

1



LA BIOMASSE ET LA NEUTRALITÉ CARBONE

CO-PRÉSIDENTS :

Mme Monique AXELOS (Directrice scientifique à l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement – INRAE)

M. Patrice GEOFFRON (Professeur d'économie à l'Université Paris Dauphine-PSL)

RAPPORTEUR :

M. Pierre VAISS (Maître des requêtes en service extraordinaire au Conseil d'État)

GROUPE DE TRAVAIL 1

Comité de prospective de la CRE

#éclairerlavenir
@CRE_Propective
www.eclairerlavenir.fr

Mars 2023



Comité
de prospective
de la CRE

ÉCLAIRER
L'AVENIR

LE MOT DE LA PRÉSIDENTE DE LA CRE

Pour la Commission de régulation de l'énergie (CRE), s'intéresser à la biomasse et à la neutralité carbone est un exercice qui requiert une certaine humilité tant la question dépasse le strict champ de l'énergie.

Dans un futur énergétique très incertain, la biomasse a souvent été une ressource permettant de boucler un certain nombre de scénarios de transition énergétique : elle revêt en effet un potentiel important pour l'atteinte de la neutralité carbone, à la fois en termes de réduction des émissions et en termes d'absorptions de CO₂.

Toutefois, utiliser la biomasse comme variable d'ajustement d'un scénario énergétique revient à occulter le fait que cette biomasse subit par ailleurs trois contraintes qui ne sont pas dans le strict champ du système énergétique :

- la première est une contrainte d'usage par d'autres secteurs d'activité (pour lesquels, d'ailleurs, cette biomasse a été historiquement développée), à savoir l'alimentation et la construction ;
- la seconde, beaucoup plus émergente, est liée au fait que le changement climatique dont nous subissons dès aujourd'hui les effets tangibles aura un impact sur la disponibilité de la biomasse et les rendements qu'on peut en attendre : par exemple, la forêt française dans 50 ans n'a que très peu de chances de ressembler à ce que nous connaissons aujourd'hui ;
- enfin, les sols eux-mêmes jouent un rôle majeur sous-estimé.

C'est pourquoi le groupe de travail, en s'attaquant à ce sujet, n'avait pas pour ambition de produire un tableau finalisé de toutes les ressources et de leur affectation fine suivant les différents types d'usage, mais plutôt de construire une méthodologie permettant de déterminer des ordres de mérite entre les différentes ressources de biomasse et les différents usages en aval. Beaucoup pourront dire que rien n'est réellement nouveau dans le domaine ; cependant, ce rapport propose une approche intégrée qui peut quant à elle être considérée comme novatrice, utilisant des critères partagés et des définitions cohérentes entre les différentes filières en aval de la valorisation de la biomasse.

Je tiens à remercier très vivement les deux co-présidents, Monique AXELOS et Patrice GEOFFRON, ainsi que le rapporteur et l'ensemble des membres du groupe de travail, pour avoir conduit cette approche intégrée, dans le souci d'éviter que des décisions pertinentes pour un secteur n'aient des effets délétères au niveau global.

Pourquoi se poser cette question d'organisation de l'accès à la ressource ? Force est de constater que l'utilisation énergétique de la biomasse ne s'impose pas d'emblée, y compris sous une contrainte forte de décarbonation, par rapport aux autres usages. Pour autant cette valorisation énergétique représente un enjeu pour le monde agricole et forestier de valorisation de leurs ressources ; si la décarbonation renchérit naturellement le coût des énergies fossiles, alors la valorisation énergétique de la biomasse devient un enjeu financier de premier ordre. Il ne faudrait pas que cet enjeu financier conduise à déstabiliser les autres filières par son caractère parfois massif et souvent immédiat. C'est pourquoi les propositions du groupe de travail en matière de hiérarchisation des usages sont essentielles pour conduire à ce que la ressource biomasse soit gérée dans le temps long que les marchés, et notamment les marchés énergétiques, n'offrent pas naturellement.

Enfin, les outils de notre politique énergétique sont souvent enchâssés dans d'autres objectifs politiques : politique agricole, aménagement du territoire et politique industrielle. C'est cette compréhension qu'il est important de bien développer au travers des critères partagés de hiérarchisation que propose le présent rapport. À l'aune de la future programmation pluriannuelle de l'énergie, il est important de ne pas parier sur des ressources biomasse qui ne seront pas disponibles pour l'énergie ; il est tout autant important de ne pas négliger ce que la valorisation énergétique peut apporter comme complément d'activité à notre tissu économique et tout notamment le tissu agricole et forestier. Cet équilibre ne pourra se trouver que dans un dialogue raisonné et structuré entre les filières. C'est toute l'ambition de ce rapport que d'en proposer une grille de lecture et de définition.

Emmanuelle WARGON

AVANT-PROPOS

Le Comité de prospective de la Commission de régulation de l'énergie, créé en 2017, rassemble les grands acteurs du secteur de l'énergie, afin d'éclairer le régulateur français sur les perspectives, à moyen et long termes, du secteur de l'énergie en France. Plusieurs groupes de travail ont été mis en place à cette occasion, chargés de rédiger des rapports publics.

Pour la saison 4, le groupe de travail n° 1 a été chargé de travailler sur « *La biomasse et la neutralité carbone* ». Il s'est réuni 8 fois entre février et novembre 2022, sous la coprésidence de Monique AXELOS (Directrice scientifique à l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement – INRAE) et Patrice GEOFFRON (Professeur d'économie à l'Université Paris Dauphine-PSL). Le groupe de travail a bénéficié du concours efficace de son rapporteur, Pierre VAISS (Maître des requêtes en service extraordinaire au Conseil d'État), et le remercie en conséquence.

La composition du groupe et la liste des interventions sont présentées ci-après.

LE PRÉSENT RAPPORT – QUI N'ENGAGE PAS LA CRE – A ÉTÉ ÉTABLI DANS LE CADRE SUIVANT :

- ce rapport, qui se veut accessible à tous les publics – y compris aux non-spécialistes du secteur de l'énergie – a pour ambition de nourrir le débat public, en s'appuyant sur l'analyse des principaux acteurs, privés et publics, de l'énergie en France ;
- il est rédigé sous la seule responsabilité des deux co-présidents ;
- sans prétendre à l'exhaustivité, les co-présidents se sont efforcés de considérer dans ce rapport la diversité des approches et des sensibilités des membres du groupe de travail. Les membres du groupe de travail qui le souhaitent ont pu transmettre des *contributions externes*, publiées de manière indépendantes du rapport sur le site du Comité de prospective (www.eclairerlavenir.fr) afin de souligner un positionnement non mentionné dans le rapport.

LE MOT DES CO-PRÉSIDENTS

Le groupe de travail que nous avons eu l'honneur de présider conjointement avait pour mission d'analyser la contribution potentielle de la biomasse à la neutralité carbone en France.

Notre groupe a commencé à se réunir début 2022, avant le déclenchement d'une guerre qui a mis en tensions aussi bien les systèmes énergétiques qu'alimentaires. Nous rendons également ses conclusions au terme d'une période marquée par l'enchaînement de deux sécheresses, estivale puis hivernale, qui vont contribuer à réduire la capacité des écosystèmes, notamment forestiers, à capter du carbone, phénomène d'ores et déjà observé.

La succession de ces événements doit être mise en regard d'objectifs élevés, fixés dans la Stratégie nationale bas carbone (dit « SNBC-2 »), quant aux contributions des différentes sources de biomasse à l'atteinte de la neutralité carbone en 2050.

À savoir : *« développer très fortement la mobilisation de la ressource en biomasse dans des conditions environnementales et économiques optimales, dans le respect de la biodiversité, en privilégiant les usages matériaux et en veillant à l'efficacité des filières, y compris dans la valorisation énergétique [...], en privilégiant les usages régionaux ou locaux et en prenant en compte les impacts du changement climatique, y compris sur la ressource en eau ».*

Notre mission a donc été d'animer une réflexion inscrite dans ce contexte caractérisé par des ambitions élevées concernant les différents usages de la biomasse et les bénéfices à en attendre pour notre collectivité (stockage du carbone, réduction des émissions de gaz à effet de serre, production de matériaux et de molécules diverses se substituant à ceux d'origine fossile ... et naturellement couverture des besoins alimentaires), usages potentiellement soumis à des formes de compétitions, inscrits dans des territoires présentant une valeur à préserver et sous contrainte des effets présents et à venir du changement climatique.

Notre but n'a pas été de chercher à établir, *in fine*, une hiérarchie dans les différents usages (particulièrement riches, en France, eu égard à sa géographie et à son histoire), mais d'éclairer ce qui se jouera dans la décennie en cours et les suivantes, et de faire déboucher un travail didactique (pour classer les biomasses, leurs usages et ses effets) sur une méthode d'aide à la décision, pour éclairer les débats et choix publics, aussi bien que privés.

Cette volonté didactique n'est pas triviale, dès lors qu'il s'est agi de procéder en prenant en considération à la fois la disponibilité (physique et économique) des sources de biomasses, le bilan carbone des différents usages susceptibles d'en être faits (et l'éventuelle existence d'autres solutions bas-carbone pour répondre aux mêmes besoins), les effets environnementaux associés (effet sur la biodiversité, la ressource en eau, etc.), le tout en appréhendant différents horizons temporels (c'est-à-dire la longueur du cycle de reconstitution des sources de biomasse considérées).

À cette fin, nous avons bénéficié de nombreuses contributions au fil des auditions qui ont été organisées, ainsi que des échanges très riches entre les membres du groupe qui ont scandé cette année de travail. Si ce rapport n'engage que ses co-présidents, nous tenons à remercier ici toutes et tous et naturellement, Pierre VAISS qui, en tant que rapporteur de notre groupe de travail, s'est attaché à transcrire les débats et à organiser les idées issues de ces échanges, mobilisant pour cela une grande expertise issue de son parcours, particulièrement précieuse au regard de la complexité des questions traitées et des enjeux.

Monique AXELOS

Patrice GEOFFRON

LISTE DES PARTICIPANTS

Stéphane	ANDRIEU	SPEGNN
Laurent	FAURE	AAMF
Jean-François	DELAITRE	AAMF
Jean-Marc	ONNO	AAMF
Olivier	APPERT	Académie des technologies
Jérôme	MOUSSET	Ademe
Thierry	CHAPUIS	AFG
Jean-Marc	LEROY	AFG
Frédéric	MOYNE	Albioma
Paul	LUCHESE	CEA
Philippe	CLAVEL	CFDT-FCE
Christophe	BÉGUINET	CFDT-FCE
Elizabeth	NEAU	CFE-CGC
Pascal	DUPOIS	CGE
Valérie	PLAGNOL	CRE
Catherine	EDWIGE	CRE
Natalia	BAUDRY	CRE
Rachid	BOUABANE-SCHMITT	CRE
Emmanuel	RODRIGUEZ	CRE
Thibault	DELAROCQUE	CRE
Anna	FANGEAUX	CRE
Jean	VERGNET	CRE
Aodren	MUNOZ	CRE
Léa	MIGLIORE	CRE
Ilham	BOUSHIFA	CRE
Clémence	PELEGRIN	CRE
Clémence	Le BERRE	CRE
Gary	NORDEN	DGE – Ministère de l'Économie et des Finances
Dominique	LAFOND	EDF
Jean-Michel	CAYLA	EDF
Frédéric	MAILLARD	EDF PEI
Mathieu	BOURGADE	Enedis
Martin	JAHAN	Engie
Lionel	GUY	FNCCR
Guillaume	PERRIN	FNCCR
Olivier	DAUGER	FNSEA
Luc	POYER	France Nouvelles Énergies
Étienne	BEEKER	France Stratégie
Julien	FOSSE	France Stratégie
Xavier	PASSEMARD	GRDF
Céline	HEIDRECHID	GRTgaz
Morgan	BAILLET	Mairie de Paris
Antoine	COMTE-BELLOT	Ministère de la Transition Écologique

Pierre-Yves	BURLOT	Séché Environnement
Katia	ROLLAND	Séché Environnement
Valérie	WEBER HADDAD	SER
Grégory	FICHET	SIGEIF
Martine	MACK	SPEGNN
Nicolas	SPILLIAERT	Storengy
Frédéric	TERRISSE	Storengy
Grégory	BUGLER	Teréga
Laura	LUU VAN LANG	Teréga
Marie-Claire	AOUN	Teréga
Emilie	MAUGER	Teréga
Christine	GOUBET-MILHAUD	UFE
Christophe	LEININGER	UFE
Mathias	LAFFONT	UFE
Anne-Marie	MUNTZ	Uneleg
François	AUSTRUY	Uneleg
Patrick	ROIRON	Uniden
Mathieu	de CARVALHO	Uprigaz
Alain	RAOUX	Uprigaz
Jean-Christophe	TARET	Véolia
Florian	DUPONT	Zefco

AINSI QUE LES MEMBRES DU COMITÉ DE PROSPECTIVE :

- Monsieur Ivan **FAUCHEUX**, Commissaire référent
- Monsieur Didier **LAFFAILLE**, Secrétaire général
- Monsieur Guillaume **FOURNEL**, Chargé de mission
- Madame Sophie **SIDEM**, Chargée de mission

LISTE DES INTERVENANTS

Julien FOSSE , France Stratégie
Paul HUGUES , International Energy Agency (IEA)
Nicolas TONNET , Agence de la transition écologique (Ademe)
Catherine DELEUZE , Office national des forêts (ONF)
Pierre-Yves BURLLOT , Sésé Environnement
Daphne LORNE , IFP Énergies nouvelles (IFPEN)
Sylvain NIZOU , Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternative (CEA)
Olivier APPERT , Président du Groupe de travail (GT4) sur le « <i>verdissement du gaz</i> »
Soraya THABET , Engie
Julia GRIMAULT , Institute for Climate Economics (I4CE)
Océane Le PIERRES , Institute for Climate Economics (I4CE)
Pierre RENAULT , Institut national de la recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE)
Mouloud BEHLOUL , Lafarge – Holcim
Aïcha EI KHAMLICHI , Agence de la transition écologique (Ademe)
Roland DE LARY , Centre national de la propriété forestière (CNPFF)
Sylvain REALLON , Ministère en charge de l'agriculture et de la souveraineté alimentaire

TABLE DES MATIÈRES

LE MOT DE LA PRÉSIDENTE DE LA CRE	3
AVANT-PROPOS	5
LE MOT DES CO-PRÉSIDENTS	6
LISTE DES PARTICIPANTS	7
LISTE DES INTERVENANTS.....	9
TABLE DES MATIÈRES	10
INTRODUCTION : QUELLE PLACE POUR LA BIOMASSE DANS LA TRAJECTOIRE VERS LA « NEUTRALITE CARBONE » ?	11
1. « NEUTRALITÉ CARBONE », « BIOMASSE » : DE QUOI PARLONS-NOUS ?.....	13
1.1. POURQUOI LE CARBONE ?	14
1.2. LE CO ₂ : DES FLUX, DES STOCKS, UN CYCLE, UNE BALANCE ET LA NEUTRALITE.....	15
1.3. ET LA BIOMASSE DANS TOUT ÇA ?	22
1.4. LES PRINCIPAUX MESSAGES	26
2. LES PRINCIPALES BIOMASSES : CARACTÉRISTIQUES, USAGES, POTENTIELS	27
2.1. LES BIOMASSES VEGETALES A CYCLE LONG	27
2.2. LES BIOMASSES VEGETALES A CYCLE COURT	36
2.3. LES BIOMASSES NON VEGETALES	42
2.4. ILLUSTRATION D'UN USAGE COMBINÉ DE PLUSIEURS BIOMASSES : LA METHANISATION	45
2.5. LES PRINCIPAUX ENJEUX LIÉS AUX MOBILISATIONS DES BIOMASSES	49
2.6. LES PRINCIPAUX MESSAGES DE LA PARTIE 2	51
3. PROPOSITIONS DE CRITÈRES DE HIÉRARCHISATION DES ACTIVITÉS	53
3.1. LES ACTIVITES A HIERARCHISER	53
3.2. CRITERES DE HIERARCHISATION ENVISAGEABLES	54
3.3. PROPOSITION D'UN OUTIL D'AIDE A LA DECISION, BASE SUR UN CROISEMENT « ACTIVITES & CRITERES »	59
3.4. ÉLÉMENTS DE CONCLUSION.....	59
ANNEXE - PROPOSITION D'OUTIL D'AIDE A LA DECISION : TABLEAU CROISANT « ACTIVITES & CRITERES »	61

INTRODUCTION : QUELLE PLACE POUR LA BIOMASSE DANS LA TRAJECTOIRE VERS LA « NEUTRALITE CARBONE » ?

Ces dernières décennies, les politiques publiques ont mis la réduction des émissions des gaz à effet de serre régulièrement et en haute place à l'agenda politique. Divers plans, programmes, stratégies successifs ont progressivement fixé un cap et des **objectifs de long-terme**.

La Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) est définie en application de la loi sur la Transition Énergétique pour la Croissance Verte (LTECV), à l'article 173, comme un outil de pilotage pour animer et suivre la politique de décarbonation de l'économie française et de transformation de son modèle énergétique. Une **première SNBC publiée en 2015 (SNBC 1)** visait l'objectif de division par quatre des émissions de gaz à effet de serre (GES) à l'horizon 2050 par rapport à 1990 (« *Facteur 4* ») avec un objectif intermédiaire défini par la LTECV de réduction de 40 % par rapport à 1990 à l'horizon 2030, conformément aux objectifs européens définis en 2014. La **révision de la SNBC 1** a conduit à la **SNBC 2** (novembre 2018) qui est dimensionnée par un rehaussement de l'ambition via un **objectif de neutralité carbone à l'horizon 2050** énoncé par le Plan climat de juillet 2017. À moyen terme, la SNBC 2 ambitionne l'atteinte du zéro émission nette en 2050, avec un rythme de **réduction annuelle progressif, entre - 3 et - 4 %/an sur la période 2022-2030**. Une **mise à jour de la SNBC 2 est en cours de réalisation**, notamment pour prendre en compte le nouvel objectif de l'UE de réduction de 55 % des émissions nettes de GES en 2030.

Dans les termes de l'Accord de Paris, la neutralité carbone est entendue comme **l'atteinte de l'équilibre entre les émissions de gaz à effet de serre et les absorptions** anthropiques (c'est-à-dire les absorptions par les écosystèmes gérés par l'homme tels que les forêts, les prairies, les sols agricoles et les zones humides, et par certains procédés industriels, tels que la capture et le stockage du carbone ou CSC).

Dans la poursuite de cet objectif, **la biomasse constitue un levier essentiel** dès lors que les écosystèmes végétaux (forêts, cultures, prairies, zones humides, *etc.*), grâce au mécanisme de la photosynthèse, absorbent du CO₂ atmosphérique et constituent à ce titre ce que l'on appelle des « **puits de carbone** ». Par ailleurs, en constituant une source d'énergie renouvelable, la biomasse peut être utilisée dans certaines conditions en substitution à des sources d'énergie fossile. Au-delà de ces usages énergétiques, la biomasse offre d'autres fonctionnalités comme pour les produits de construction stockant également du CO₂ au long de leur durée de vie.

En cohérence avec la stratégie nationale de mobilisation de la biomasse (SNMB)¹, la SNBC 2 prévoit ainsi de **développer très fortement la mobilisation de la biomasse**, pour atteindre une production 2,5 fois plus importante qu'aujourd'hui, tout en considérant tous les enjeux sous-jacents (biodiversité, ressources, conditions économiques et environnementales) et en privilégiant les usages de proximité. Dans ce cadre, la biomasse est sollicitée pour l'atteinte de 2 objectifs :

- **décarboner la production d'énergie**, notamment via la valorisation du bois et des déchets de l'agriculture ;
- **augmenter les puits de carbone naturels** (forêts, produits bois et terres agricoles) pour compenser le niveau résiduel d'émissions dues à l'agriculture et aux procédés industriels en 2050.

Toutefois, tant la SNBC 2 (publiée début 2020), les études sur lesquelles elle s'appuie, que celles qui en ont résulté (analyses de faisabilité, *etc.*) sont fondées sur des données et des hypothèses largement remises en question dans le courant de l'année 2022, période durant laquelle le groupe de travail a tenu ses réunions et conduit ses réflexions : la forte augmentation des prix de l'énergie

¹ La SNMB poursuit spécifiquement un objectif d'approvisionnement en biomasse énergie, mais en ménageant les autres usages (matière, alimentaire, stockage de carbone, *etc.*). Elle doit être renouvelée à chaque SNBC/PPE, la dernière a été publiée en 2018 par le Ministère de la transition écologique.

touchant tant le gaz que l'électricité ou le charbon (le prix du gaz est passé en quelques mois de 25 à ± 200 €/MWh), la mise en œuvre d'embargos (charbon, pétrole, mais aussi les difficultés d'acheminement des céréales et autres matières premières), la mise en avant du principe de sécurité d'approvisionnement (et les doutes à cet égard concernant l'approvisionnement en gaz naturel et la production d'électricité) et de souveraineté énergétique et industrielle, le tout dans un contexte général (pas seulement lié à la guerre) de forte inflation.

L'une des principales difficultés des travaux conduits dans le groupe de travail aura été de parvenir à inscrire ses réflexions dans le contexte de cette rupture ; probablement s'agit-il en même temps d'un de ses principaux intérêts, en constituant une tentative « *en temps réel* » d'inscrire la biomasse et ses usages dans la nouvelle donne qui émergera du conflit encore en cours.

- Les objectifs du groupe de travail et de ce rapport

Ce rapport a vocation à **contribuer aux réflexions sur les voies à suivre pour atteindre la neutralité carbone à horizon 2050**, tel que le prévoit la SNBC de la France.

Un des enjeux est de **clarifier les questions récurrentes autour des usages des biomasses et des cycles du carbone qui en découlent**. Et cela en tenant compte des variations du cycle du carbone en fonction de la nature de la biomasse, du type de sa valorisation (usages énergies *versus* usages matériaux, notamment), de l'éventuel changement d'affectation des sols, du contexte territorial et de la capacité du territoire à séquestrer du carbone sur le temps court et le temps long, entre autres considérations.

Dès lors **une vision prospective de la contribution de la biomasse à la neutralité carbone** requiert nécessairement une approche multicritère selon : la disponibilité (physique et économique) des différents types de biomasses valorisables, les gisements potentiels et le bilan carbone des différents usages, les critères environnementaux (effet sur la biodiversité, la ressource en eau) ainsi que la compétition des usages (alimentaires, autres filières industrielles, existence d'autres solutions bas-carbone, *etc.*).

Eu égard à cette complexité, l'ambition première de ce rapport est de **faire œuvre de pédagogie sur la contribution de la biomasse à la neutralité carbone**. Il a vocation à « *éclairer* » le **débat public** sur les grands enjeux énergétiques, à destination des décideurs politiques et économiques, des acteurs du monde académique et de la recherche, ainsi que des citoyens.

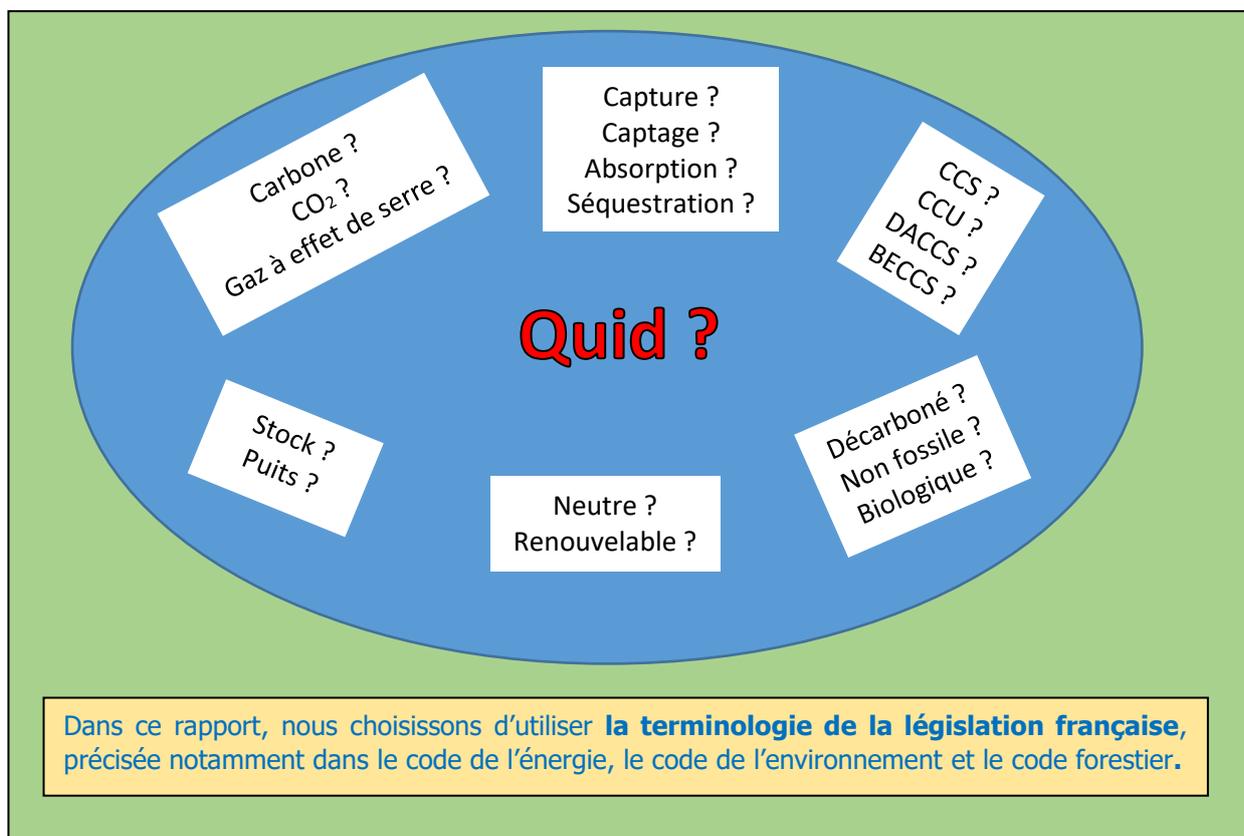
La première partie est destinée à expliciter ce que recouvre le terme « neutralité » au travers du cycle du carbone (absorption, émission, stockage du CO₂) et le rôle de la biomasse dans ce cycle.

La deuxième détaille les différents types de biomasse, leurs caractéristiques, leurs usages et les enjeux autour de leur mobilisation.

La troisième partie a pour objet de distinguer des critères de hiérarchisation des activités relatives aux biomasses en fonction de leur contribution à la neutralité carbone.

Le rapport débouche ainsi, au travers d'une telle méthodologie de hiérarchisation, sur un outil d'aide à la décision et à la programmation qui soit le plus opérationnel possible, que chaque décideur peut s'approprier et adapter à son domaine d'activités. Cela sans prétention de refermer ou figer un débat dont il s'agit avant tout, nous semble-t-il, d'explicitier la complexité.

1. « NEUTRALITÉ CARBONE », « BIOMASSE » : DE QUOI PARLONS-NOUS ?



Interrogeons-nous sur chacun des termes qui constituent la thématique de ce groupe de travail, « *biomasse et neutralité carbone* » : de quoi s'agit-il ? quels sont les enjeux associés ? de quoi traitera, ou pas, ce rapport ?

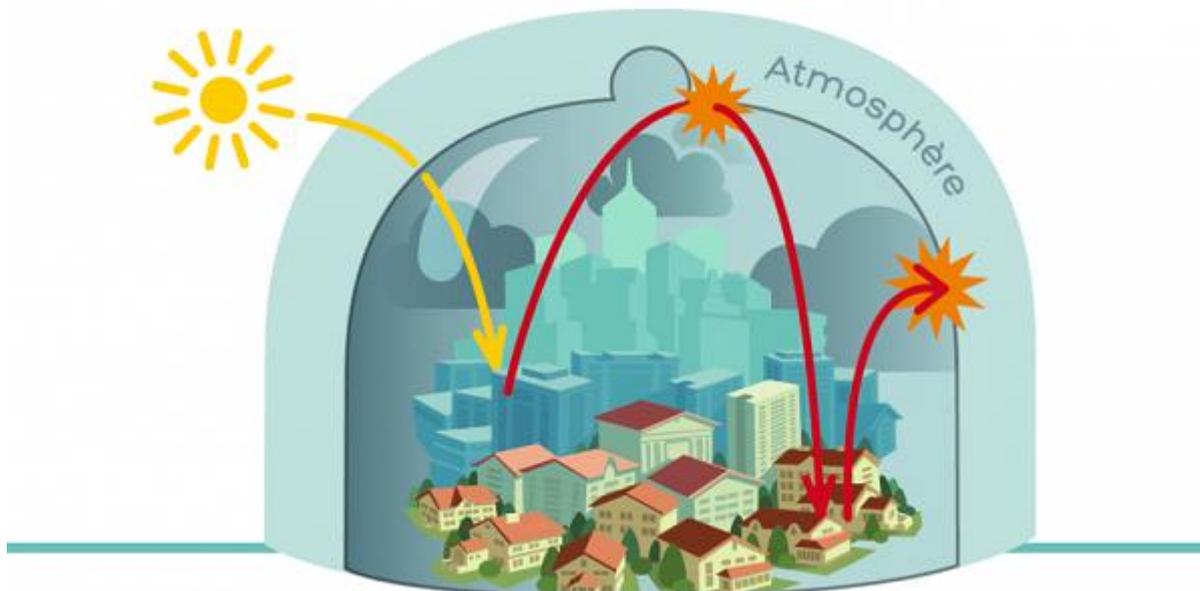
La partie 1 est ainsi structurée :

- 1.1 Pourquoi le carbone ?
- 1.2 Le CO₂ : des flux, des stocks, un cycle, une balance et la neutralité
- 1.3 Et la biomasse dans tout ça ?
- 1.4 Les principaux messages

1.1. Pourquoi le carbone ?

Le **carbone** est un atome constitutif du **dioxyde de carbone (CO₂)** et du méthane (CH₄), deux des principaux **gaz à effet de serre (GES)**.

Les émissions de gaz à effet de serre et l'empreinte carbone



Source : Commissariat Général au Développement Durable

Un **gaz à effet de serre** est un gaz présent dans l'atmosphère qui a pour caractéristique d'**absorber le rayonnement infrarouge** émis par la terre **et de le renvoyer vers la terre**, ce qui a pour effet **de la réchauffer**. Si cet effet de serre a permis de maintenir des températures positives sur terre favorisant le développement des écosystèmes, **l'augmentation rapide de la concentration de GES** dans l'atmosphère au cours de l'anthropocène s'accompagne de **hausse de la température dont les conséquences sont complexes à évaluer et qui risquent d'être délétères pour nombre de ces écosystèmes**.

En mettant à part l'eau (H₂O), les gaz à effet de serre responsables du réchauffement climatique sont les suivants² : **le dioxyde de carbone (CO₂)**, **le méthane (CH₄)**, le protoxyde d'azote (N₂O), les hydrocarbures fluorés (HFC), les hydrocarbures perfluorés (PFC) et l'hexafluorure de soufre (SF₆)³.

Près de **70 % des émissions de ces gaz à effet de serre** sont **des émissions de dioxyde de carbone (CO₂)** provenant essentiellement de l'**activité humaine** lors de la combustion de ressources fossiles comme le pétrole, le gaz naturel ou le charbon, pour le chauffage et le transport. Certains procédés industriels rejettent aussi beaucoup de CO₂ comme la sidérurgie, les cimenteries ou la pétrochimie.

² Selon la législation nationale : articles L. 229-5 et R. 229-5 du code de l'environnement, par transposition de l'annexe II de la Directive 2003/87/CE du 13 octobre 2003.

³ Afin de pouvoir comparer les GES entre eux, on évalue la capacité de chaque GES à renvoyer de l'énergie vers le sol (le forçage radiatif) comparativement au CO₂. La contribution de chaque gaz à l'effet de serre se mesure ensuite par son potentiel de réchauffement global (PRG) qui dépend ainsi de sa capacité à intercepter et renvoyer les rayonnements solaires ainsi que de sa durée de vie. La valeur du PRG est déterminée selon une échelle de temps, généralement 100 ans. Pour exprimer les émissions de GES en tonnes d'équivalent CO₂, les émissions de chaque gaz sont pondérées par un coefficient fonction de son PRG, fixé à 1 pour le CO₂. Ce coefficient est ainsi de 25 pour le CH₄, de 298 pour le N₂O, de 23 900 pour le SF₆, de 140 à 11 700 pour les HFC et de 6 500 à 9 200 pour les PFC. Source : www.notre-environnement.gouv.fr.

La mesure, le suivi et la **réduction de ces émissions constituent donc des enjeux primordiaux. En France**, ils sont inscrits dans la loi comme étant **reconnus de priorité nationale**.

Article L. 229-1 du code de l'environnement :

« *La lutte contre l'intensification de l'effet de serre et la prévention des risques liés au réchauffement climatique sont **reconnues priorités nationales**.*

*Les **objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre** et les **mesures prises à cette fin** sont déterminés par les dispositions du présent titre et par les dispositions du livre II de la première partie du code des transports et celles du livre I^{er}, titre préliminaire, et du livre II du code de l'énergie ».*

Dans ce rapport, le sujet de la « *neutralité carbone* » est traité sous l'angle essentiellement des flux de dioxyde de carbone (CO₂) entrant ou sortant de l'atmosphère (il sera très peu fait état du méthane⁴ qui provient majoritairement des activités agricoles).

1.2. Le CO₂ : des flux, des stocks, un cycle, une balance et la neutralité

Les flux de CO₂ entre le compartiment terrestre ou marin et le compartiment aérien recouvrent, d'une part, **les absorptions** de CO₂ issu de l'atmosphère et, d'autre part, **les émissions** de CO₂ dans l'atmosphère⁵. Nous évoquerons également **le stockage** du carbone consécutif à l'absorption de CO₂. Cet ensemble de flux et de stocks s'inscrivent dans le cycle du carbone dont les mécanismes sont particulièrement complexes et encore mal connus alors qu'ils sont primordiaux pour relever le double défi de favoriser la séquestration du carbone et de continuer à mobiliser le carbone de la biomasse pour une diversité d'usages dont l'énergie.

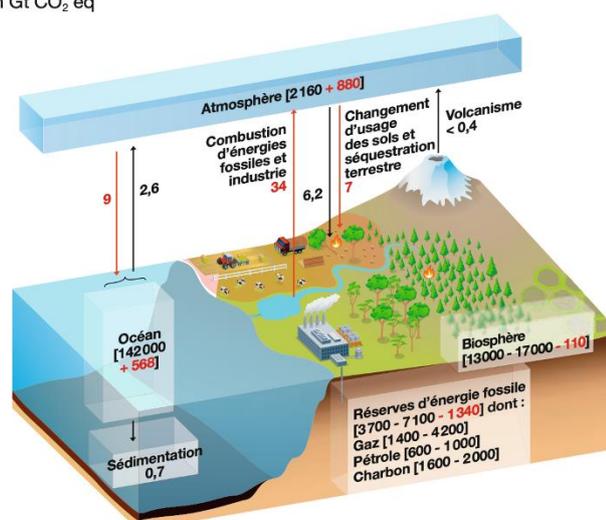
⁴ Les émissions de méthane représentent 13 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre.

⁵ Selon la terminologie employée par le code de l'énergie - Article L. 281-10 du code de l'énergie : « *La biomasse forestière exploitée pour la production de biocarburants, bioliquides et combustibles ou carburants issus de la biomasse doit, en outre, répondre aux critères relatifs à l'utilisation des terres, le changement d'affectation des terres et la foresterie (UTCATF) et provenir d'un pays ou d'une organisation régionale d'intégration économique qui est partie à l'accord de Paris adopté le 12 décembre 2015 et signé à New-York par la France le 22 avril 2016 et qui : / 1° Soit a présenté une contribution déterminée au niveau national (CDN) à la convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques, adoptée à New-York le 9 mai 1992 et signée par la France le 13 juin 1992, couvrant les émissions et les absorptions de CO₂ de l'agriculture, de la sylviculture et de l'utilisation des sols et garantissant que les modifications apportées au stock de carbone associées à la récolte de la biomasse sont prises en compte aux fins de l'engagement du pays de réduire ou de limiter les émissions de gaz à effet de serre conformément à sa contribution ; / 2° Soit dispose d'une législation en place au niveau national ou infranational, conformément à l'article 5 de l'accord de Paris, applicable à la zone d'exploitation, visant à conserver et renforcer les stocks et les puits de carbone et attestant que les émissions déclarées du secteur de l'utilisation des terres, du changement d'affectation des terres et de la foresterie ne dépassent pas les absorptions. [...] ».*

Cette terminologie d'« *absorption* » et d'« *émission* » résulte de l'accord de Paris, adopté le 12 décembre 2015 et entrée en vigueur le 4 novembre 2016. Dans son article 4 : « *1. En vue d'atteindre l'objectif de température à long terme énoncé à l'article 2, les Parties cherchent à parvenir au plafonnement mondial des émissions de gaz à effet de serre dans les meilleurs délais, étant entendu que le plafonnement prendra davantage de temps pour les pays en développement Parties, et à opérer des réductions rapidement par la suite conformément aux meilleures données scientifiques disponibles de façon à parvenir à un équilibre entre les émissions anthropiques par les sources et les absorptions anthropiques par les puits de gaz à effet de serre au cours de la deuxième moitié du siècle, sur la base de l'équité, et dans le contexte du développement durable et de la lutte contre la pauvreté. [...] ».*

Schéma du cycle global du carbone de 2010-2019

Flux en Gt CO₂ éq/an
Stocks en Gt CO₂ éq



Source : Ministère de la Transition Écologique, Chiffres clés du climat, 2022

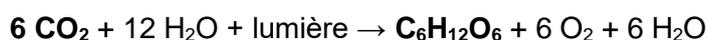
1.2.1. Les mécanismes d'absorptions du CO₂

Les **mécanismes d'absorption du CO₂** atmosphérique sont de deux natures :

- soit des phénomènes **naturels** : biologique *via* la photosynthèse⁶ ou physico-chimique *via* la dissolution du CO₂ dans l'eau des mers froides (non développé dans ce rapport) ;
- soit des procédés **technologiques**.

▪ L'absorption du CO₂ atmosphérique via la photosynthèse réalisée par les végétaux

Les végétaux présentent la particularité de transformer l'énergie solaire en énergie chimique, permettant ainsi de **synthétiser de la matière organique**, notamment des sucres, à partir de l'eau (H₂O) puisée dans le sol par les racines et **du dioxyde de carbone (CO₂) capté dans l'air par les feuilles**. Ce procédé se résume par la formule chimique suivante :



Par ce procédé naturel, **du carbone présent dans le compartiment atmosphérique** sous forme de CO₂ est **transféré vers le compartiment terrestre** sous forme de matière organique constitutive des plantes.

En termes quantitatifs, le **volume annuel de CO₂ absorbé en France** est de l'ordre de **15 MtCO₂ dans les années récentes**^{7,8}.

⁶ Un autre phénomène important est celui de la dissolution du CO₂ dans les océans, cela d'autant plus que l'eau est froide. Le rapport, axé sur le thème de la biomasse, se focalisera sur la photosynthèse par les végétaux.

⁷ Source : Citepa, Rapport Secten, édition 2022 – GES

https://www.citepa.org/wp-content/uploads/Citepa_Rapport-Secten-2022_GES_v1.1.pdf

⁸ Source : Citepa, Rapport Secten, édition 2022 – UTCATF

https://www.citepa.org/wp-content/uploads/Citepa_Rapport-Secten-2022_UTCATF_v1.0.pdf

- L'absorption du CO₂ atmosphérique par les procédés technologiques

Plusieurs technologies ont pour fonction d'absorber du CO₂ atmosphérique, soit :

- **en sortie de cheminée**, par exemple *via* des systèmes de captage utilisant une technologie d'absorption chimique par un solvant aux amines, des molécules dérivées de l'ammoniac. Plusieurs procédés existent, selon que le processus de combustion est modifié ou non (post-combustion, oxycombustion, précombustion) ;
- **directement dans l'air ambiant** (« *direct-air-capture ou DAC* ») : la technologie employée consiste à aspirer le CO₂ (d'une concentration de l'ordre de 10 ppm) après l'avoir concentré à un niveau d'environ 400 ppm.

1.2.2. Le stockage par absorption de CO₂

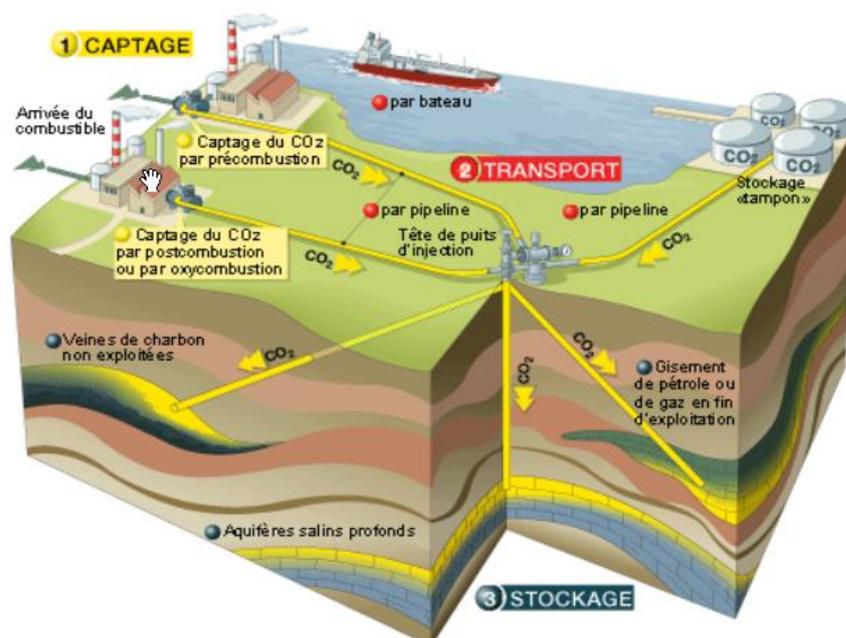
Les **mécanismes et les lieux de stockage** du carbone issu de l'absorption CO₂ atmosphérique sont de deux natures :

- soit des **mécanismes biologiques naturels** (la croissance végétale), avec pour **lieu de stockage le végétal lui-même** sur pied (ses feuilles, fruits, tiges, branches, tronc, racines). Lorsque ces parties végétales sont coupées ou dépérissent naturellement, elles participent également au stockage du carbone soit par transfert dans le sol, soit dans des matériaux (bois d'œuvre, matériaux d'isolation, etc.). Ces différentes formes de biomasse font l'objet de la partie 2 du rapport ;
- soit des **procédés technologiques**, avec pour **lieu de stockage des grandes cavités géologiques**, ce qui requiert aussi du **transport**. On parle ici de procédé « *carbon capture and storage ou CCS* ».

Les sites de stockage privilégiés correspondent :

- aux **aquifères salins profonds** (nappes d'eau impropres à la consommation humaine, à plus de 1 000 m de profondeur), dans lesquels est injecté le CO₂, qui se dissout puis pourrait se minéraliser ultérieurement ;
- à **des anciens gisements** de pétrole ou de gaz, qui ne sont plus exploités, ou en cours d'exploitation et dans lesquels l'injection de CO₂ permet d'extraire davantage de gaz ou de pétrole.

Représentation schématique de l'ensemble de la chaîne CCS (captage, transport et stockage géologique du CO₂) avec les différentes techniques de captage



Source : IFPEN

Les notions de **puits de carbone** et de **stock de carbone** sont souvent employées dans les divers rapports sur le sujet. Ces notions, inscrites dans le code de l'énergie⁹, renvoient respectivement à un **état actif** (vivant si procédé naturel, opérationnel si procédé technologique) **d'absorption** de CO₂, et à un **état inactif de stockage** de CO₂. Le rapport de la SNBC 2 propose la définition suivante pour le puits : « *Un **puits de carbone** [...] est un **écosystème naturel** (forêts, terres agricoles...) ou un **procédé artificiel** qui **permet de capter** une quantité significative de dioxyde de carbone (CO₂)* ».

Ce point sur le stockage permet d'attirer l'attention sur une problématique importante : dans la phase « *stockage* », le carbone ne participe plus au mécanisme d'absorption du CO₂ atmosphérique, mais **il ne contribue pas non plus à l'émission de CO₂ dans l'atmosphère**. Cette émission aura lieu plus tard (lors par exemple de la combustion *in fine* d'un produit-bois) ou pas (s'il s'agit de meubles, ou d'une charpente à durée de vie longue). Ces formes de **stockage du carbone** constituent un **levier d'action et de pilotage des émissions de CO₂** puisqu'il est possible de retarder celles-ci aussi longtemps qu'il est choisi de maintenir le stock. La notion de stockage introduit une dimension temporelle.

1.2.3. Les émissions de CO₂

En France, le niveau total d'émissions de GES est de 418 MtCO₂eq/an. Les principales activités émettrices de gaz à effet de serre (GES) sont, **en 2020 et 2021**, par ordre décroissant de contribution¹⁰ :

Le secteur des transports qui représente **29 % des émissions totales de GES de la France** (hors puits de carbone) en 2020, soit 113,1 MtCO₂eq. En 2021, ce niveau est pré-estimé à 126 MtCO₂eq. **Le transport routier** (toutes catégories de véhicules confondues) **représente 95 % des émissions** (essentiellement émissions de CO₂) **de ce secteur**, les 5 % restant étant représenté par les transports aériens, ferroviaires, maritimes (dont la pêche), fluvial de marchandises et autres modes de navigation (bateaux de plaisance et autres petits bateaux).

L'agriculture représente 20,6 % des émissions totales de GES de la France (hors puits de carbone) en 2020, soit 80,9 MtCO₂eq. L'essentiel des émissions de GES est **constitué de méthane (CH₄ 46 %)**, **principalement lié à l'élevage**, et de protoxyde d'azote (N₂O 40 %), principalement lié à la fertilisation des cultures. Les émissions liées à la consommation d'énergie du secteur

⁹ Article L. 281-10 du code de l'énergie : « *La biomasse forestière exploitée pour la production de biocarburants, bioliquides et combustibles ou carburants issus de la biomasse doit [...] provenir d'un pays [...] qui : / 1° Soit a présenté une contribution déterminée au niveau national (CDN) à la convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques, adoptée à New-York le 9 mai 1992 et signée par la France le 13 juin 1992, couvrant les émissions et les absorptions de CO₂ de l'agriculture, de la sylviculture et de l'utilisation des sols et garantissant que les modifications apportées au stock de carbone associées à la récolte de la biomasse sont prises en compte aux fins de l'engagement du pays de réduire ou de limiter les émissions de gaz à effet de serre conformément à sa contribution ; / 2° Soit dispose d'une législation en place au niveau national ou infranational, conformément à l'article 5 de l'accord de Paris, applicable à la zone d'exploitation, visant à conserver et renforcer les stocks et les puits de carbone et attestant que les émissions déclarées du secteur de l'utilisation des terres, du changement d'affectation des terres et de la foresterie ne dépassent pas les absorptions. / À défaut de pouvoir établir que ces conditions sont remplies, la biomasse forestière exploitée pour la production de biocarburants, bioliquides et combustibles ou carburants issus de la biomasse doit provenir de zones d'approvisionnement forestières disposant de systèmes de gestion visant à garantir ou renforcer, sur le long terme, la conservation des stocks et des puits de carbone. [...]* ».

Cette terminologie de « *puits* » (ainsi que de « *réservoir* ») résulte de l'accord de Paris, adopté le 12 décembre 2015 et entrée en vigueur le 4 novembre 2016. Dans son article 5 : « *1. Les Parties devraient prendre des mesures pour conserver et, le cas échéant, renforcer les puits et réservoirs de gaz à effet de serre comme le prévoit l'alinéa d) du paragraphe 1 de l'article 4 de la Convention, notamment les forêts. [...]* ».

¹⁰ Source : CITEPA, Rapport 2022.

représentent 13 % du total. Les émissions de la sylviculture ne représentent qu'une très faible fraction des émissions du secteur correspondant à l'usage des engins mobilisés.

Le secteur de l'industrie manufacturière et de la construction représente **entre 26 %** (début des années 1990) **et 19 %** (fin des années 2010) des émissions de CO₂eq du total national français. Ces émissions proviennent à la fois des activités de combustion et des procédés industriels mis en œuvre.

Le secteur de l'usage des bâtiments et des activités résidentielles, tertiaires, commerciales et institutionnelles représente **18 % des émissions** (hors puits de carbone) en 2020, soit 71 MtCO₂eq. En 2021, ce niveau est pré-estimé à 75 MtCO₂eq. Les émissions de ce secteur sont dominées par les **appareils de combustion**. La **climatisation**, la **réfrigération commerciale** et l'utilisation de solvants ont aussi des impacts importants sur les émissions de certains polluants et de gaz fluorés à effet de serre.

Le secteur de l'industrie de l'énergie comprend les émissions de **la production d'énergie** (centrales électriques, production de chaleur, incinération de déchets avec récupération d'énergie), les émissions liées à **la transformation d'énergie** (raffineries, transformation de combustibles minéraux solides, etc.) et **l'extraction et la distribution d'énergie** (pétrole, gaz naturel, charbon, etc.). Ce secteur représente **10 % des émissions totales de GES de la France** (hors puits de carbone) en 2020, soit 40,8 MtCO₂eq. En 2021, ce niveau est pré-estimé à 43,8 MtCO₂eq.

Le secteur du traitement centralisé des déchets inclut principalement ceux présents sous forme solide, le traitement et rejet des eaux usées domestiques et industrielles. Il représente **3,7 % des émissions totales de GES de la France** (hors puits de carbone) en 2020, soit 14,7 MtCO₂eq. En 2021, ce niveau est pré-estimé à 14,5 MtCO₂eq.

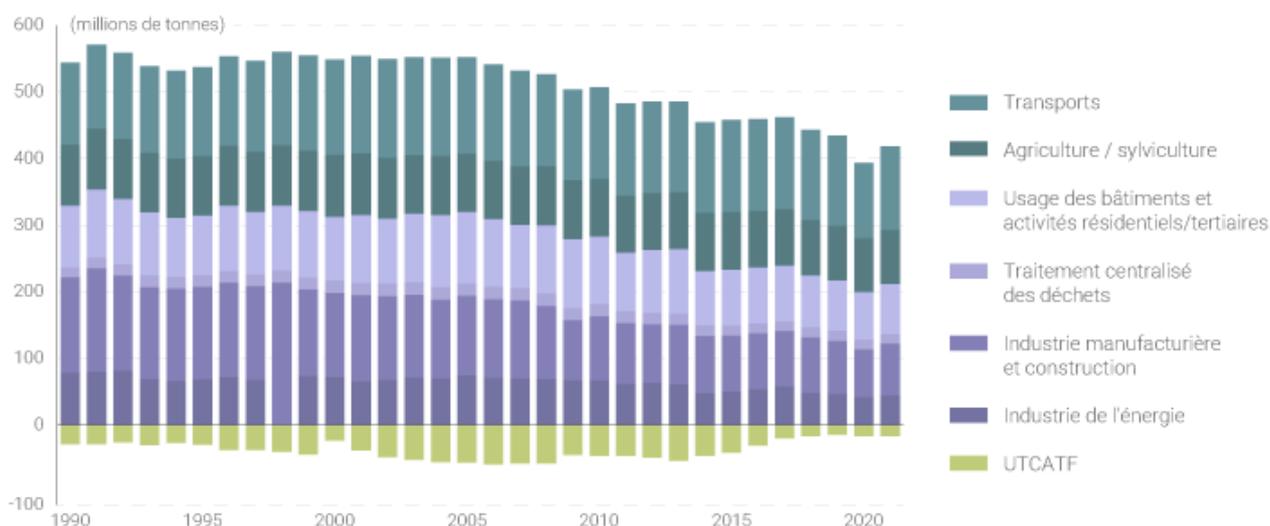
1.2.4. Balance des flux et neutralité carbone

- *Photographique de la réalité physique*

Les variations dans l'utilisation des terres et dans le changement d'affectation des terres et forêts (UTCATF) constituent **pour l'instant le seul secteur permettant d'absorber du CO₂** grâce à la photosynthèse des plantes. En France, aujourd'hui, les absorptions (croissance de la biomasse forestière et non forestière) sont plus importantes que les émissions de ce même secteur (mort des arbres, déboisement, feux de forêt et de végétation, artificialisation des sols, etc.). **Ce secteur constitue donc un puits net de carbone estimé à -14 MtCO₂eq en 2020**. Dans le même temps, en 2020, **les autres secteurs ont émis 393 MtCO₂eq soit 28 fois plus**.

Le secteur de l'UTCATF permet donc de compenser 3,6 % des émissions des autres secteurs.

Évolution des émissions dans l'air de CO₂eq depuis 1990 en France (Métropole et Outre-mer UE)



Source : Citepa

La **balance entre les émissions et les absorptions** de CO₂ est ainsi actuellement largement déficitaire. L'**objectif de « neutralité carbone »** consiste à parvenir, à l'échelle nationale à l'horizon 2050, à un **volume équivalent d'émissions et d'absorptions** de CO₂.

- Un objectif politique

La **neutralité carbone** constitue un **objectif inscrit dans la législation** française.

Article L. 100-4 du code de l'énergie :

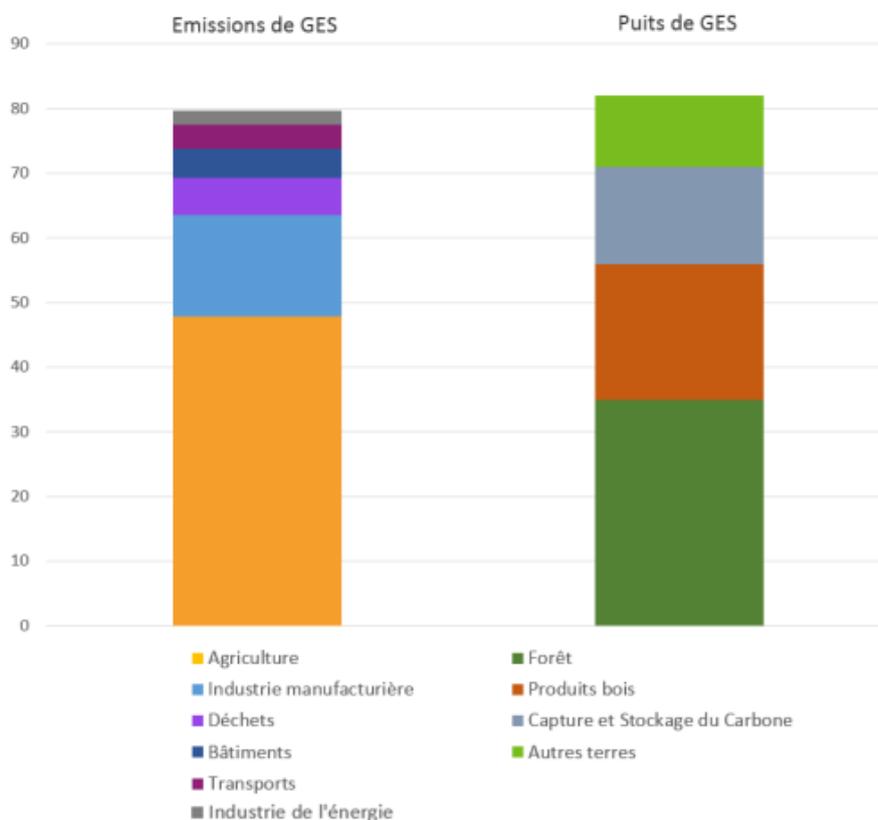
« I.- Pour répondre à l'urgence écologique et climatique, **la politique énergétique nationale a pour objectifs :**

1° De réduire les émissions de gaz à effet de serre de 40 % entre 1990 et 2030 et **d'atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050** en divisant les émissions de gaz à effet de serre par un facteur supérieur à six entre 1990 et 2050. La trajectoire est précisée dans les budgets carbone mentionnés à l'article L. 222-1 A du code de l'environnement. Pour l'application du présent 1°, **la neutralité carbone est entendue comme un équilibre, sur le territoire national, entre les émissions anthropiques par les sources et les absorptions anthropiques par les puits de gaz à effet de serre, tel que mentionné à l'article 4 de l'accord de Paris ratifié le 5 octobre 2016. La comptabilisation de ces émissions et absorptions est réalisée selon les mêmes modalités que celles applicables aux inventaires nationaux de gaz à effet de serre notifiés à la Commission européenne et dans le cadre de la convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques, sans tenir compte des crédits internationaux de compensation carbone ; [...]** ».

L'objectif poursuivi pour la France à l'horizon 2050 est d'atteindre **un niveau d'émission incompressible**, en particulier dans les secteurs non énergétiques (agriculture et procédés industriels). Ce niveau **est estimé à hauteur d'environ 80 Mt CO₂eq par an**. Atteindre la neutralité carbone implique donc de **compenser ces émissions par des puits permettant des absorptions de niveau équivalent**.

Ainsi, la cible autour de laquelle devra s'équilibrer la balance (neutralité carbone) pour la France en 2050 est fixée à 80 MtCO₂eq si les objectifs de réductions sont atteints.

Puits et émissions de gaz à effet de serre en France en 2050 selon le scénario de référence



Source : SNBC 2

Si la **neutralité carbone en 2050 constitue l'objectif**, le chemin pour y parvenir est défini par la **SNBC**. Sur la base d'une **trajectoire prospective à 2050**, la SNBC définit des objectifs de réduction des GES à l'échelle de la France à **moyen terme** : les budgets carbone. Ce sont des **plafonds d'émissions de gaz à effet de serre à ne pas dépasser** au niveau national sur des périodes de cinq ans, exprimés en millions de tonnes de CO₂ équivalent¹¹.

Article L. 222-1 A du code de l'environnement :

« Pour la **période 2015-2018**, puis pour chaque période consécutive de cinq ans, un **plafond national des émissions de gaz à effet de serre** dénommé "budget carbone" est fixé par décret ».

Article L. 100-1 A du code de l'énergie :

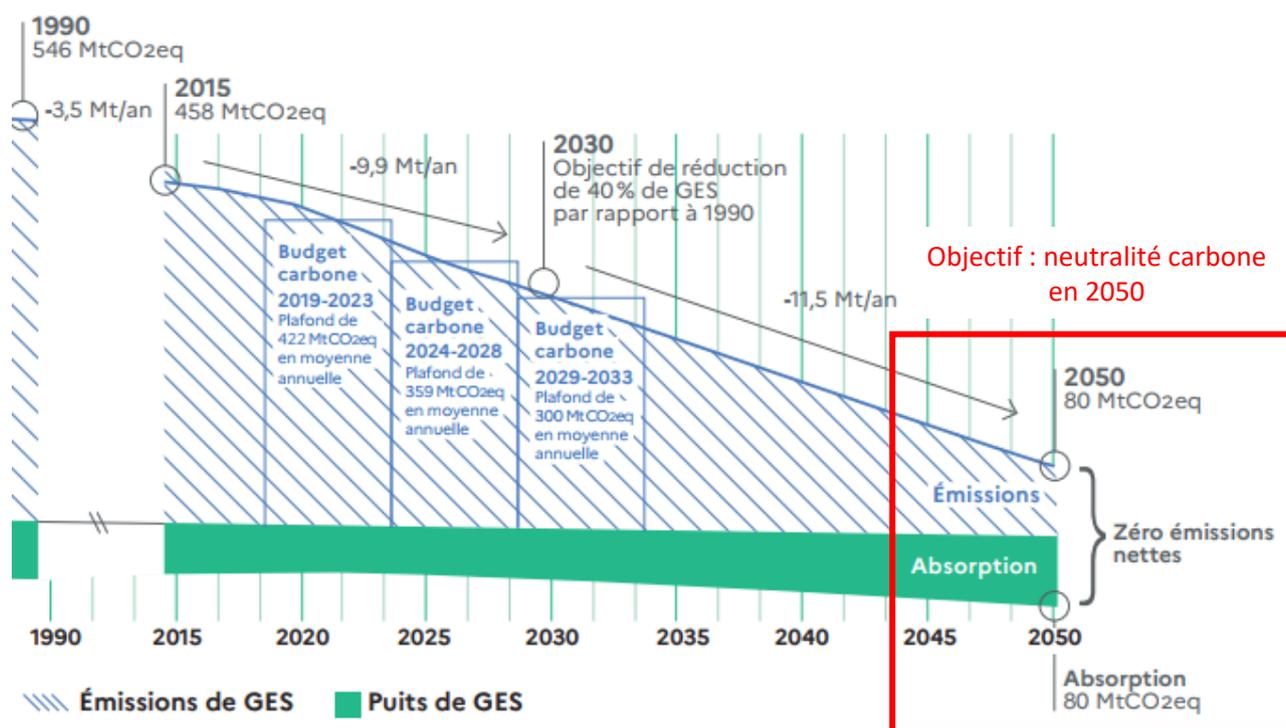
« I.- Avant le 1^{er} juillet 2023, puis **tous les cinq ans**, une loi détermine les objectifs et fixe les priorités d'action de la politique énergétique nationale pour répondre à l'urgence écologique et climatique.

Chaque loi prévue au premier alinéa du présent I précise :

1° **Les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre** pour trois périodes successives de cinq ans ; [...] ».

¹¹ Les budgets carbone comptabilisent les émissions du territoire métropolitain, de la Guadeloupe, de la Guyane, de la Martinique, de La Réunion, de Saint-Martin et de Mayotte, ainsi que les celles associées au transport entre ces zones. Sont exclues les émissions associées aux liaisons internationales aériennes et maritimes.

Évolution des émissions et des puits de GES sur le territoire français entre 1990 et 2050 (en MtCO₂eq)



Source : Citepa

1.3. Et la biomasse dans tout ça ?

1.3.1. La biomasse : une diversité de matériaux issus du vivant

La biomasse est définie dans la législation française au 3^{ème} alinéa de l'article L. 211-2 du code de l'énergie :

« [...] La **biomasse** est :
 la fraction biodégradable des produits, des déchets et des résidus d'origine biologique provenant :
 de l'agriculture, y compris les substances végétales et animales,
 de la sylviculture,
 et des industries connexes, y compris la pêche et l'aquaculture,
 ainsi que la fraction biodégradable des déchets, notamment les déchets industriels ainsi que les déchets ménagers et assimilés lorsqu'ils sont d'origine biologique ».

Ces deux types de biomasse ont pour caractéristique commune d'être toutes deux d'origine biologique et d'être biodégradables à l'échelle humaine. Cette définition renvoie à **une diversité de types de biomasses**, notamment du fait de la **diversité de leur origine**, végétale ou animale et, au stade de déchet, selon qu'elles proviennent d'une filière industrielle ou ménagère¹².

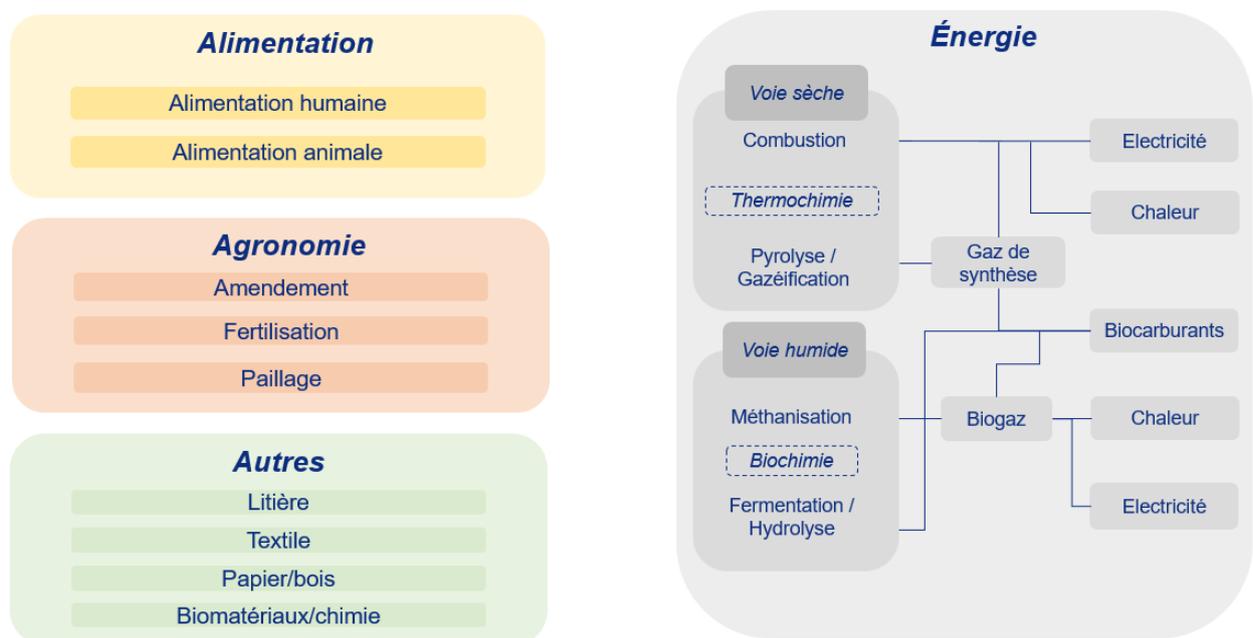
¹² Les dispositions législatives et réglementaires françaises permettent de développer une liste précise des nombreux types de biomasse existants :

- produits et co-produits de l'exploitation forestière : bûches, plaquettes, granulés ; rémanents après récolte (petites branches et les souches) ;
- produits et co-produits de l'agriculture : cultures à vocations initialement alimentaires (maïs, blé, colza, canne à sucre, palmier à huile) ; plantations à vocation énergétique comme les taillis à courte rotation (saules, miscanthus) ; résidus agricoles (pailles, sarments, bois de taille, cannes de maïs) ;
- effluents d'élevage : fumiers, lisiers ;
- sous-produits de l'industrie et de la filière déchets : déchets des industries de transformation du bois (écorces, copeaux, sciure, boues issues de la pâte à papier, liqueur noire) ; déchets des industries

C'est sous le volet « *source d'énergie* », et en particulier « **source non fossile renouvelable d'énergie** », que la biomasse est considérée dans la législation française, au même article du code de l'énergie précité :

« L'énergie produite à partir de sources renouvelables, ou "énergie renouvelable", est **une énergie produite à partir de sources non fossiles renouvelables, à savoir** l'énergie éolienne, l'énergie solaire thermique ou photovoltaïque, l'énergie géothermique, l'énergie ambiante, l'énergie marémotrice, houlomotrice et les autres énergies marines, l'énergie hydroélectrique, **la biomasse**, les gaz de décharge, les gaz des stations d'épuration d'eaux usées et le biogaz.
 [...] La biomasse est la fraction biodégradable [...] ».

Pour autant, la catégorie « *biomasse* », riche de la diversité de son contenu, ne se réduit pas aux seules sources d'énergie. **Certaines biomasses sont utilisées pour d'autres fonctions**, notamment l'alimentation ou la construction :



Source : France Stratégie

La partie 2 de ce chapitre sera centrée sur la présentation de quelques biomasses, leur caractéristique, leur localisation, leurs usages actuels et potentiels.

1.3.2. Une biomasse renouvelable ... mais pas nécessairement neutre

- Une absorption nette soumise à un cycle

De par sa genèse, **la biomasse contient du carbone** : selon l'usage qui sera fait de cette biomasse, **ce carbone reviendra tôt ou tard, en totalité ou en partie, dans l'atmosphère**. L'originalité de la biomasse, notamment par comparaison aux matériaux carbonés issus de sources fossiles (charbon, pétrole, gaz), tient au fait que **sa source est renouvelable à l'échelle humaine**.

Les plantes absorbent du CO₂ lors de leur croissance. Ainsi, du carbone est séquestré dans la biomasse (sous forme de bois, de feuille, etc.) et dans le sol (carbone organique). Les plantes sont

-
- agroalimentaires (bagasse, marc de raisin, de café, pulpes, pépins, drèches) ; boues de stations d'épuration ;
 - déchets ménagers, etc.

récoltées ou meurent naturellement. L'immense majorité du carbone contenu dans ces plantes **retourne un jour ou l'autre à l'atmosphère et participe ainsi au cycle du carbone**. À l'issue de la récolte, le carbone est rendu à l'atmosphère, soit rapidement et directement (lors d'un brûlage), soit indirectement et plus lentement (par décomposition par exemple), et ce, même s'il est temporairement stocké sous forme de matériau. Selon la forme que prendra le carbone rendu à l'atmosphère (CO₂, méthane, protoxyde d'azote), ce cycle peut cependant avoir une contribution néfaste sur l'effet de serre.

- Renouvelable n'est pas équivalent à neutre

Pour être concret, prenons l'illustration d'une **forêt**, de la récolte de son **bois** et de la **combustion** de cette **biomasse** à des fins énergétiques. Le bois est **une énergie renouvelable** : après exploitation (récolte de bois) d'une forêt, l'énergie que contient ce bois peut, sous certaines conditions, **se reconstituer dans un temps relativement limité** (replantation et croissance forestière soit une échelle de temps tout de même supérieure à 20 ans).

Néanmoins, **la biomasse n'est pas forcément renouvelée dans tous les cas** (par exemple, si la déforestation est suivie d'un changement d'usage des terres comme une artificialisation). Par ailleurs, une combustion de la biomasse récoltée **ne garantit nullement l'absorption simultanée d'une quantité équivalente de CO₂**, condition d'une **neutralité**. Il faut plusieurs décennies, *a minima*, pour que les forêts se régénèrent et absorbent à nouveau le CO₂ qui a été relâché lors de la combustion. Cette **différence de temporalité entre absorption et émission** invite à relativiser la notion de neutralité.

Si l'utilisation de biomasse énergie (sous forme de bûches, pellets, plaquettes, résidus de cultures, etc.) est généralement associée à l'idée de facteur d'émission zéro, comme c'est le cas dans les déclarations d'émission des sites industriels dans le cadre du Système européen d'échange de quotas d'émissions (SEQUE), cela ne signifie pas que l'usage de biomasse est intrinsèquement neutre en carbone, mais que **son usage est favorisé en considérant qu'il s'agit d'une ressource susceptible d'être renouvelée et donc d'absorber du CO₂**. L'application d'un facteur d'émission CO₂ égal à 0¹³ pour la biomasse dans le cadre du SEQUE n'est possible qu'à condition de respecter des critères de durabilité.

La biomasse est souvent évoquée en tant que substitut **aux ressources fossiles** (pétrole, charbon, gaz) pour **son caractère renouvelable** : pourtant, sauf pour la biomasse à cycle carbone court (cf. partie 2.2), cela répond surtout à **des objectifs de moindre dépendance** aux hydrocarbures. La question qui se pose est **d'identifier dans quelle mesure son usage contribue aussi, ou non, à répondre à un objectif de neutralité carbone**. Ce sujet de contribution à l'objectif de neutralité carbone est identifié par la Directive européenne sur les énergies renouvelables, transposée en France dans le code de l'énergie, qui définit des critères précis de durabilité et de réduction de GES pour la biomasse.

¹³ Le SEQUE repose en effet sur le principe de considérer les émissions en scope 3.

1.3.3. Quelle méthode de comptabilisation pour les biomasses ?

La mesure de la comptabilisation des flux (absorptions et émissions) de CO₂ constitue un enjeu dans le cadre des politiques publiques de **neutralité carbone**. Ces mesures et cette comptabilisation s'appliquent dans tous les domaines d'activités concernés, y compris ceux relatifs à la biomasse. Étant donné **les caractéristiques de la biomasse** (renouvelable mais non neutre), comment est appréhendé le calcul de la neutralité ?

Chaque année, le Citepa réalise pour le compte du Gouvernement **l'inventaire national des émissions de gaz à effet de serre** qui permet de mesurer l'avancement des engagements d'atténuation du réchauffement climatique. L'inventaire national réalisé par le Citepa appréhende la problématique de la façon suivante :

Les **absorptions naturelles de CO₂** (*via* la photosynthèse des végétaux) sont prises en compte dans l'inventaire national, au travers de la mesure de la croissance (superficie, volume) des formations végétales.

Les **émissions de CO₂ issues de la biomasse** (récoltée, carbone rendu à l'atmosphère soit rapidement et directement lors d'un brûlage, soit indirectement et plus lentement par décomposition), même si le carbone est temporairement stocké sous forme de matériaux, sont aussi prises en compte dans l'inventaire national.

Pour la biomasse de cycle long (bois), l'inventaire comptabilise une perte de carbone du compartiment « *biomasse* ». Cette émission peut être comptabilisée l'année de la récolte ou bien quelques années plus tard du fait de la prise en compte de la durée de vie des produits bois. Par ailleurs, la croissance des arbres est aussi comptabilisée dans l'inventaire, tout comme la mortalité des arbres. L'ensemble de ces flux, qu'il s'agisse d'**absorptions de CO₂** (gain de carbone dans la biomasse) ou d'**émissions de CO₂** (perte de carbone par prélèvement de bois, mortalité, feux de forêt, etc.), sont **comptabilisés dans le secteur « Utilisation des Terres, Changements d'Affectation des Terres et Forêt » (UTCATF)**. Les émissions de « *CO₂ biomasse* » sont aussi présentées dans « *SECTEN* »¹⁴ au niveau du secteur consommateur uniquement pour information et ne doivent pas être sommées aux autres émissions au risque de générer un double comptage. En revanche, les émissions autres que le CO₂ générées lors du brûlage (CH₄, N₂O, polluants) sont bien **comptabilisées dans le secteur consommateur**.

Pour la biomasse de cycle court (biomasse hors bois), par exemple les pailles des céréales, les émissions de CO₂ sont supposées **compensées par la croissance des plantes à l'échelle de l'année**. Si les pailles sont brûlées, le carbone est libéré par la combustion. Si elles ne sont pas brûlées, le carbone est également libéré rapidement après dégradation de la paille ou consommation par les animaux. Dans tous ces cas, il est **considéré dans l'inventaire que le bilan annuel entre absorptions et émissions est égal à zéro** et ne fait donc pas l'objet d'estimations chiffrées.

1.3.4. Les objectifs de la SNBC-2 à l'horizon 2050

La SNBC-2 vise à un renforcement du stockage de carbone dans des produits bois à longue durée de vie, une réduction de l'artificialisation des terres et un renforcement du stockage de carbone dans les sols agricoles, de manière à arriver, en 2050, pour la neutralité carbone, à un puits UTCATF,

¹⁴ La logique du SECTEN est de considérer que, si la forêt est en expansion (comme cela est actuellement le cas en France), alors l'usage du bois est neutre en carbone (en France) : le flux est considéré en instantané, prenant en compte la simultanéité de la coupe quelque part et de la pousse ailleurs. Il s'agit ainsi d'une forme de neutralité dans le temps (mais pas dans l'espace).

complété par des puits artificiels (Captage et Stockage de CO₂) afin de compenser intégralement les émissions résiduelles des autres secteurs.

En termes quantitatifs, **les objectifs de la SNBC-2 à 2050 sont les suivants pour la biomasse :**

Objectif pour le niveau total d'émissions : 80 MtCO_{2 eq}

Objectif pour **les absorptions (puits) de carbone : 80 Mt CO_{2 eq}**, dont :

- **Forêt : 35 MtCO_{2 eq}**
- **Produits bois : 20 MtCO_{2 eq}**
- **Autres terres : 11 MtCO_{2 eq}**

Objectif pour la **production d'énergie issue de la biomasse : 450 TWh_{PCS}** de ressources brutes (pour 180 TWh_{PCS} actuellement), dont :

- 250 TWh issus de la biomasse agricole
- 100 TWh issus de la biomasse forestière
- 100 TWh issus de déchets

Il est à noter que ces objectifs ont été considérés comme trop optimistes par de nombreux rapports avec des potentiels de production d'énergie allant de 386 à 270 TWh¹⁵.

1.3.5. Une source d'énergie à densité limitée

Il importe de noter à ce stade que l'une des caractéristiques de la biomasse est sa faible **densité énergétique** : produit issu du vivant, **sa composition en eau est importante**. Afin que le consommateur et usager puisse bénéficier d'une source d'énergie immédiatement disponible, **un certain nombre d'opérations de traitement** sont nécessaires (notamment le séchage préalable du bois, afin d'augmenter son pouvoir calorifique), ainsi que **son transport** (du site de collecte vers un site de transformation), ce qui mobilise de l'énergie (d'autant plus au regard de la proportion d'eau).

1.4. Les principaux messages

À l'issue de cette première partie, la présentation pas-à-pas des différentes notions mobilisées par le thème « **biomasse et neutralité carbone** » a permis de caractériser en quoi cette ressource, en tant que matériau carboné, renouvelable et neutre ou non selon le type de biomasse, constitue un **élément particulièrement central, sensible et prometteur de la mise en œuvre de la politique publique nationale visant à répondre à l'urgence écologique et climatique**.

Le bilan carbone en France	en 2021 :	objectif 2050 :
Absorptions :	14 MtCO _{2eq}	80 MtCO _{2eq}
Émissions :	418 MtCO _{2eq}	80 MtCO _{2eq}
Les biomasses : sources d'énergies, mais aussi d'alimentation, matériau de construction		
Renouvelable avec des pas de temps variables, et dont le bilan carbone à court-terme dépend du type de biomasse (pas nécessairement neutre sur le court terme et cela d'autant plus que les effets du changement climatique se feront ressentir en diminuant les rendements en biomasse).		

¹⁵ Sources : <https://transitions2050.ademe.fr/>
<https://afterres2050.solagro.org/wp-content/uploads/2015/11/Afterres2050-Web.pdf>
https://negawatt.org/IMG/pdf/211026_diaporama_scenario-negawatt_2022.pdf

Biomasse : un réel potentiel pour la transition énergétique ? WWF, Janvier 2022.

Biomasse agricole : quelles ressources pour quel potentiel ? France Stratégie, Juillet 2021.

2. LES PRINCIPALES BIOMASSES : CARACTÉRISTIQUES, USAGES, POTENTIELS

Les biomasses sont de **natures** et d'**origines** très **diverses**, chaque type étant caractérisé par sa saisonnalité et sa durée de conservation, et ouvrant sur des **usages** différents. Un état des lieux récent¹⁶ indique qu'en France, la biomasse (hors usages alimentaires) correspond à 50 millions de tonnes de matière sèche, qui se répartissent ainsi :

- par **type de biomasses** : forêt à 53 % ; végétales hors forêt à 43,5 % ; animales 2,9 % ; autres (déchets, ordures ménagères, boues, industrie agro-alimentaire, issues de silos) à 0,4 % ;
- par **usages** : combustion à 44,6 % ; produits bois (sciage, panneaux, pâte) et produits biosourcés à 21,4 % ; biocarburants à 20,3 % ; exports/autres à 8,9 % ; méthanisation à 4,6 %.

À la différence des ressources fossiles, les biomasses ne sont pas présentes sous forme de gisements homogènes, mais **résultent d'activités productives**, soit directement (cultures dédiées) soit indirectement (résidus, sous-produits, déchets). La question de **la disponibilité** d'une biomasse donnée renvoie à la question du développement et de la soutenabilité du **système économique afférent à sa production**. Facteur additionnel de complexité, certaines biomasses ont **plusieurs usages possibles**, de l'alimentation, à la fourniture de matériaux et de molécules pour l'énergie ou la chimie, les usages en cascade étant possibles également.

Les **conditions de mobilisation** d'une biomasse donnée sont subordonnées aux **conditions de sa production**. Ainsi, pour chacune, il importe d'**identifier** et de **localiser** cette ressource, d'estimer la proportion **actuellement mobilisée** et la **part potentiellement mobilisable** à l'horizon 2050. Et, surtout, selon un cahier des charges, de préserver la durabilité du couvert végétal, source vivante de biomasse jouant un rôle de puits de carbone.

Cette 2^{ème} partie du rapport est recentrée **sur 3 principaux types de biomasse** : les biomasses végétales à cycle long (issues des forêts et de la sylviculture), les biomasses végétales à cycle court (issues des activités agricoles), et les biomasses non-végétales (issues des élevages, déchets urbains, domestiques et industriels). Ces biomasses retiennent notre attention eu égard au volume de carbone qu'elles contiennent et des attentes exprimées dans la SNBC. Nous les distinguons selon **2 grandes caractéristiques** : selon qu'elles **ont pour source un puits de carbone** (pour les biomasses végétales, qu'elles soient d'origine forestière ou de l'agriculture) ou non (pour les biomasses non-végétales), et selon **leur périodicité de renouvellement** (longue pour le bois, courte pour les autres biomasses).

La partie 2 est ainsi structurée :

- 2.1 Les biomasses végétales à cycle long
- 2.2 Les biomasses végétales à cycle court
- 2.3 Les biomasses non végétales
- 2.4 Un usage combiné de plusieurs biomasses : exemple de la méthanisation
- 2.5 Les principaux enjeux liés à la mobilisation des biomasses

2.1. Les biomasses végétales à cycle long

Les principales caractéristiques de ces biomasses :

- sont prélevées sur un puits de carbone ;
- sont renouvelées très lentement (de 20 ans à plus de 100 ans) ;
- ont principalement 2 usages : un non-énergétique (produit-bois) et un énergétique.

¹⁶ Source : Ademe, 2022, Rapport Transitions 2050.

2.1.1. La forêt française, un puits de carbone majeur en expansion

La forêt française constitue une importante source de biomasse. Couvrant 17 millions d'hectares, soit 31 % du territoire, la superficie de la forêt métropolitaine a doublé depuis 1850, continuant à croître à un rythme moyen de **85 000 hectares par an** depuis 1985, soit l'équivalent de trois forêts de Fontainebleau chaque année.

Les **trois quarts des forêts** métropolitaines sont détenus par des **propriétaires privés**¹⁷ ; l'État et les collectivités locales se partagent le quart restant. La forêt privée est **très fragmentée** : 3,5 millions de propriétaires possèdent en moyenne 2,6 ha, dont 2,6 millions moins de 1 ha. Ce morcellement est le résultat du partage des héritages comme le permet le code civil napoléonien depuis les origines. Pour donner une cohérence à la gestion de cet ensemble, les centres régionaux de la propriété forestière (CRPF) fournissent des conseils techniques et juridiques, et veillent à ce que des plans simples de gestion soient définis et mis en œuvre. Pour lutter contre ce morcellement, les coopératives forestières et des outils de gestion numérique permettent de regrouper les propriétaires afin de les accompagner dans la gestion durable de leurs forêts.

La **production biologique annuelle de bois** en volume des arbres vifs s'élève pour la France à un peu plus de **90 millions de mètres cubes** en moyenne sur la période 2009-2017¹⁸. L'écosystème forestier **stocke** à lui seul environ **88 MtCO₂eq/an** (56 MtCO₂eq/an pour les feuillus, 14 MtCO₂eq/an, pour les résineux)¹⁹. Un arbre de 5 m³ peut absorber l'équivalent de 5 tonnes de CO₂²⁰.

2.1.2. 3 types de productions pour 2 principaux usages : produit-bois et énergie

Trois types de productions de bois doivent être distingués, selon la taille des produits récoltés et selon l'usage qui en résulte : le bois d'œuvre, le bois d'industrie et le bois énergie.

Le **bois d'œuvre** (BO) présente une qualité suffisante pour être exploité par sciage, tranchage, déroulage ou fendage et autres usages « nobles » de la filière. La qualification se fait à partir de mesures du diamètre de l'arbre et de la longueur de son fût, et de sa qualité intrinsèque (bois sain, sans singularité entravant la transformation) selon les attentes actuelles du marché pour le bois d'œuvre. Après transformation, ces bois servent en charpente, construction, menuiserie, ameublement, caisserie.

En forêt, le bois d'industrie (BI) et le bois énergie (BE) désignent à peu près le même type de ressource que le BO, valorisable pour sa matière (BI) ou pour son pouvoir calorifique à la combustion (BE). Outre sa composante forestière (bois rond dont menus bois, plaquettes forestières), ces ressources sont également composées de produits connexes de scieries et de bois recyclé.

Le bois d'industrie est en général de petite dimension, inutilisable en BO, mais pouvant être valorisé selon d'autres destinations industrielles (panneaux de particules, papier et carton, chimie verte, etc.). Le BI est pour l'essentiel constitué soit de ressources issues de l'exploitation sylvicole, ainsi que des petits arbres prélevés dans les coupes d'éclaircies ou d'améliorations de taillis simples et sous futaie (marginale de taillis à courte rotation), soit de produits connexes de scierie (dosses, délignures, plaquettes, sciures).

¹⁷ La surface de la forêt privée française est la plus importante en Métropole avec un peu plus de 12 millions d'ha, soit presque trois quart de la surface forestière (75 %), et 71 % du volume sur pied (1,7 milliard de m³). La forêt privée est beaucoup moins importante dans les collectivités d'outre-mer, voire marginale comme en Guyane où les forêts cédées par l'État aux particuliers le sont essentiellement en vue de valorisation agricole.

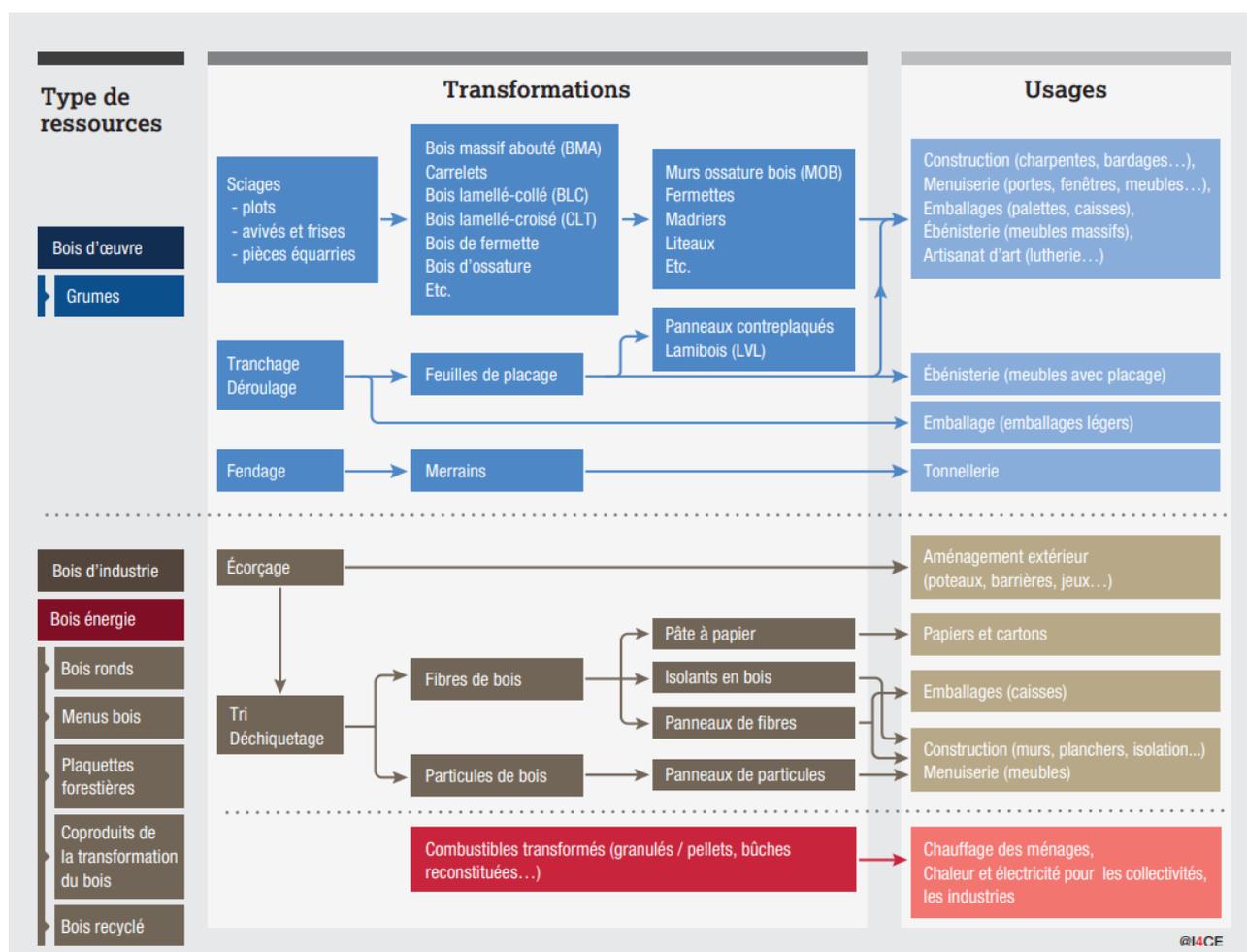
¹⁸ Sources : IGN 2019 ; Inventaire forestier national, 2019.

¹⁹ Source : INRAE, 2017.

²⁰ Source : ONF, 2019.

Le bois énergie est destiné à la production d'énergie (de façon dominante par combustion), permettant de valoriser les co-produits des opérations sylvicoles, des filières de transformation (produits connexes de scieries, etc.), ainsi que des filières de recyclage des usagés ou rebuts de la construction, de la grande distribution ou de l'industrie (charpentes, palettes, etc.).

En 2019²¹, **20 Mm³ de bois d'œuvre ont été récoltés et commercialisés** en France métropolitaine, hors produits accidentels et sanitaires. **10,5 Mm³ de bois d'industrie et 8,1 Mm³ de bois énergie ont été récoltés**, auxquels il faut rajouter l'autoconsommation des ménages par prélèvement direct dans les forêts, estimée à environ 13 à 15 Mm³ par an²².



Source : I4CE

Bois d'œuvre, bois d'industrie et bois-énergie sont complémentaires, en permettant la valorisation de toutes les ressources, quelle que soit leur qualité.

2.1.3. Les produits bois combinent un effet de stockage et un effet de substitution

Les produits bois (BO et BI), prélevés du puits naturel qu'est la forêt, **ne contribuent plus à l'absorption** du CO₂ atmosphérique. D'un autre côté, ces produits, en tant que matériaux, **n'émettent pas non plus** de CO₂ dans l'atmosphère, du moins tant qu'ils ne sont pas consommés soit par accident (incendie) soit par valorisation en fin de cycle de vie (production d'énergie). BO et

²¹ Source : Agreste (Ministère de l'Agriculture), Enquêtes annuelles de branche (EAB), 2019.

²² Source : Ademe, 2021.

BI font l'objet d'une attention particulière dans les scénarios en vue de la neutralité carbone eu égard à leur contribution à :

- **l'effet de stockage** : les produits bois stockent en leur sein du carbone issu de l'atmosphère. Si l'on parvient à réorienter du bois d'énergie vers du bois d'industrie (voire du bois d'œuvre), on retarde le moment où ce bois sera consommé et où du CO₂ sera émis dans l'atmosphère. En cela, ce stockage permet de réduire, en les retardant, les émissions de CO₂ dans l'atmosphère ;
- **l'effet de substitution** : les produits bois, dans la plupart des cas, nécessitent moins d'émission de CO₂ pour les activités relatives à leur élaboration que d'autres matériaux à fonction similaire. Ce comparatif vaut notamment pour les maisons en béton relativement à celles élaborées en bois.

La production de bois d'œuvre pour **la construction ou l'ameublement** constitue la finalité première de l'exploitation des forêts et présente donc une capacité importante de stockage et de substitution. Ces bénéfices dans la lutte climatique impliquent cependant un coût lié aux opérations sylvicoles requises et surtout impliquent un cycle étendu sur une période très longue (plusieurs décennies).

Le bois d'industrie offre également des capacités de stockage et de substitution réelles tout en induisant un coût moins élevé, car il correspond à un sous-produit de la sylviculture et il est mobilisable selon des périodicités plus courtes (coupes régulières d'éclaircies).

2.1.4. Questions sur les usages énergétiques du bois

- Les principales valorisations énergétiques du bois : chaleur, électricité, biocarburants

La dénomination « *bois-énergie* » désigne l'utilisation de la ressource comme combustible pour produire de la chaleur, de l'électricité ou du biocarburant de 2^{ème} génération (après transformation). Plus récemment, des projets visent à produire, par pyrogazéification du gaz injectable sur les réseaux. Le bois-énergie se présente sous trois formes principales : la bûche ou rondin ; la plaquette forestière ou industrielle ; les granulés.

Chauffage : en 2020 en France, la chaleur totale représentait 45 % des consommations finales d'énergie²³ et était encore fortement dépendante des énergies fossiles (67 % du mix moyen). La France est le premier pays européen consommateur de bois de chauffage. Le bois bûche est principalement utilisé par les particuliers ; de nouveaux produits sont émergent, comme la plaquette forestière et les granulés bois (pellets), qui présentent une meilleure efficacité énergétique et un plus grand confort d'utilisation²⁴. En plus des particuliers, le bois énergie est également consommé par des collectivités (réseaux de chaleur dans les communes pour le chauffage des bâtiments publics, établissements d'enseignement, etc.) ou pour certains usages industriels (également pour la production de chaleur). En 2021, la place de la biomasse dans le mix énergétique des réseaux de chaleur s'établissait en moyenne à 18,7 TWh (soit 24 % du mix moyen)²⁵.

²³ Source : Carbone 4, Chaleur renouvelable : la grande oubliée de la stratégie énergétique française (p. 4 et 9), Novembre 2022.

²⁴ Les bûches et rondins, généralement de 25 à 50 cm de long, constituent la forme la plus brute de l'exploitation du bois énergie. Elles servent au chauffage, mais présentent souvent un faible pouvoir calorifique en raison de leur humidité.

Les plaquettes forestières ou industrielles sont des composites de quelques cm³ de bois déchiqueté. Elles sont produites à partir de résidus forestiers (branches, bois d'élagage, etc.) qui sont secs, ce qui permet d'obtenir un meilleur pouvoir calorifique de combustible.

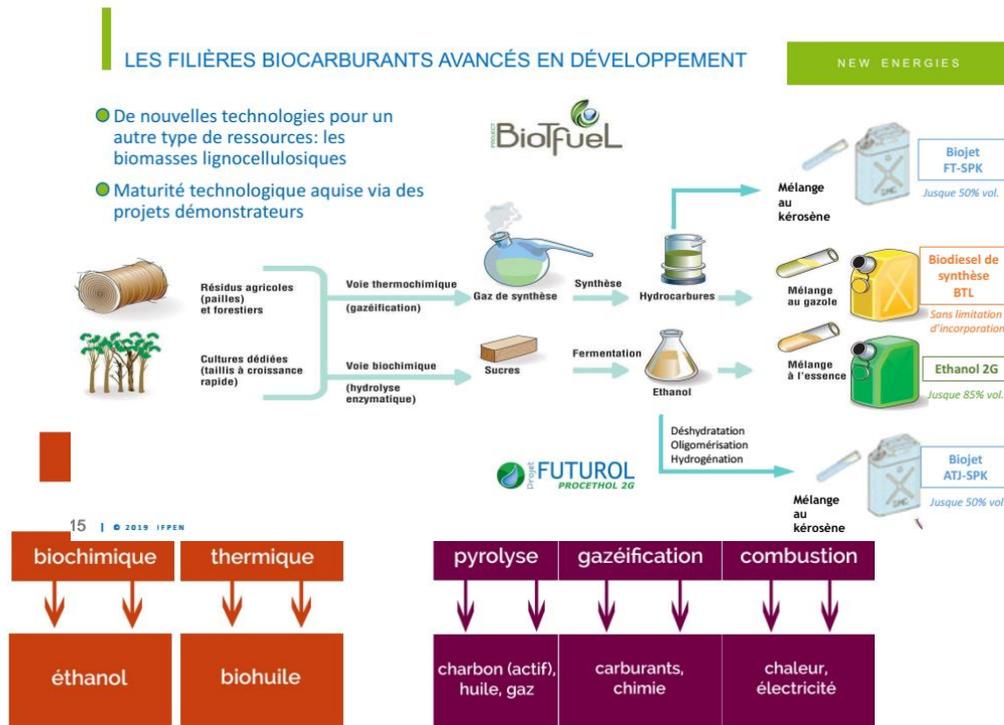
Les granulés (ou « *pellets* ») sont des cylindres de 1 à 3 cm de long constitués de copeaux ou de sciure de compactée. Leur taux d'humidité est très faible, autour de 10 %.

²⁵ Source : FEDENE, Enquête annuel des réseaux de chaleur et de froid, Édition 2022, Homologuée par le Service des données et études statistiques (SDES).

Électricité : en chauffant de l'eau, la vapeur engendrée mise sous pression fait tourner des turbo-alternateurs produisant de l'électricité, ainsi que de la chaleur qui est récupérée, offrant par cette cogénération un haut rendement énergétique.

Biocarburants : le bois est composé essentiellement de trois types de molécules organiques : la cellulose, l'hémicellulose et la lignine. Par un procédé d'hydrolyse, la cellulose est transformable en glucose, puis fermentable en éthanol constituant un biocarburant de 2^{ème} génération.

D'autres voies existent également (dont le biogaz) et sont indiquées dans le schéma, ci-dessous.



Source : IFPEN

▪ Quels usages efficaces ? Aperçu du cahier des charges

Le pouvoir calorifique d'un combustible désigne la quantité de chaleur susceptible d'être extraite par unité de masse. Dans le cas du bois, ce pouvoir calorifique dépend essentiellement du taux d'humidité. Le bois présent dans la nature contient 40 à 60 % d'eau (rehaussant d'autant le coût de son transport). Pour une bonne combustion, ce taux doit être ramené à moins de 25 %. Il est possible de faire sécher le bois de deux façons : soit par séchage naturel, processus de 6 mois à 2 ans permettant d'obtenir un taux d'humidité dans le bois de 15 à 25 % ; soit par séchage artificiel, processus plus coûteux mais beaucoup plus rapide (de 7 à 15 fois) et plus efficace (taux final ramené à 10 % au plus). Ce séchage est réalisé avec de l'air climatisé ou par déshumidification du local de séchage.

Concernant l'objectif de la neutralité carbone, le bilan dépend de nombreux facteurs : l'efficacité énergétique du bois, les alternatives énergétiques, les émissions associées à leurs chaînes de production respective (en intégrant les émissions/absorptions de gaz à effet de serre générés sur les surfaces exploitées, le transport), etc. À l'échelle de temps immédiat qui est celui de l'activité de

la combustion²⁶, il n'est pas communément admis que la concentration du CO₂ présent dans les émissions issues de la combustion du bois (CO₂ biogénique) soit moindre que dans celles issues des ressources fossiles, à production d'énergie égale.

Outre les interrogations qui se posent sur l'opportunité de la combustion de bois, d'autres éléments sont à prendre en compte dans le bilan carbone des activités relatives à la production et l'usage de bois énergie :

- les arbres étant coupés pour la récolte de bois, ce prélèvement ampute l'activité naturelle d'absorption du carbone de l'atmosphère. Il s'agit d'une **suppression du puits** pendant une durée longue, le temps que l'écosystème naturel soit reconstitué et puisse absorber à nouveau du CO₂ atmosphérique ;
- l'extraction du bois génère une **perturbation de l'environnement direct** (sols, écosystème forestier) : les émissions indirectes en provenance de la récolte de biomasse forestière (l'érosion, la décomposition accélérée, etc.) réduisent les réservoirs forestiers de carbone, tandis que les pertes en nutriments et en matière organique ralentissent la régénération ;
- des **émissions de CO₂** sont générées lors de la récolte et du transport du bois qui nécessitent de l'énergie pour extraire, transformer, sécher et transporter cette biomasse, ce qui ajoute à l'empreinte climatique globale de la bioénergie forestière ;
- le chauffage (surtout individuel) au bois a un impact important sur les émissions de particules fines et la qualité de l'air en général même si les rendements de combustion se sont fortement améliorés.

L'un des principaux arguments mis en avant pour promouvoir le bois-énergie est le caractère renouvelable de cette ressource ; ce qui implique de considérer le **temps nécessaire pour ce renouvellement**. On ne devrait, en toute rigueur, parler de neutralité carbone que si dans le même temps cette activité générerait à un horizon court, un captage équivalent de CO₂. Or, ce n'est pas systématiquement le cas. Si cette **condition de neutralité** est remplie pour la biomasse de cycle court, la problématique est plus complexe pour le bois (cycles longs) : **les stocks de bois** présents dans les arbres des forêts sont **le résultat de décennies voire de siècles de croissance des arbres**. Dès lors que couper ces arbres est une opération instantanée, il peut en résulter un **déséquilibre entre croissance et prélèvement**. Pour que la production de bois énergie ait une plus-value carbone, il convient que l'une ou l'autre de ces conditions soit remplie : soit l'espace libéré laisse place à une formation avec des stocks de carbone à l'hectare plus élevés à terme ; soit la récolte permet d'anticiper un phénomène de saturation de la forêt (voire de détérioration) et par conséquent d'entretenir la pompe à carbone ; soit la capacité d'absorption pourra être maintenue à la condition qu'il y ait bien (mais pas nécessairement sur le site du prélèvement) une régénération de la forêt²⁷, tout en conservant voire en renforçant, par stockage, le carbone prélevé sur la zone de prélèvement²⁸, par exemple par une utilisation en usage énergie des co-produits du bois (bois B, etc.), ce qui est également le cas en France.

Les précédentes observations ne condamnent pas pour autant l'utilisation du bois pour la production d'énergie. La question se pose différemment si le **type de bois considéré constitue la finalité de la production ou s'il en est un co-produit**. Une bonne partie du bois énergie actuellement consommé en France correspond à un co-produit de la production de bois matériau. Dans ce cas,

²⁶ À l'inverse d'une approche qui consiste à se placer à une échelle de temps long : si l'énergie par unité de carbone contenue dans le bois est plus faible que pour le charbon, la combustion du bois émet du CO₂ qui a été absorbé par les arbres en croissance durant quelques décennies, là où la combustion du charbon déstocke du CO₂ enfoui pendant des millions d'années.

²⁷ Condition qui est actuellement remplie en France, mais avec des limites et incertitudes – cf. partie 2.1.6.

²⁸ Ces deux conditions – régénération et maintien des stocks de carbone – font partie des critères de durabilité rendus obligatoires par la Directive relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables dite « REDII » pour des installations de combustion d'une puissance thermique nominale supérieure à 20 MW (cf. article 29.6.a) ii) et l'article 29.7. de la directive REDII).

la **valorisation énergétique** des bois issus d'éclaircies ou de déchets de scierie trouve sa pertinence dès lors qu'il s'agit de **coproduits de l'activité sylvicole**.

2.1.5. Les enjeux d'articulation et de réorientation des productions

Il ressort des observations précédentes que, pour optimiser la valeur ajoutée du matériau selon ses usages, le bois d'œuvre est le premier niveau d'utilisation en termes économiques, de recherche de la neutralité carbone et de développement durable. Autant que possible, il conviendrait ainsi d'exploiter en premier lieu le bois pour ses atouts comme matériau, avant une éventuelle valorisation énergétique en fin de vie, en prenant en considération l'intérêt d'un **usage en cascade**.

Mais, par ailleurs, **la nécessité de privilégier certains usages pourrait s'imposer** : dans la SNBC, une part croissante de la récolte est dédiée aux usages dits « *longs* », au détriment des usages « *courts* » que sont notamment l'emballage et le papier. Le potentiel de réorientation concerne autant le bois d'œuvre, que les bois industrie ou énergie. Cette réorientation passe tant par **l'optimisation de la valorisation de la ressource de type bois d'œuvre** (en limitant les usages courts comme les emballages) que **l'affectation des ressources de type bois industrie/bois énergie en priorité aux usages longs** (par exemple les panneaux). Une étude récente²⁹ montre que l'augmentation de la valorisation en bois d'œuvre est techniquement difficile à court terme, mais pourrait concerner des volumes conséquents, tandis qu'il n'y a pas d'obstacle technique majeur à la réorientation du bois d'industrie et bois énergie, impliquant également d'importants volumes de panneaux et d'isolants.

En ce qui concerne le **bois d'œuvre**, la marge de réorientation porte principalement sur une meilleure valorisation du feuillu et des ressources de faibles diamètres et qualités, pour un potentiel **évalué à 8 Mm³/an**. Les marges de manœuvre à court terme sont limitées en raison d'obstacles technico-économiques, mais pourrait se concrétiser plutôt à échéance d'une dizaine d'années.

Cette étude montre enfin que la voie la plus prometteuse à court terme repose sur le **développement de la filière des panneaux et des isolants dérivés du bois**, d'ores et déjà matures : les 5 Mm³ actuellement produits pourraient ouvrir sur un **potentiel compris entre 20 et 35 Mm³ par an**. Cela requiert d'**améliorer leur compétitivité face aux** plâtres, bétons et laines de verre, *etc.*, et cela de telle sorte que ce type de valorisation soit préférable à l'usage énergétique pour les exploitants. Il conviendrait aussi d'étudier plus finement le potentiel d'accroissement de la part de la ressource dédiée au **bois d'ingénierie** (produits dérivés du bois : bois massif abouté issus de pièces de bois massif assemblées dans la longueur, emboîtées et collées bout à bout ; contreplaqué ; bois lamellé-croisé ou lamellé-collé).

Par ailleurs, mieux valoriser la ressource nationale et réduire le recours à du bois importé impliquera **des investissements** matériels dans ces filières en France, notamment au niveau des industries de transformation. Cette évolution nécessitera également un investissement en formation afin de rendre plus attractives les filières forêts-bois.

²⁹ Source : IC4E, Réorienter les usages du bois pour améliorer le puits de carbone : sur quels produits miser en priorité ? 2022.

2.1.6. Les enjeux de préservation et de reconstitution de la source de ces biomasses

▪ L'appauvrissement des sols et la fragilité des écosystèmes forestiers

Les sols forestiers participent significativement du stockage du carbone dans le compartiment terrestre³⁰ : près de 3,5 Giga tonnes de carbone organique sont stockées dans les 30 premiers centimètres de sol, ce qui correspond à l'équivalent de plus de 13 Giga tonnes de CO₂ atmosphérique. Le potentiel de stockage forestier est de 81 tonnes de carbone à l'hectare (par comparaison, les prairies présentent un potentiel de 84 tonnes/ha, les grandes cultures de 51 tonnes/ha). Toutefois, les sols forestiers se caractérisent par leur relative pauvreté : ils ne sont fertilisés que par l'altération très lente des roches mères, avec des risques d'appauvrissement selon les méthodes d'exploitation. La **récolte du bois** en forêt a pour conséquence de prélever et exporter de la matière organique, ce qui affecte la faune du sol (insectes, vers de terre, microorganismes, etc.). Des études et guides techniques permettent de promouvoir certaines pratiques afin d'exploiter au mieux la biomasse sans ces effets négatifs.

Le stockage dans les sols ne peut se faire que sur du long terme, temps nécessaire pour observer une différence de teneur en matière organique dans un sol³¹. Si le potentiel d'accroissement de ce stockage est (pour ces mêmes raisons) limité, en revanche il y a un risque d'affecter ce réservoir si les pratiques de prélèvement en forêt sont inadaptées. L'enjeu est ainsi d'assurer **la durabilité des sols** forestiers et, plus globalement, **de l'ensemble de l'écosystème** (incluant la qualité de l'eau, la biodiversité, etc.).

▪ La sensibilité de la forêt aux chocs conjoncturels et évolutions tendancielle

Le puits de carbone forestier est sensible à **des événements ponctuels** (tempêtes, incendies, maladies), et à des **évolutions structurelles**, notamment le changement climatique dans ses diverses traductions.

Les recensements forestiers révèlent, depuis les années 2010, deux **tendances de fonds dues au changement climatique** : une **moindre croissance arbres**, et une **plus forte mortalité**³². Le réchauffement modifie le cycle annuel de développement des arbres se traduisant notamment par un allongement de la saison de végétation (implique une exposition au gel et aux attaques parasites), une chute de productivité (notamment pour des essences telles que le chêne vert et le pin d'Alep), un changement de la distribution des espèces et de leur répartition géographique (une progression vers le Nord des essences méditerranéennes), une recrudescence des insectes ravageurs, des maladies et des champignons (ayant pour conséquences un affaiblissement de l'arbre, une limitation de la croissance, et une mortalité accrue).

Le bilan de ces effets combinés est une forte réduction du rôle de puits des forêts : estimé à environ – 50 Mt CO₂ dans les années 2000, **ce puits s'est considérablement réduit** en 2020 pour atteindre – 14 MtCO₂.

Ainsi, de nombreux indices alertent sur des évolutions plus rapides que ce qui avait été estimé auparavant sur les effets des dérèglements climatiques. La question se pose donc de **la prise en compte de ces évolutions** (dépérissements, changements d'essences, etc.) dans les pratiques de gestion, ainsi que de l'adaptation des politiques publiques, étant donné que certaines décisions prises dans cette décennie auront des répercussions dans 50 à 100 ans.

³⁰ Source : INRAE, 2022.

³¹ 5 ans au moins sont nécessaires pour observer une augmentation.

³² Ces phénomènes, mal estimés au moment de la SNBC 2, sont en cours de corrections dans l'élaboration de la SNBC 3 (correctifs relatifs à la mortalité et à la croissance) : il est ainsi observé un puits moins dynamique que ce qui avait été espéré.

▪ Les actions de préservation et de reconstitution du puits forestier

Faire porter les efforts sur la préservation et le développement du puits forestier procède à la fois des politiques publiques, des choix de gestion des propriétaires forestiers et des capacités d'adaptation de la filière.

Au niveau national, le Plan France Relance annoncé fin 2020 par le Gouvernement et mis en œuvre par le ministère en charge de l'agriculture promeut **le renouvellement forestier**, via une aide d'une enveloppe annuelle de 150 millions d'euros destinée à développer 3 types d'actions à destination des peuplements « *sinistrés* », des peuplements « *vulnérables* » et des peuplements « *pauvres* ». La politique forestière intègre les enjeux climatiques en considérant que la forêt doit être adaptée, mais aussi qu'elle est porteuse de solutions (notamment au niveau du puits carbone, de la substitution en matière d'énergie renouvelable, et des produits bois construction). Le « *cahier des charges* » est que le renouvellement forestier doit répondre aux objectifs d'adaptation, mais rester cohérent avec les objectifs de production du bois, au regard des débouchés industriels.

En termes de gestion, la principale difficulté tient au morcellement de la forêt française. Si 50 % de la forêt est constitué de propriétés privées de 6 ha en moyenne, il ne s'agit pas de surfaces isolées, mais de parcelles **fragmentées au sein d'un massif**. Les centres régionaux de la propriété forestière (CRPF) (déclinaisons locales du centre national de la propriété forestière (CNPF)) doivent accompagner le **regroupement des propriétés en unité de gestion**, dans une optique de rationalisation économique et environnementale. Les CRPF incitent à la **création de groupements forestiers familiaux** (lors de successions) et **incitent à la création d'associations syndicales**, c'est-à-dire des regroupements de propriétaires qui ont une vision commune de gestion (susceptibles de regrouper jusqu'à 800 ha). Cette logique permet de proposer dans le circuit technique ou économique des lots plus importants de bois. En outre, plus l'unité est grande, plus il est possible de promouvoir des gestions intégrant les différents enjeux : prévoir des zones réservées à des enjeux biodiversité, poursuivre des objectifs de valorisation paysagère, environnementale, climatique, d'accueil, de compensation, etc. En termes de gestion sylvicole, plusieurs orientations se dessinent : privilégier la diversité génétique, modifier les itinéraires sylvicoles voire changer d'essences, selon les prévisions de réchauffement climatique à horizon 2100.

Enfin, ces adaptations de la gestion sylvicole doivent s'accompagner d'une adaptation de l'organisation avale de la forêt, au niveau du traitement technique du bois, afin d'anticiper les modes de transformation du bois pour les décennies à venir, et d'adapter l'appareil de production en conséquence.

Synthèse du 2.1 – Les biomasses végétales à cycle long

Principaux avantages :

- les forêts constituent un important puits de carbone, absorbant le CO₂ atmosphérique ;
- la France dispose d'un potentiel important (superficie, volume) et en accroissement ;
- il s'agit de biomasses dont la production n'entre pas en concurrence avec l'alimentation humaine et animale ;
- les forêts permettent le stockage du carbone dans les produits bois : effet de retard à l'émission ;
- ces produits permettent une substitution avec des usages d'énergie fossile ;
- les modes de valorisation énergétique sont diversifiées : chauffage, cogénération, biocarburants, gazéification, ...

Principales limites :

- la récolte de cette biomasse impacte durablement le puits de CO₂, ainsi que les écosystèmes ;
- une longue période de reconstitution des stocks ;
- l'usage énergie est émetteur de CO₂ ;

- une sensibilité élevée et systémique aux perturbations climatiques (sécheresse, tempête, ravageurs) ;
- une difficulté à faire évoluer les pratiques de gestion des forêts (morcellement des propriétés) ;
- une difficulté pour l'industrie française à faire évoluer les filières de transformation ;
- une faible attractivité de la filière auprès des jeunes et une difficulté de recrutement.

2.2. Les biomasses végétales à cycle court

Les principales caractéristiques de ces biomasses :

- sont prélevées sur un puits de carbone ;
- sont renouvelées rapidement (dans l'année) ;
- sont produites selon une saisonnalité ;
- ont principalement 2 usages : un alimentaire et un énergétique.

Les biomasses végétales renouvelées rapidement s'entendent comme les produits des cultures dont le **renouvellement après récolte est de moins d'une année**. Il s'agit de biomasses issues de l'agriculture ou des prairies. La surface agricole utilisée française (SAU) est estimée à 28,6 millions d'hectares en 2019, soit 48 % du territoire métropolitain. Cette SAU se divise entre terres arables (17,9 Mha), cultures permanentes (1 Mha) et surfaces toujours en herbes (9,7 Mha).

Le **principal usage de ces cultures est l'alimentation** humaine et animale. Ces cultures remplissent également **d'autres fonctions** : agronomiques (retour au sol), énergétiques (chaleur, biogaz, électricité), chimiques (molécules, carburant, etc.) ou biomatériaux (bâtiment, textile, industrie). Ces **usages sont la plupart du temps combinés** pour une biomasse végétale donnée : par exemple, les résidus de cultures annuelles comme les pailles sont utilisés pour les besoins animaux (litières, alimentation), tout en assurant un retour au sol lors de la récolte (utilisation agronomique) ; ainsi que, dans certains cas, pour permettre un usage à des fins énergétiques (par combustion et pour la production de biogaz). Un autre exemple de ressources à usages multiples concerne les cultures annuelles (blé, maïs, colza, etc.) : leur usage principal est alimentaire, mais elles contribuent aussi à la production de biocarburants, de biogaz³³ et de matériaux biosourcés.

Concernant l'usage énergétique, la part de biomasse majoritairement agricole (biocarburants, biogaz) ne représente qu'environ 14 % de l'énergie renouvelable produite en France (44,8 TWh sur 340 TWh de production primaire d'énergie renouvelable en 2019), l'essentiel étant constitué par le bois-énergie (36 %)³⁴. Ces usages énergétiques sont de natures diverses et peuvent se répartir ainsi : les cultures dédiées à la production d'énergie, les résidus issus des cultures à vocation alimentaire et les cultures intermédiaires.

2.2.1. Les cultures dédiées à l'usage énergétique

Ces cultures, d'ordinaire **destinées à l'alimentation** (blé, maïs, colza, betteraves, etc.), sont dans ce cas dédiées à la production d'énergie. En 2018, la production totale de cultures annuelles (maïs, blé, colza, tournesol et betterave) s'élevait à 94 700 kilotonnes de matière sèche (ktMS) pour une surface développée d'environ 9,3 Mha³⁵. Sur ce total, près de 9 700 ktMS seraient mobilisés sur une surface brute de 1,5 Mha, correspondant à une surface nette de 1 Mha en prenant en compte la part énergétique des coproduits valorisés en alimentation animale.

Le développement des usages énergétiques et celui des usages matériaux, encore marginal, peuvent venir concurrencer les usages alimentaires. La **production de biocarburants 1G**

³³ Le recours aux cultures principales pour la production de biogaz est réglementairement limité à 15 % dans la production de biogaz (article D. 543-292 du code de l'environnement).

³⁴ Source : SDES, 2019.

³⁵ Source : Agreste, 2020.

(bioéthanol, biodiesel) est le **principal débouché** de l'usage énergétique des cultures annuelles. La production de biocarburants en France, hors exportations, provient presque exclusivement du secteur agricole (le reste provenant des déchets organiques). La production de biocarburants 1G à partir de ce type de ressource est donc susceptible de créer des tensions sur les marchés des matières premières alimentaires, accroissant la compétition pour l'usage des sols. Cette compétition peut aboutir à l'extension de terres agricoles sur d'autres terres présentant un intérêt environnemental (comme les forêts ou les prairies).

● Cultures annuelles plantes entières



Triticale



Sorgho sucre & sorgho fibre

● Pérennes à forte productivité



Miscanthus

● TCR



TCR de Saule



TCR de Peuplier



Fétuque élevée



Switchgrass

Source : IFPEN

Par ailleurs, des cultures **lignocellulosiques** ont pour but principal la **valorisation énergétique** : miscanthus, *switchgrass* (panic érigé), taillis à courte rotation (TCR - 7 à 10 ans) ou très courte rotation (TTCR - 3 à 5 ans) comme les saules, robiniers, peupliers. Certaines d'entre elles sont également utilisées de façon marginale pour la litière ou le paillage

Ces ressources présentent un **gisement limité**, principalement composé de miscanthus et situé autour de l'Île-de-France et dans l'Ouest de la France. La surface totale des cultures pérennes a été estimée à environ 10 000 hectares³⁶ (dont 6 400 hectares pour le miscanthus). Les cultures dédiées sont principalement utilisées à des fins énergétiques : la quasi-totalité des volumes sont **destinés à la combustion**, avec peu de méthanisation à l'heure actuelle. Leur **rendement élevé** en biomasse et leur pérennité permettent un approvisionnement plus sûr des **chaudières** ou des **bioraffineries**. Les surfaces en cultures dédiées connaissent un essor rapide – hausse de 18 %³⁷ des surfaces en miscanthus entre 2018 et 2019 – qui rend indispensable le développement de nouveaux débouchés. **La filière biocarburants 2G** pourrait fortement intensifier la production, ainsi que la mobilisation de ces ressources. L'usage matériaux pourrait aussi augmenter dans les années à venir, notamment si les débouchés en matière composites se développent. Le déploiement des cultures pérennes à des fins énergétiques peut cependant soulever des interrogations sur la concurrence avec l'usage alimentaire des sols agricoles. Il peut également constituer une opportunité pour valoriser les friches industrielles ou sol impropre à la production alimentaire.

³⁶ Source : ONRB, 2020.

³⁷ Source : FranceAgriMer, 2020.

2.2.2. Les résidus de cultures annuelles

Ces résidus sont constitués de pailles de céréales, d'oléagineux ou de protéagineux, de menue paille (composée de débris formés lors de la récolte et de graines d'adventives présentes dans le champ), de cannes de maïs et de fanes de betteraves. Ces résidus peuvent être broyés et laissés aux sols, ou collectés pour répondre aux besoins de l'élevage (à des fins de litière animale ou plus occasionnellement comme alimentation).



Source : IFPEN

La disponibilité de cette ressource est très variable, tant quantitativement que qualitativement, en raison des variations de rendement d'une année sur l'autre, ce qui entraîne des tensions sur le marché (résultats de sécheresses, par exemple) et des incertitudes sur les volumes estimés. Le potentiel énergétique de cette ressource est important. Elle est disponible en grandes quantités (exemple : 5 millions de tonnes de paille de céréale en France, disponibles hors usage élevage et besoin agronomique) mais très peu valorisée dans la production d'énergie et de produits biosourcés du fait de l'importance des usages agronomiques et de la faible structuration des filières de valorisation.

2.2.3. Les cultures intermédiaires à vocation énergétique (CIVE)

Implantées entre deux cultures principales, ces productions peuvent assurer différentes fonctions agronomiques et environnementales³⁸, en plus d'une vocation énergétique : piégeage de l'azote résiduel, limitation des adventives, lutte contre l'érosion, amélioration de la biodiversité et de la structure des sols. Outre ces services écosystémiques, la mise en place de cultures intermédiaires représente une source de biomasse additionnelle valorisable énergétiquement (majoritairement par méthanisation) et produisant de surcroît du digestat, assurant un retour au sol du carbone notamment. Il en existe deux grands types : les cultures d'automne/hiver (raygrass, triticale, seigle, avoine, etc.) prolongeant une plantation de printemps, et les cultures d'été récoltées en octobre (sorgho, avoine, pois, tournesol, maïs, etc.). Le rendement de ces dernières peut être fortement affecté par la sécheresse.

En 2016, les CIVE représentaient 8 % du tonnage total d'intrants utilisés dans les unités de méthanisation agricole et 2 % du tonnage total d'intrants utilisés dans les unités centralisées³⁹. Cela équivaut à un total d'environ 100 ktMS. Ces cultures présentent un **potentiel important, encore sous valorisé** dans la production d'énergie. Notons toutefois que, par rapport à d'autres cultures

³⁸ D'où l'appellation alternative CIMSE : Cultures intermédiaires multi-services environnementaux.

³⁹ Source : ADEME, 2017.

intermédiaires, les CIVE récoltées ne sont pas enfouies ou laissées dans le sol (puisque la biomasse prélevée est destinée à la méthanisation), ce qui requiert d'assurer un équilibre entre augmentation du taux de mobilisation de cette ressource et maintien d'une biomasse au sol⁴⁰, afin de compenser les pertes en matière organique dans les sols. Par ailleurs, il convient de tenir compte de l'impact potentiel sur la mésofaune du sol qui contribue à l'aération et la structure des sols ; cet impact est susceptible de différer selon que l'on apporte de la matière organique fraîche, un digestat ou un compost.

2.2.4. Focus sur la valorisation dans les biocarburants

Les biocarburants regroupent les carburants liquides renouvelables⁴¹, par opposition à leurs équivalents d'origine fossile dont ils sont des substituts. Ils sont classés en deux catégories, selon l'origine de la biomasse dont ils sont issus : les biocarburants de première génération (biocarburants 1G) ou les biocarburants avancés (de deuxième ou de troisième génération – 2G ou 3G). Les procédés de transformation diffèrent également.

Les **biocarburants de première génération** sont les seuls produits actuellement développés à l'échelle industrielle, ils représentent la quasi-totalité des volumes produits. Ils sont obtenus en **utilisant les portions alimentaires de grandes cultures** (huiles végétales, cultures sucrières et amidonnières principalement). Deux types de biocarburants 1G doivent être distingués : le **bioéthanol**, provenant de la fermentation de sucre de betterave ou de canne, ou de l'amidon des céréales, et le **biodiesel**/biogazole, produit à partir de différentes sources d'acides gras/huiles végétales (issues de la trituration de graines de plantes oléagineuses par exemple).

Les **biocarburants avancés** (2G et 3G) visent à mobiliser des **ressources n'entrant pas en concurrence avec l'alimentation**. Ces nouvelles générations peuvent être produites à partir de **ressources lignocellulosiques** (miscanthus, taillis à courte rotation, résidus de cultures, bois et coproduits du bois, etc.), d'algues, mais aussi de déchets et de coproduits d'industries. Ces ressources peuvent se présenter sous forme de bois (forêts, haies et alignements) ou de ses résidus (déchets ligneux), de résidus agricoles et vinicoles (pailles, herbes, résidus de vignes et vergers) ou encore de cultures dédiées (miscanthus, taillis à courte rotation). À l'heure actuelle, seuls quelques types de biocarburants avancés, tels que les biodiesels produits à partir de graisses animales ou d'huiles végétales alimentaires usagées, commencent à faire l'objet d'une production industrielle. En ce qui concerne les filières de valorisation de ressources lignocellulosiques, les technologies de transformations restent, en France⁴², majoritairement au stade du développement ou de la démonstration.

Le biocarburant SP95-E10, contenant jusqu'à 10 % d'éthanol, représente quasiment la moitié des ventes de supercarburants en 2020 (46 %). Si le parc automobile en France est fortement diésélisé (80 % du marché), sa part diminue toutefois depuis cinq ans. Des substituts au gazole existent, tels que le biodiesel : la France fait usage de 3,1 milliards de litres en 2021⁴³, en augmentation de 5 % par rapport à 2020. Le biodiesel est issu de la transformation (par transestérification ou par hydrotraitement) de plantes oléagineuses : essentiellement huile de colza (85 %), huile de tournesol, huile de palme (supprimée depuis 2020), huile de soja (5 %), mais également huiles de cuisson usagées (10 %) et graisses animales. Concernant les substituts à l'essence, la France fait usage de 1,4 milliards de litres en 2021⁴⁴, en augmentation de + 25 % par rapport à 2020. Il s'agit pour

⁴⁰ Toutefois, durant la période de croissance, les CIVE remplissent un rôle de couverture des sols, qui ne serait pas assuré sans la mise en œuvre de ces cultures intermédiaires.

⁴¹ Les carburants gazeux renouvelables relèvent réglementairement de la catégorie « *biogaz* », et sont en particulier soumis aux mêmes contraintes de recours aux cultures dédiées (contrairement aux biocarburants).

⁴² Il existe des bioraffineries dans d'autres pays.

⁴³ 8 % du volume de la consommation totale.

⁴⁴ 8,6 % du volume de la consommation totale.

l'essentiel d'éthanol (94 %), et des huiles végétales hydrotraitées type essence (HVHTE) pour le reste. L'éthanol est majoritairement issu de céréales (42 % maïs/blé) par fermentation de l'amidon, alors que les HVHTE sont majoritairement issus de colza (47 %) et d'huiles usagées (51 %). L'éthanol d'origine biologique est ensuite mélangé jusque 10 % dans le SP95-E10, ou jusque 85 % dans le E85.

Le biogaz, distinct réglementairement des biocarburants, est également utilisé comme carburant renouvelable : on parle alors de bioGNV, notamment utilisé dans la mobilité lourde. Il est aujourd'hui produit par méthanisation et pourrait à l'avenir l'être à partir d'autres technologies, telles que la pyrogazéification ou la gazéification hydrothermale, utilisant des déchets de bois, du bois-déchets ou des biomasses humides.

La réglementation européenne (directive REDII – 2018) prévoit que les États-membres imposent un objectif aux fournisseurs de carburants pour augmenter l'utilisation d'énergies renouvelables, avec une cible de 14 % dans le secteur du transport en 2030. Par ailleurs, un plafond est défini au niveau européen et national pour les biocarburants de première génération, du fait de la compétition avec l'usage alimentaire et d'un risque de changement indirect d'affectation des sols (en anglais « *Indirect Land Use Change* » - ILUC). Parmi les dispositifs incitatifs français, la loi de transition énergétique sur la croissance verte recommande un taux d'incorporation de 15 % d'énergies renouvelables dans le secteur transport en France en 2030, et la programmation pluriannuelle de l'énergie fixe les objectifs d'incorporation de biocarburants avancés dans les pools essence et gasoil en 2023 et 2028 à 1,2 % pour l'essence et 0,4 % pour le gazole en 2023, et respectivement 3,8 % et 2,8 % en 2028.

Le développement des biocarburants de première génération, bien que ces productions fassent l'objet de débat du fait de la compétition de l'usage des sols avec l'alimentation, a néanmoins permis de créer cette filière et de mettre en place un outil industriel avec un équilibre économique permettant de maintenir ensemble filières alimentaires et énergétiques (betterave par exemple) et de valoriser les productions agricoles.

Le développement de biocarburants 2G devrait permettre de dépasser ce débat. Mobilisant des ressources n'entrant pas, *a priori*, directement en concurrence⁴⁵ avec l'alimentation humaine et animale (déchets, résidus, cultures dédiées, etc.), cette nouvelle génération de biocarburants pourrait représenter un levier important pour le secteur des transports. Néanmoins, les biocarburants avancés soulèvent encore des interrogations d'ordre technique (technologies et rendements, volumes de biomasses disponibles, utilisation des terres, bilan GES, etc.) et leur potentiel de développement reste lié aux autres usages de la biomasse, qu'ils soient énergétiques (chaleur, gaz, électricité) ou non (agronomie, matériaux, etc.). Outre un approvisionnement plus diversifié permettant d'optimiser le choix de biomasse (empreinte environnementale et rendement améliorés), un des principaux avantages associés aux biocarburants 2G réside dans des potentiels de production par hectare plus élevés. Contrairement aux biocarburants 1G, dans le cas d'une ressource lignocellulosique, l'ensemble de la plante est valorisable, ce qui améliore de fait les rendements énergétiques par hectare. La production de biocarburants 2G à partir de biomasse lignocellulosique devrait donc se fonder sur un approvisionnement réparti entre plusieurs ressources : cultures dédiées, résidus de cultures ou bois.

Il apparaît ainsi que plus les technologies avancent, plus il devient possible de produire des biocarburants à partir de différentes biomasses disponibles (agricoles, et aussi forestières désormais), ce qui invite plus encore à mener **une réflexion systémique et globale**.

⁴⁵ Le risque de concurrence avec l'alimentaire n'est pas à exclure, le développement de cette filière pouvant générer de la concurrence au niveau de l'usage des sols (donc avec les cultures alimentaires). Il faut prendre en compte cela dans les bilans.

2.2.5. Les principaux enjeux relatifs aux usages énergétiques de ces biomasses

▪ Des ressources géographiquement dispersées et un modèle économique incertain

La biomasse agricole est composée de **ressources variées**, présentes sous la forme de **gisements diffus** sur l'ensemble du territoire et se caractérisant par son caractère **saisonnier et périssable**. Sa mobilisation apparaît complexe sur de grandes distances à un coût réduit sans compromettre sa qualité et son bilan carbone. Son usage local est donc plus pertinent, mais nécessite un changement de structuration des infrastructures de transport et de production d'énergie, impliquant de nouveaux investissements et coûts d'exploitation afin de réaliser un **maillage territorial**⁴⁶.

Jusqu'alors, la mobilisation de la biomasse agricole à des fins énergétiques était encore limitée du fait de la compétitivité des énergies carbonées, ce qui ne sera plus forcément le cas à l'avenir, du fait de la crise énergétique et des ambitions françaises et européennes en matière de neutralité carbone. La viabilité économique des filières de valorisation dépend en grande partie des soutiens publics et les équilibres économiques sont principalement assurés par des aides (dispositifs d'incitation, tarifs d'achat, etc.) car la valorisation énergétique de la biomasse agricole représente des coûts d'investissements élevés pour de nombreuses exploitations agricoles et une rentabilité économique encore incertaine sur le long terme. Pour favoriser le développement de la biomasse énergie et l'atteinte des objectifs fixés par la PPE, plusieurs incitations fiscales ont été mises en place (amortissements dégressifs, subventions, simplifications réglementaires, tarifs d'achat). La stabilité des mécanismes de soutien permettra de donner aux acteurs la visibilité nécessaire pour engager les investissements.

▪ Des tensions à plusieurs niveaux : affectation des sols, types d'usages

Plusieurs types de tensions doivent être mentionnés : le retour au sol des résidus de récolte à la suite de l'exportation de cette matière carbonée pour un usage énergétique ; l'usage des coproduits végétaux pour les animaux en concurrence avec la fourniture d'énergie ; la compétition sur l'affectation des sols entre cultures alimentaires ou cultures énergétiques, etc. Pour illustration, l'augmentation des prélèvements sur les cultures végétales (par exemple pour permettre une augmentation des biocarburants) peut générer un changement d'affectation des sols (direct et indirect), qui peut provoquer une déforestation et donc une perte de carbone.

Les terres agricoles et les zones de pâturage représentent respectivement environ 20 millions et 10 millions d'hectares, soit près de 50 % du territoire métropolitain français, alors que les zones forestières représentent environ 17 millions d'hectares (31 % du territoire). L'utilisation des terres agricoles à des fins de production de biomasse soulève donc des questions majeures en termes d'aménagement du territoire et de préservation de l'environnement. L'écosystème agricole concentre de nombreux enjeux : production de nourriture, production d'énergie et de matériaux, maintien de la fertilité des sols, régulation du climat par la séquestration du carbone dans la biomasse et les sols. La quantification des ressources de biomasse agricole et plus particulièrement des volumes potentiellement disponibles est en pratique difficile à estimer.

Le développement rapide du secteur de la valorisation de la biomasse peut conduire à des tensions ou à des concurrences. À titre d'exemple, l'utilisation du miscanthus en cascade pour la fabrication de biomatériaux puis comme carburant s'oppose aux pratiques privilégiant la production de biocarburants 2G. Dans le cas des résidus agricoles, une fois les différents besoins de retour au sol satisfaits, la paille par exemple ne peut être en principe utilisée pour la valorisation énergétique qu'en l'absence de débouchés pour des usages agricoles ou de matériaux biosourcés. L'économie bas carbone repose en effet sur le développement des utilisations de la biomasse comme biomatériaux, ce qui implique à terme des tensions dans l'utilisation des résidus agricoles.

⁴⁶ S'agissant du gaz, on peut noter que les réseaux de transport et de distribution sont déjà largement maillés sur le territoire.

Synthèse du 2.2 – Les biomasses végétales à cycle court

Principaux avantages :

- les cultures constituent un important puits de carbone, absorbant le CO₂ atmosphérique ;
- la France dispose d'un potentiel important (superficie agricole, prairie) ;
- une courte période de reconstitution (cultures annuelles, voire à cycle plus court) : dans ce cas, le caractère renouvelable de ces sources d'énergie est assimilable avec le caractère « *neutre en carbone* » ;
- dans de nombreux cas, elles constituent un substitut aux sources fossiles d'énergies (biocarburants, biogaz) ;
- une diversité d'usages énergétiques, rendant possibles de nombreuses configurations d'exploitation selon les potentiels des territoires (bioraffinerie, méthanisation, ...)

Principales limites :

- biomasses dont la production doit continuer à être encadrée (actuellement 15 % maximum) pour ne pas entrer en concurrence avec l'alimentation humaine et animale (compétition de l'affectation des sols) ;
- un risque de changement d'affectation des sols (et impact sur le bilan carbone) ;
- leur récolte et l'exportation hors site de la matière organique peut, dans certaines conditions, contribuer à appauvrir les sols ;
- sensibilité aux artificialisations des terres (urbanisation, ...)
- biomasses à usage énergétique pouvant engendrer des émissions, résiduelles, de CO₂ ;
- une efficacité énergétique variable selon le type de biomasse, requérant parfois des volumes de production élevés.

2.3. Les biomasses non végétales

Les principales caractéristiques de ces biomasses :

- ne sont pas prélevées sur un puits de carbone ;
- sont produites en continu ;
- ont principalement un usage énergétique.

Les **biomasses non-végétales** s'entendent comme celles qui **ne sont pas prélevées sur un puits de carbone**. Ainsi, la récolte de ces biomasses n'impacte pas la capacité d'absorption de CO₂ atmosphérique ; toutefois, leur usage énergétique est, comme toute ressource constituée de carbone, émettrice de CO₂. Cette grande catégorie de biomasse concerne les résidus d'élevage, ainsi que les déchets et résidus d'activités humaines – qu'elles soient industrielles, domestiques ou de collectivités.

Cette biomasse est caractérisée par une grande **diversité en nature et en usages**. Elle est composée de déchets verts urbains, de boues de stations d'épuration, de biodéchets provenant des ménages et de la restauration ainsi que de résidus de l'industrie agroalimentaire. Les biodéchets urbains verts proviennent de sources lignocellulosiques (feuilles, résidus d'élagage et de tonte) des collectivités ou des entreprises. Les déchets alimentaires des ménages et des restaurants (composés de restes de cuisine) constituent une ressource de biomasse potentiellement importante qui est actuellement peu valorisée. Les résidus de l'industrie agroalimentaire sont principalement utilisés dans l'alimentation animale ou dans la production de matériaux biosourcés et de biocarburants. Le **coût de leur valorisation** doit être comparé à celui de leur élimination (souvent inférieur), pouvant expliquer un usage limité.

2.3.1. La valorisation énergétique des résidus d'élevage

Les déchets et coproduits organiques des exploitations d'élevage sont constitués de fumier (solide) et de lisier (liquide). La nature et les quantités d'effluents d'élevage sont liées au type d'animal et au temps de séjour en étable. La production annuelle est estimée à près de 100 millions de tonnes de matière brute de fumier et près de 200 millions de tonnes de matière brute de lisier. Le **niveau actuel de mobilisation énergétique des effluents d'élevage est très faible** : la grande majorité de cette ressource est **épandue sur les sols** et seul un pourcentage de la ressource disponible est valorisé

en méthanisation. Selon l'Ademe, le potentiel de mobilisation des effluents à horizon 2050 est évalué de 10 à 20 TWh dans des scénarios « *agroécologiques* » avec une part importante du cheptel bovin « à l'herbe » (scénarios S1 de l'Ademe et « *agroécologie* » de France Stratégie) et jusqu'à 20 à 24 TWh dans des scénarios plus tendanciels de maintien des pratiques actuelles d'élevage intensifs (scénario tendanciel et S4 de l'Ademe). La **production** d'effluents est **relativement stable dans le temps**, le cheptel étant resté globalement constant en France ces dernières années. L'évolution du cheptel et notamment sa diminution conditionnera les niveaux de disponibilité en effluents sur le long terme.

La valorisation énergétique de ces biomasses peut prendre plusieurs formes : à partir du méthane issu de leur fermentation, il est possible de produire de la **chaleur**, de l'**électricité** (cogénération) ou du **biogaz** injecté dans le réseau. Cette **diversité de modes de productions énergétiques** constitue un atout. Selon des études récentes⁴⁷, une mobilisation comprise entre 20 et 30 % du lisier et de 10 % de fumier solide semble réaliste à court terme (horizon 2030), une mobilisation ultérieure à plus grande échelle étant subordonnée à des technologies de récupération adéquates. Au-delà de l'investissement nécessaire et des coûts d'exploitation liés à une unité de méthanisation, les prix de vente et les coûts de stockage et d'épandage sont aussi à prendre en compte, variables selon le type de fumier ou de lisier, mais aussi selon sa qualité.

2.3.2. La valorisation énergétique des déchets issus des activités industrielles, domestiques, des collectivités

À la différence des biomasses relevant de résidus d'élevage, celles issues de la dépollution sont exclusivement **valorisées aujourd'hui sous forme de production de chaleur**. La valorisation économique de ces déchets consiste également à éviter l'enfouissement, dont les coûts sont élevés et en hausse.

▪ Les déchets solides, caractéristiques et techniques

Les combustibles solides de récupération (CSR) sont produits à partir d'une large gamme de déchets municipaux ou industriels : pneus, plastiques, résidus de broyage automobile, bois et déchets de bois, papiers, cartons et boues de papeterie, boues d'épuration des eaux, textiles, déchets ménagers. Ils proviennent notamment des refus de tri (collecte sélective), des encombrants de déchèterie. Tous ces déchets ne sont pas nécessairement de la biomasse, mais celle-ci y contribue. Leur pouvoir calorifique, variable selon leur composition et leur qualité, est de l'ordre de 10 à 25 MJ/kg. En France, près de 50 % des CSR produits sont utilisés dans les cimenteries (production de chaleur). La mobilisation des CSR sera favorisée par les objectifs de réduction de 50% des mises en décharge d'ici 2025.

La **pyrogazéification** est un autre procédé de valorisation des CSR et des déchets-bois (d'ameublement notamment)⁴⁸. Elle consiste à les traiter à haute température pour produire un gaz. Après purification et traitement, le gaz résultant, composé essentiellement de méthane, peut être injecté dans les réseaux et utilisé directement pour couvrir tous les usages, sans changement de procédé pour les utilisateurs finaux.

⁴⁷ Source : IDELE, Institut de l'élevage ; IFIP, Institut du porc.

⁴⁸ Un appel à manifestation d'intérêt mené en 2022 a permis d'identifier 49 projets sur tout le territoire, dont 19 sont au stade de développement et en mesure de se concrétiser à court-terme. Cet appel à manifestation d'intérêt a été mené en 2022 sous l'égide du CSF Nouveaux systèmes énergétiques.

▪ Les déchets humides, caractéristiques et techniques

Tout comme la méthanisation, le traitement et la valorisation de déchets et de résidus humides⁴⁹, dont les déchets d'effluents organiques, pour lesquels le taux de matière sèche est faible mais riche en composants organiques, le procédé de gazéification hydrothermale permet de produire un gaz de synthèse riche en méthane, en hydrogène et en gaz carbonique. Sa composition varie en fonction des caractéristiques de la biomasse traitée, du procédé (avec ou sans catalyse intégrée) et du fonctionnement opérationnel (débit, temps de séjour, présence ou non d'un séparateur de sels).

En Europe, plusieurs acteurs développent ou exploitent des pilotes ou démonstrateurs de gazéification hydrothermale. La France dispose à ce jour d'un prototype, et un pilote est en conception ; l'objectif est la mise en service de premiers projets industriels à partir de 2025/2026.

▪ Quelques illustrations d'installations de gestion des déchets

En France, une **chaudière CSR** à taille industrielle a été mise en place en 2017, à côté d'une installation de déshydratation permettant de valoriser une production agricole. Cette chaudière permet d'en valoriser 16 000 tonnes. Si plusieurs projets sont en cours en France, cette installation est actuellement la seule à fonctionner sur un mode industriel avec une qualification CSR, ce qui illustre la **difficulté de faire émerger une filière à envergure industrielle en France**. Cette installation illustre les interactions entre **décarbonation, économie circulaire, et innovation**.

Les cimenteries mobilisent de plus en plus de biomasses comme source d'énergie thermique (chauffage du four). Jusque dans les années 1990, le combustible pour chauffer le four était constitué à 100 % de petcoke, celui-ci progressivement **remplacé par des déchets industriels et de la biomasse**⁵⁰, à hauteur de 50 %. Toutefois, la biomasse ainsi utilisée présente une **moindre capacité calorifique** (pouvoir calorifique inférieur - PCI - de 8 à 10 G-joules/t que le petcoke (25-30)) ; or, il est nécessaire pour ce procédé industriel d'assurer une combustion à 2 000 °C, ce qui requiert un PCI d'au-moins 25. Cela soulève une difficulté technique pour envisager, à terme, un combustible constitué à 100 % de déchets ou de biomasse. L'atteinte de seuils de 50 à 70 % a en outre **un impact sur la consommation d'électricité** (prétraitement : 10 kWh par tonne de ciment supplémentaire). Ce point constitue un sujet de recherche en vue d'augmenter le PCI de la biomasse et délaisser le petcoke à échéance 2030 (en traitant la biomasse par pyrolyse par exemple, pour monter son PCI à 25).

2.3.3. Quelle gestion du CO₂ émis ?

Le recours à la biomasse pour les procédés de combustion, s'il offre une alternative avec les ressources fossiles, soulève la question de **la quantité de CO₂ émis par ces combustions et la réduction de ces émissions**. Sur le principe, il faudrait **le capturer** (en recourant à différentes technologies), puis **soit le stocker** en sous-sol (dans d'anciens puits de pétrole ou de gaz) ou dans des fonds salins sous-marins, **soit utiliser le CO₂ récupéré** en aval du procédé de combustion : par exemple, carbonater du béton en démolition, ou produire du **combustible de substitution** (CO₂ et hydrogène pour produire du e-kérosène et autres combustibles). Ces procédés sont actuellement au stade de projets pilotes, leur développement se heurtant à des difficultés techniques et financières : si des technologies permettent actuellement de capturer le CO₂, avec un coût élevé, la principale difficulté provient de **l'ajout d'hydrogène et de son coût élevé**, ainsi que de **l'importante consommation d'électricité requise à cette fin**.

⁴⁹ L'évolution de la réglementation sur le tri des déchets organiques en janvier 2024 conduit la méthanisation à devenir une voie de valorisation majeure pour ce type de déchets humides.

⁵⁰ La production d'1 tonne de calcaire requiert 100 kg de petcoke ; si l'on remplace tout le petcoke par du bois il faut 300 kg de biomasse.

2.3.4. Les enjeux relatifs à la localisation, à la taille et au rendement des unités de valorisation

De grandes quantités de déchets ne sont actuellement pas ou peu récupérées. Les activités de collecte requièrent de la logistique et de l'énergie, impliquant d'analyser le rendement énergétique du dispositif dans son ensemble. Se posent notamment des questions relatives à la taille des unités de valorisation et à l'efficacité des procédés utilisés.

Pour certains types d'installations (CSR par exemple), le modèle de développement de réutilisation de la biomasse repose sur des **unités de petite taille**. Ce choix résulte de nombreux paramètres dont notamment la capacité à s'approvisionner sur la base d'une diversité de déchets pour un **fonctionnement adaptable à différents types de combustibles**. Dans un contexte où les déchets évoluent beaucoup au fil du temps, les industriels peuvent privilégier la recherche de la sécurité avec des installations robustes capables d'intégrer une large palette de flux, si possible à taille réduite pour limiter la dépendance à des approvisionnements parfois complexes à sécuriser. Le **déchet étant une ressource locale**, les industriels essaient de le valoriser localement.

Pour d'autres types d'installations, au contraire, les **technologies employées** (gazéification par exemple) nécessitent, pour obtenir une rentabilité économique, **des unités de grande taille** (avec des capacités unitaires de 200 000 tonnes), ce qui génère des difficultés en amont pour la collecte de la ressource. Les efforts actuels portent sur des développements offrant **des rendements nettement améliorés**, ce qui réduit les quantités de biomasse requises (mais avec des surcoûts liés à la production d'un hydrogène décarboné).

Synthèse du 2.3 – Les biomasses non-végétales

Principaux avantages :

- un recyclage de la matière et de l'énergie en économie circulaire ;
- un potentiel important en France et encore peu exploité ;
- un approvisionnement en flux continu ;
- un substitut aux sources fossiles d'énergies ;
- une diversité d'usages énergétiques, rendant possibles de nombreuses configurations d'exploitation selon les potentiels des territoires (collectivités, activités agricoles ou urbaines, ...) ;
- des émissions de méthane (CH₄) et de protoxyde d'azote (N₂O) évitées par le traitement en méthanisation.

Principales limites :

- un coût de collecte et de transport, facteur d'émissions de CO₂ ;
- certains procédés (combustion) émetteurs de CO₂ ;
- une efficacité énergétique variable selon le type de biomasse, requérant parfois des volumes de production importants et à un coût parfois élevé d'innovation et de développement ;
- des filières à organiser, des modèles économiques encore peu stabilisés ;
- des difficultés d'insérer les installations dans le paysage, notamment en proximité avec les zones habitées.

2.4. Illustration d'un usage combiné de plusieurs biomasses : la méthanisation

2.4.1. Le principe de la méthanisation

La méthanisation consiste à transformer des matières organiques fermentescibles (incluent notamment les déchets, animaux et végétaux, des cultures agricoles ou leurs résidus, des boues de station d'épuration des eaux usées, ou encore les déchets organiques municipaux ou industriels) par un processus biologique (micro-bactéries) de dégradation en l'absence d'oxygène (digestion anaérobie⁵¹).

⁵¹ Ce qui la distingue du compostage (digestion aérobie).

Cette dégradation produit du biogaz composé d'environ 50 à 70 % de méthane (CH₄), de 20 à 50 % de dioxyde de carbone (CO₂) et de quelques gaz à l'état de traces (NH₃, H₂S). Ce biogaz peut être utilisé soit directement, notamment pour la production d'électricité ou de chaleur, soit après un processus d'épuration visant à produire du biométhane, dont les propriétés thermodynamiques et la composition permettent de l'injecter dans le réseau de gaz naturel. Le bioGNV (gaz naturel véhicule) constitue également une des bioénergies issues de la méthanisation. La méthanisation produit une source d'énergie renouvelable et durable⁵², qui se substitue au gaz fossile ou à un carburant classique et contribue à accroître la **souveraineté énergétique** française.

La digestion anaérobie produit également un résidu humide riche en matière organique et en nutriments, le digestat, qui a vocation à être retourné au sol après une phase de traitement.

2.4.2. De multiples valorisations associées

La méthanisation est susceptible d'apporter les deux bénéfices agronomiques suivants : la valorisation des digestats et le développement de cultures intermédiaires. Les digestats peuvent contribuer à la bonne structure et au stock de carbone du sol⁵³ et fournir des éléments minéraux (azote, potassium et phosphore) aux plantes, ce qui permet de réduire l'utilisation de fertilisants de synthèse. L'autre bénéfice agronomique est de profiter des cultures intermédiaires pour éviter l'érosion des sols nus, pour améliorer le rendement des cultures principales dans le cas de cultures de type légumineuses ou pour les utiliser comme piège à nitrates, pour limiter l'expansion de certaines maladies, pour freiner le développement des adventices, et augmenter la teneur du sol en carbone). Si beaucoup reste à faire en matière d'études agronomiques, les cultures intermédiaires gagneraient à être développées dans la mesure où elles représentent le principal potentiel de croissance de la méthanisation, qui doit franchir un palier significatif d'ici 2030.

Par ailleurs, la méthanisation crée ou contribue à de nouvelles dynamiques territoriales. Le retour d'expérience montre que le développement de projets de méthanisation dans un territoire catalyse divers projets connexes (production d'autres énergies renouvelables, refonte du système de gestion des déchets). Elle ouvre un nouveau débouché potentiel pour la valorisation des déchets organiques des industries agroalimentaires et des collectivités locales, ce qui se traduirait par une baisse des coûts de traitement de ces biodéchets. Enfin, la méthanisation permet la création d'emplois, au profit d'une filière industrielle française en développement. La filière crée à la fois des emplois directs, pour l'exploitation des unités, et des emplois indirects, notamment pour la fourniture d'équipements, la conception, les travaux et l'entretien.

⁵² La production de biogaz et de biométhane est soumise à certification de durabilité de la directive « *REDII* ».

⁵³ Il peut apparaître, dans certains cas (notamment sols appauvris en carbone), préférable de laisser au sol directement la matière organique dans le cas des résidus de culture ou des cultures intermédiaires.

2.4.3. Illustration : visites de sites de méthanisation

Visite de l'installation de méthanisation – GAEC Lamoureux frères, à Noyal-sur-Vilaine (Ille-et-Vilaine)

Le groupe de travail a visité, le 28 juin 2022, l'installation de méthanisation GAEC Lamoureux frères située à Noyal-sur-Vilaine, dans l'Ille-et-Vilaine.

L'objectif au lancement de ce projet était d'améliorer la valorisation des effluents d'élevage (lisier), ainsi que les matières fertilisantes (fumier) en obtenant un digestat, lequel permettrait d'amender les sols de manière régulière et optimale.

L'installation fonctionne avec 9 000 tonnes de matières brutes annuelles dont : 4 000 de lisiers, 3 200 de déchets, 1 800 de cultures intermédiaires à valorisation énergétique (CIVE) constituées de seigle et de maïs.

L'installation permet de produire de l'électricité par un procédé de cogénération : la production annuelle est de l'ordre de 2 millions de Kilowatts/heure, injectés en continu sur le réseau électrique.



Vue du digesteur



*Vue de l'un des moteurs de cogénération
(gaz -> électricité et chaleur)*

Visite de l'installation de méthanisation Castelmetha, à Noyal-Châtillon-sur-Seiche

Le groupe de travail a également visité, le 28 juin 2022, l'installation de méthanisation Castelmetha située à Noyal-sur-Vilaine, dans l'Ille-et-Vilaine.

Mise en service en 2020, cette unité produit du biométhane qui est injecté dans le réseau de gaz.

L'objectif de l'installation est principalement la valorisation des effluents d'élevage (issus de 400 à 600 jeunes bovins), ainsi que la diversification.

Près de 8 500 tonnes de matière brute sont mobilisées par l'installation chaque année, dont 3 650 de fumiers bovins ; 1 900 de CIVE (seigle) ; 750 de marc de pommes ; 230 de maïs ; 2 000 d'autres déchets.



*Vue de l'un des éléments de filtration et de purification
(gaz provenant des digesteurs -> méthane injecté dans le réseau)*

2.4.4. Grâce à un renouvellement rapide des ressources biomasses, un bilan carbone, sinon neutre, du moins atténué

La méthanisation, quel que soit le procédé considéré (production d'électricité par cogénération ou de gaz de réseau), a pour effet d'émettre du CO₂ dans l'atmosphère. Selon les matières premières utilisées (biomasses végétales, issues d'élevage, issues de déchets urbains, etc.), ce procédé peut également contribuer à compenser ces émissions de CO₂.

Dans la mesure où la production du biométhane s'opère à partir de biomasse végétale (cultures intermédiaires ou dédiées, notamment), caractérisée par son renouvellement rapide (dans l'année), les émissions de CO₂ associées au procédé peuvent être considérées comme neutres, puisque les cultures de l'année suivantes absorberont du CO₂ atmosphérique. Dans ce cas, les seules émissions sont liées à la production elle-même (consommation d'électricité, transport des intrants et du digestat, etc.), qui sont plus de sept fois inférieures à l'équivalent en gaz naturel. En revanche, lorsque la méthanisation fonctionne à partir de biomasses non végétales (résidus d'élevage, déchets domestiques ou industriels, etc.), la production qui en résulte n'est pas compensée, par le même dispositif, par la reconstitution d'un puits de carbone⁵⁴.

Le bilan carbone de la méthanisation :

- les plantes absorbent le CO₂ atmosphérique pour le transformer en matière organique, source de biomasse ;
- une partie de cette matière organique est contenue dans les racines : ce carbone reste dans le sol ;
- après récolte, la partie aérienne de la plante est soit directement introduite dans un digesteur, soit passe par une étape intermédiaire (ingestion par un animal, transformation pour l'alimentation, etc.) ;
- ce carbone se retrouve en partie dans le digestat, puis retourne au sol ;
- une autre partie est retirée du biogaz et peut être valorisée en CO₂ biogénique (encore en développement) en substitution au CO₂ d'origine fossile ou via une étape de méthanation ;
- le reste du carbone est dans le biogaz et se substitue au carbone d'origine fossile lors de sa combustion.

Cependant, la contribution de la méthanisation à la réduction des émissions de GES ne se limite pas au CO₂ économisé consécutivement à une économie de ressources fossiles substituées. Elle résulte également des gaz à effet de serre, méthane en particulier, qu'aurait émis la biomasse (émissions liées au stockage des effluents d'élevage), si elle n'avait pas été incorporée dans un digesteur, ce qui contribue donc à la réduction de l'empreinte climatique de l'agriculture.

Les installations de méthanisation sont, depuis 2022, soumises à certification des réductions de GES associées. Celle-ci tient compte des fuites de biogaz au niveau de ces installations, aujourd'hui encore peu documentées. Cette certification contribuera à préciser les réductions d'émission que permettent ces installations.

Enfin, de plus en plus d'exploitants de méthaniseurs étudient la captation du CO₂ biogénique émis lors de l'étape d'épuration du biogaz pour le valoriser en substitution du CO₂ fossile, ou encore pour le combiner à de l'hydrogène renouvelable pour accroître la production de biométhane (méthanation).

En conclusion, il peut être souligné la flexibilité et la polyvalence qu'offrent la méthanisation et le potentiel d'accroissement en utilisant les CIVES d'hiver en remplacement des effluents d'élevage qui risquent d'être amenés à décroître sur le long terme.

⁵⁴ Cela renvoie à la méthodologie de comptabilisation utilisée. Dans différentes méthodologies ACV (analyse cycle de vie), les énergies issues de la méthanisation sont évaluées positivement ; par exemple, dans le cadre des obligations de certification liées à la directive REDII, le biométhane a une valeur carbone proche de celle du panneau-voltaïque ou de l'éolien. Dans le cas de la biomasse non végétale, la durée du cycle carbone est rallongée. Ainsi, le carbone contenu dans les effluents d'élevage a été capté par des plantes quelques mois auparavant. Il en est de même pour les biodéchets.

2.5. Les principaux enjeux liés aux mobilisations des biomasses

Cette section s'inscrit dans les objectifs proposés par la SNBC consistant à **mobiliser davantage la biomasse d'ici 2050**, étant entendu qu'a été discutée au préalable, au sein de la partie 2, la question de la pertinence à mobiliser ou non chacun des différents types de biomasses. La question posée ici est celle des **conditions à réunir pour mobiliser davantage de biomasse**.

Les illustrations présentées dans cette partie permettent de relever que les dispositifs de mobilisation de biomasse en France se sont construits sur la base d'intrants très divers, ce qui a conduit à des conceptions très hétérogènes. Les dispositifs actuels reposent ainsi sur **des solutions émergentes localement**, selon **une grande diversité de configurations** : ressources et valorisations locales, économie circulaire (optimisation des coûts de collecte, d'acheminement, de distribution, *etc.*), diversité de taille des unités en fonction des équilibres territoriaux. Il apparaît que toutes les situations rencontrées révèlent des situations **ancrées dans les territoires de manière chaque fois très spécifique**, prenant en compte de multiples facteurs et interactions (enjeux sociaux, acteurs économiques). Il ne s'agit pas d'un modèle-type ou d'une configuration-type qu'il s'agirait de décliner de manière uniforme sur l'ensemble du territoire national.

2.5.1. Les mécanismes de co-production

Dans ces réflexions sur les conditions pour une mobilisation accrue des biomasses, il y a lieu de faire une distinction entre les biomasses dont la production poursuit une finalité énergétique bas carbone, et celles pour lesquelles cette finalité est incidente d'une production principale.

Dans le premier cas, on peut notamment identifier les cultures lignocellulosiques (triticale - sorgho, taillis à croissance rapide) produites en vue de la production de biocarburants avancés, les CIVE en vue de la méthanisation, ou encore la sylviculture pour la production principale de bois d'œuvre (ce qui concourt à l'objectif de stockage du CO₂ dans les matériaux de construction). Pour ces types de biomasses, augmenter leur mobilisation suppose de développer ces filières de production, directement. Le point d'attention concerne entre autres la compétition avec d'autres finalités (alimentaires notamment) et la protection des écosystèmes face à l'augmentation de surface ou de rendements.

Dans le second cas, on peut identifier par exemple le fumier issu d'élevage, les résidus des cultures annuelles, les résidus sylvicoles, les déchets urbains, *etc.*, issus d'une production principale autre. Augmenter la mobilisation de ces types de biomasse suppose donc d'agir également au niveau de l'activité de production dont elles sont issues, ce qui requiert de modifier des équilibres économiques complexes. Pour illustration, la gestion des forêts reposant essentiellement sur la production de bois d'œuvre comme moteur économique, le développement des biocarburants avancés intégrant des résidus de bois, ou le développement des CSR alimentés par les déchets bois, impliquera un développement de la filière bois d'œuvre.

Il faut également prendre en compte des coproduits issus des filières de valorisation énergétique dans les différents cycles des biomasses. Citons comme exemples : les coproduits issus de la filière des biocarburants 1G qui sont valorisés en alimentation animale ; le digestat coproduit de la méthanisation qui en retournant au sol permet une substitution des engrais pétrosourcés.

2.5.2. Les procédés de maximisation de la valorisation du carbone

L'utilisation énergétique des biomasses émet du CO₂ biogénique. La recherche de la **valorisation maximale** vise à obtenir que ce CO₂ ne s'échappe pas dans l'atmosphère mais puisse être récupéré (par méthanation par exemple), avec des coûts supplémentaires associés à la production d'hydrogène.)

Des synergies peuvent être recherchées⁵⁵, notamment entre la filière pyrogazéification et la filière méthanation ou bien entre la méthanisation et la méthanation. Cela rejoint la problématique de la localisation des installations : le couplage méthanisation-méthanation trouve son intérêt en permettant de **produire l'hydrogène nécessaire**, ou alors de **disposer d'une infrastructure de transport**, permettant d'avoir accès à une grande quantité d'hydrogène **à proximité du point d'émission du CO₂**. L'idée est de combiner ces actions sur ces mêmes sites et auprès des mêmes acteurs. Se pose également la question de la taille des installations, afin de trouver au cas par cas un équilibre entre celle pertinente pour le procédé de méthanation, tout en respectant les équilibres locaux dans lesquels s'inscrit une installation de méthanisation.

2.5.3. Focus sur la valeur de l'action pour le climat

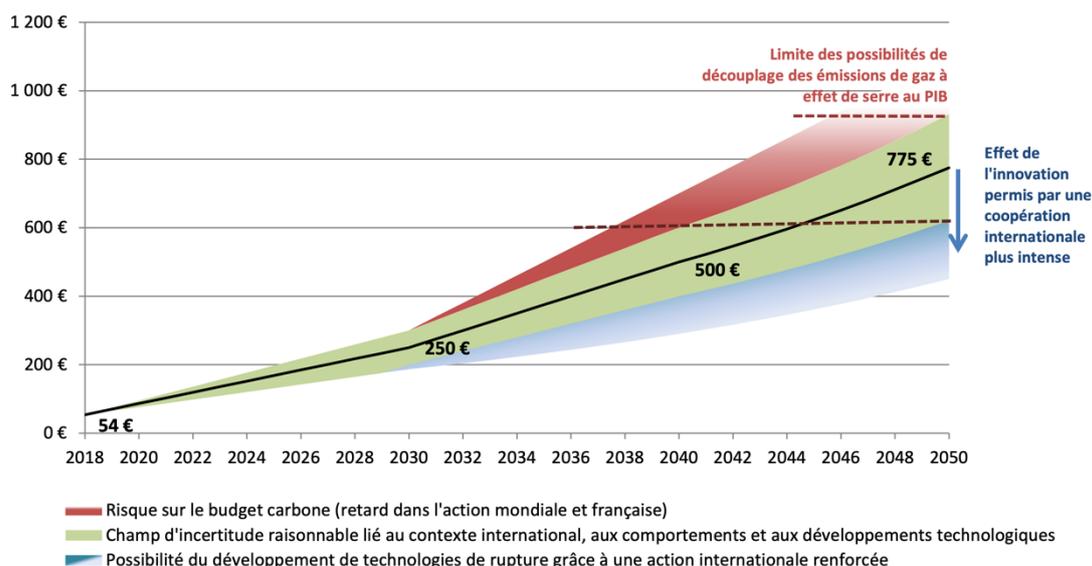
Afin de sélectionner les actions pertinentes dans la perspective de l'action climatique, il est indispensable de déterminer leur valeur du point de vue de la communauté (c'est-à-dire de leur attribuer une « *valeur socio-économique* »). Dans cette perspective, la valeur d'une action climatique est (schématiquement) la valeur monétaire qu'une communauté attache à une action qui évite l'émission d'une tonne de dioxyde de carbone (CO₂eq). Un premier rapport public, en 2008, avait initialement établi cette valeur à 100 €/t à l'horizon 2030, valeur qui a été rehaussée en 2019 à 250 € (dans le cadre d'un rapport de France Stratégie conduit par Alain QUINET, comme pour l'exercice d'évaluation de 2008).

Il est essentiel de resituer notre problématique relative à la biomasse dans le cadre de ce référentiel qui doit permettre de répondre à quatre questions fondamentales :

- « i°) le pays est-il sur la « bonne » trajectoire de décarbonation, c'est-à-dire sur le chemin lui permettant d'atteindre in fine l'objectif ZEN ? [...] ;
- ii°) la trajectoire observée permet-elle d'atteindre l'objectif fixé au meilleur coût ? C'est là que la valeur de l'action pour le climat intervient comme référence utile, dans la mesure où elle permet de définir le périmètre des actions pertinentes pour la collectivité. Une valeur plus élevée étend le champ des actions rentables pour la collectivité : à chaque instant, toutes les actions – publiques ou privées – qui coûtent moins cher que la valeur tutélaire du carbone, i.e. qui présentent un coût d'abattement socioéconomique inférieur à cette valeur, devraient être entreprises. Si ce n'est pas le cas, il convient d'identifier les freins et les verrous qui font obstacle à ces actions ;
- iii°) les actions sont-elles appelées par ordre de mérite ? De nombreuses actions sont à conduire pour atteindre l'objectif, mais elles doivent être engagées dans le bon ordre. Les gisements de réduction des émissions de CO₂eq à bas coût doivent être mobilisés en priorité, avant que soient lancées les actions plus coûteuses. [...] ;
- iv°) les actions sont-elles spontanément déclenchées par les acteurs privés ou nécessitent-elles une intervention publique ? Dans certains cas, les actions n'entraînent aucun coût et génèrent même parfois des gains. C'est notamment souvent le cas de choix de sobriété, de partage d'équipements ou de certains gestes d'efficacité énergétique. Dans d'autres cas, l'externalité n'est pas prise en compte et requiert une intervention publique prenant la forme d'investissements ou de mesures incitatives et réglementaires ». (France Stratégie, 2019, p.25).

⁵⁵ Non que ces synergies soient à rechercher pour elles-mêmes, la valeur qu'elles dégagent doivent plutôt apparaître dans un calcul économique plus large qui tient compte de l'ensemble des coûts et gains, pour décider de leur développement. La production du gaz bas-carbone doit se décider en lien avec sa compétitivité au sein des différents usages finaux.

Évolution temporelle de la valeur de l'action pour le climat



Source : France Stratégie, Rapport de la commission présidée par Alain QUINÉ

2.5.4. Retour sur les objectifs de la SNBC 2

La SNBC prévoit un besoin énergétique final d'environ 1 060 TWh en 2050. Sur ce total, 110 TWh seraient fournis par des combustibles solides utilisant 110 TWh de ressources en biomasse brute (comme le bois). À cela s'ajoutent 100 TWh d'énergie qui seraient couverts par des combustibles liquides (biocarburants) utilisant 140 TWh de biomasse brute. Enfin, 160 TWh_{pcs} seraient fournis par des combustibles gazeux utilisant 200 TWh de biomasse brute. Ainsi, environ **450 TWh_{pcs} de ressources de biomasse brute devraient être mobilisés à des fins énergétiques d'ici à 2050**, contre environ 180 TWh en 2016. Toujours selon le cadre estimé par la SNBC, près de 250 TWh de biomasse agricole (agroforesterie comprise), 100 TWh de biomasse forestière et 100 TWh de déchets (bois inclus), effluents d'élevage et autres résidus devront être utilisés à des fins énergétiques. Ces chiffres supposent un niveau de mobilisation élevé, ainsi qu'une valorisation optimale des ressources.

La plupart des études prospectives estiment que **l'atteinte de cet objectif présente des défis et incertitudes**. Le présent rapport n'a pas pour objet d'établir un énième scénario prospectif, ni de proposer une méta-analyse de ces différents scénarios. Il prend acte des conclusions de ces études, impliquant un impératif de réalisme au niveau de la SNBC 3 et, au regard des attentes, une claire hiérarchisation des priorités assignées aux usages des biomasses. Dans cet esprit, la dernière partie du rapport envisage différents principes de hiérarchisation pour éclairer le débat.

2.6. Les principaux messages de la partie 2

Les biomasses se caractérisent notamment par :

- la dualité de leur provenance (issues d'un puits de carbone, ou non) ;
- la diversité de leur nature ;
- la relative dispersion de leur localisation ;
- la temporalité de leur constitution (cycle long / cycle court) ;
- la diversité de leur usage et du potentiel que chacune permet d'apporter à la neutralité carbone.

Plusieurs activités sur les biomasses détiennent un potentiel intéressant pour l'atteinte de la neutralité carbone :

- la reconstitution du puits carbone ;
- la réduction des émissions de CO₂ : substitution-matériau et substitution-énergie.

Pour chacune d'elles, des équilibres locaux, nationaux et globaux sont à trouver pas à pas, en lien notamment avec les autres ressources mobilisées, les autres objectifs poursuivis (alimentaires, sécurité d'approvisionnement énergétique, *etc.*).

3. PROPOSITIONS DE CRITÈRES DE HIÉRARCHISATION DES ACTIVITÉS

La Partie 2 du rapport a présenté les principales biomasses, leurs caractéristiques, les activités et usages associés et les principaux enjeux (potentiel, coût, limites) liés aux actions sur ces ressources. La présente partie a pour objet de discuter les critères de hiérarchisation des activités relatives aux biomasses en fonction de leur contribution à la neutralité carbone.

La partie 3 est ainsi structurée :

- 3.1 Les activités à hiérarchiser
- 3.2 Les critères pris en compte pour établir une hiérarchie
- 3.3 Proposition d'outil d'aide à la décision
- 3.4 Eléments de conclusion

3.1. Les activités à hiérarchiser

3.1.1. Des activités en première valorisation de la biomasse

Ce rapport privilégie la notion d'« *activité* » à celle couramment utilisée d'« *usage* ». Dès lors que la réflexion proposée dans ce rapport sur les contributions des biomasses à la neutralité carbone ne se borne pas à la seule question de l'utilisation ou la mobilisation des ressources, mais prend également en compte les activités relatives à sa préservation et sa reconstitution, il apparaît préférable de retenir la notion d'« *activité* ».

De quelles activités parlons-nous ? Afin de centrer nos travaux sur un objectif bien défini, nous entendons par « *activité* » les actions humaines en prise directement avec les biomasses à leur état brut (par exemple replantation forestière, changement des pratiques agricoles, *etc.*) et conduisant à les valoriser (que cette valorisation soit de nature énergétique ou autre). Les activités retenues sont ainsi celles situées en amont de la chaîne⁵⁶ de transformation et d'usages (ceux-ci pouvant être, *in fine*, par exemple la production d'électricité ou de biogaz pour le secteur du transport, ou la production de matériaux pour le secteur du bâtiment, *etc.*).

3.1.2. Les activités retenues

Selon la méthode exposée au point précédent (*cf.* 3.1.1), les activités retenues consistent en des actions conduites sur chacun des principaux types de biomasses et de procédés présentés dans la partie 2. Nous en retenons 14 qui nous paraissent constituer les principales et qui sont ici organisées selon les grandes caractéristiques des biomasses concernées.

Activités de valorisation des **biomasses végétales à cycle long** (*cf.* 2.1) :

A1 - Replantation de forêts.

A2 - Gestion sylvicole prenant en compte l'adaptation au changement climatique (diversification des essences forestières, *etc.*).

A3 - Gestion sylvicole préservant les sols et écosystèmes (techniques de récolte « douces », maintien au sol des résidus de sylviculture, *etc.*).

A4 - Utilisation du bois pour le matériau construction - ameublement – isolation.

⁵⁶ Comme indiqué en partie 1 au paragraphe 1.3.3, ce rapport se situe ainsi dans une démarche différente (mais complémentaire) des approches ACV (analyse du cycle de vie) pour lesquelles les critères d'absorption de carbone et de réduction des émissions ne sont pas séparés mais sont analysés sur un bilan net intégrant la somme de ces mécanismes (absorption et émissions).

A5 - Utilisation du bois pour l'énergie par combustion (pour chauffage résidentiel, chaudières CSR, fours industrie, etc.).

A6 - Utilisation des résidus de bois pour les biocarburants 2G.

Activités de valorisation des **biomasses végétales à cycle court** (cf. 2.2) :

A7 - Maintien au sol des résidus végétaux de culture pour contribuer au maintien de C dans les sols.

A8 - Utilisation des résidus de cultures pour des biocarburants (2G) ou pour la méthanisation.

A9 - Culture de plantes (oléagineuses, etc.) dédiées aux biocarburants (1G).

A10 - Culture de plantes (miscanthus, etc.) dédiées aux biocarburants (2G).

A11 - Cultures intermédiaires à vocation énergétique (CIVE) pour les installations de méthanisation et conséquence sur les rotations.

Activités de valorisation des **biomasses non-végétales** (cf. 2.3) :

A12 - Utilisation des résidus d'élevage en méthanisation.

A13 - Alimentation des installations de production de biogaz (méthanisation, pyrogazéification, gazéification hydrothermales) avec des déchets (liquides/solides) issus de collectivités/industries/ménagers.

A14 - Implantation d'installations de traitement des déchets ménagers et industriels.

3.2. Critères de hiérarchisation envisageables

3.2.1. Logique et identification de 4 principaux critères

Dans une démarche de simplicité et de lisibilité, nous pouvons confronter les diverses activités présentées dans le paragraphe précédent (cf. 3.1) à **quatre principaux critères : deux selon leur concours à l'atteinte de l'objectif de neutralité carbone⁵⁷, et deux transversaux**, relatifs à la **pertinence et la faisabilité** de ces activités **compte tenu de leur équilibre coût/bénéfice/risque** ainsi que de **leur comptabilité avec d'autres enjeux** environnementaux, sociaux, économiques et politiques :

Critère C1 : **concours à l'absorption** du CO₂ atmosphérique.

Critère C2 : **concours à la réduction des émissions** de CO₂ dans l'atmosphère (par un **effet de substitution matériau** ou par un **effet de substitution énergétique**).

Critère C3 : **équilibre coût/bénéfice/risque**.

Critère C4 : **compatibilité avec d'autres objectifs de politique publique**.

3.2.2. Le contenu des 4 critères retenus, détaillés par sous-critères

Critère 1 (C1) – Concours à l'absorption du CO₂ atmosphérique

Ce critère C1 permet de confronter les activités selon qu'elles contribuent ou non, et à quel degré, à préserver ou à développer les écosystèmes végétaux (forêts, prairies, cultures ainsi que les sols) et ainsi à protéger ou **augmenter le puits de carbone**. Ce critère concerne spécifiquement les activités en rapport avec **les biomasses végétales** (à cycles longs ou à cycles courts, présentées aux 2.1 et 2.2).

⁵⁷ Cette classification s'inspire de celle proposée, pour le seul secteur forestier, dans l'étude de juin 2016 de l'INRA pour le compte du MAAF : « *Les leviers forestiers pour lutter contre le changement climatique* », proposant les 4 leviers suivants :

- les effets de stockage du carbone en forêt (sur pied et dans le sol) ;
- les effets de stockage du carbone dans les produits bois et à base de bois ;
- les effets de substitution bois-énergie à la place de ressources en énergie fossile ;
- les effets de substitution de matériaux bois en remplacement de matériaux plus énergivores.

Ce critère peut se développer ainsi selon **2 sous-critères**.

- Développement des puits de carbone (sous-critère C1a)

Ce sous-critère concerne des activités qui contribuent à la reconstitution de la biomasse végétale (par opposition à des activités qui l'exploitent – cf. sous-critère C1b) : activités de développement de la superficie végétale (replantation forestière, mise en cultures de terres nues, etc.) permettant d'accroître le stockage naturel de carbone.

- Réduction des puits de carbone (sous-critère C1b)

Ce sous-critère, *a contrario*, concerne des activités qui exploitent ou mobilisent la biomasse végétale. Il renvoie à l'exigence d'une récolte raisonnée de biomasse végétale, qui ménage le potentiel d'absorption de CO₂ (prise en compte de la nécessité de renouvellement et d'équilibre) par des modes de gestion durable des forêts, des cultures et des prairies, avec une prise en compte significative de l'équilibre de l'écosystème, du retour au sol (éviter son appauvrissement), du renouvellement (replantation). Ce sous-critère prend en compte la durée pendant laquelle l'équivalent CO₂ d'une biomasse récoltée est renouvelé : temps très long pour des arbres et forêts, temps courts (l'année) pour des végétaux à culture annuelle.

Critère 2 (C2) – Concours à la réduction des émissions de CO₂ dans l'atmosphère

Le deuxième critère (C2) permet de confronter toutes les activités selon qu'elles contribuent ou non, et à quel degré, à **réduire les émissions de CO₂** dans l'atmosphère, notamment en concourant à l'effet de **substitution-énergie** ou bien à l'effet de **substitution-produits**.

Ce critère C2 peut se développer ainsi selon **3 sous-critères**.

- Réduction par effet de substitution-produit (sous-critère C2a)

L'effet de **substitution-produits** repose sur le principe de réduire les émissions de CO₂ par le recours à un procédé de production utilisant de la biomasse en substitution à un procédé concurrent (béton, acier, plâtre, aluminium, etc.) davantage émetteur de CO₂.

Ce sous-critère C2a (substitution-produit) concerne notamment⁵⁸ les activités de valorisation de **la biomasse végétale ligneuse** (qu'il s'agisse de biomasses végétales à cycle long ou à cycle court ; cela renvoie principalement aux biomasses présentées aux 2.1 – les matériaux-bois – et à certaines biomasses présentées au 2.2 – les matériaux comme le chanvre, le lin).

- Réduction par effet de substitution-énergie (sous-critère C2b)

L'effet de **substitution-énergie** repose sur le principe de réduire les émissions de CO₂ par la valorisation énergétique des biomasses en substitution à d'autres sources d'énergies concurrentes (fuel, gaz, charbon, etc.) dont l'exploitation est davantage émettrice de CO₂. Il s'agit d'évaluer le potentiel de chaque biomasse donnée, à énergie fournie équivalente, en termes de moindre émission de CO₂ par rapport à une autre source d'énergie (par exemple biocarburants vs pétrole, biogaz vs gaz naturel, bois-combustion vs charbon, etc.). L'estimation de cet effet doit souvent être contextualisée de manière précise.

Ce sous-critère concerne les activités de valorisation de **toutes les biomasses**, qu'elles soient végétales ou non (résidus d'élevage, d'industrie, domestiques, etc.), telles que présentées dans l'intégralité de la partie 2.

⁵⁸ Cet effet substitution peut jouer aussi pour les industries qui utilisent le gaz comme matière première et pas seulement comme combustible : la substitution de gaz renouvelable (ou bas carbone) au gaz naturel a le même intérêt.

- Contrepartie en dépense énergétique et émissions CO2 (sous-critère C2c)

Quel que soit le potentiel atténuateur d'une biomasse donnée (cf. sous-critère précédent, C2b), il n'en est pas moins qu'accéder à un site producteur de biomasse (élevage, culture, forêt, etc.), collecter cette biomasse, la transporter, la transformer, la mettre à disposition de l'utilisateur, etc., sont **des activités consommatrices d'énergie**, et par conséquent la plupart du temps émettrices de CO₂.

Ainsi, **la limitation de ces activités** (collecte, transport, transformation, etc.) et des dépenses d'énergie associées, constituent un critère **favorable à la réduction des émissions** de CO₂. Ce sous-critère valorise ainsi les biomasses dont la transformation et l'utilisation sont proches du lieu de culture, ainsi que celles **faciles à collecter/extraire/mobiliser** (peu d'énergie requise pour ces opérations), et enfin celles pour lesquelles la **transformation** nécessaire avant utilisation finale est **économe en énergie**.

Critère 3 (C3) – L'équilibre coût/bénéfice/risque

Ce critère permet d'évaluer les activités en fonction de leur viabilité économique, de leur maturité et degré de consensus, des co-bénéfices qui peuvent y être associés, et enfin leur sensibilité aux fluctuations du marché des autres ressources énergétiques et autres événements conjoncturels ou évolutions structurelles. Ce critère concerne les activités de valorisation de **toutes les biomasses** présentées dans partie 2.

Il peut être déclinée selon **4 sous-critères**.

- Viabilité économique (sous-critère C3a)

Il s'agit d'apprécier pour chacune des activités retenues leur coût, le retour sur investissement et autres considérations économiques, sur l'ensemble des opérations concernées : la récolte ou collecte, son extraction, son acheminement jusqu'à son site de transformation ou d'usage, sa transformation et sa mise à disposition de l'utilisateur.

L'optimisation de ces activités (collecte, transport, transformation, etc.) et des dépenses d'énergie associées constitue un critère favorable à la réduction des émissions de CO₂ (cf. C2c), et il en est de même de leur viabilité économique. Cela comprend également, le cas échéant, les coûts relatifs à l'innovation, au déploiement du procédé, à sa généralisation et son industrialisation⁵⁹. Il est important de prendre en compte la viabilité économique à l'échelle de l'ensemble de la filière et non pas seulement au niveau de l'usage en aval. Sur ce dernier point, le coût de l'énergie à 10, 20 ou 30 ans (selon la nature de la biomasse considérée) constitue une incertitude majeure et un facteur déterminant dans les comparaisons.

Enfin, il peut être mentionné l'équilibre à trouver dans le financement des actions, notamment dans la répartition entre sources publiques et privées.

- Degré de maturité (sous-critère C3b)

Le développement qui précède illustre que les différents usages des biomasses sont loin de disposer du même degré de maturité (technologique, économique, social, etc.), seuls certains étant susceptibles de rencontrer un modèle socio-économique à un horizon intermédiaire de 2030. Les activités peuvent être appréciées, ainsi selon qu'elles sont « *sans regret* » et peuvent être recommandées à cet horizon, ou que leurs avantages sont encore incertains et/ou en débat et appelleront des arbitrages.

⁵⁹ L'évaluation de ce sous-critère nécessitera la prise en compte de scénarios de prix (énergie, CO₂, etc.). Selon le scénario choisi, la conclusion pourra être très différente.

- Synergie avec d'autres bénéfiques associés (sous-critère C3c)

Il s'agit de prendre en compte les co-bénéfices, ou externalités positives, associées aux activités retenues, c'est-à-dire celles qui n'entrent pas directement dans le champ de la production d'énergie. À titre d'illustration, et comme développé au point 2.4, la méthanisation est, outre un procédé de production de gaz renouvelable, une technique vertueuse de traitement des déchets et des effluents agricoles et de production d'engrais renouvelables. Son impact sur l'emploi dans les territoires ruraux peut ainsi être pris en compte. Concernant la pyrogazéification de bois (voire de CSR), les externalités positives liées à l'économie des déchets ainsi qu'aux synergies avec certains segments de la chaîne de valeur du bois (bois d'œuvre, bois énergie, cycle du carbone du sol) peuvent également être prises en compte. Concernant les filières actuelles de biocarburants, l'apport des co-produits destinés à l'alimentation animale (tourteaux, drèches, pulpes) sur la réduction de la dépendance française en protéines végétales destinées à l'alimentation animale par substitution aux imports de tourteaux de soja peut également être pris en considération⁶⁰.

- Sensibilité aux aléas et aux évolutions structurelles (sous-critère C3d)

Ce sous-critère renvoie à la **sensibilité des activités aux aléas** (météorologiques, économiques, géopolitiques, etc.) et aux **évolutions de portée structurelle**. Il ressort des bilans annuels du Citepa que les **émissions connaissent des écarts interannuels** montrant que les réductions ont à la fois des **causes conjoncturelles** (notamment la rigueur de l'hiver jouant sur la consommation d'énergie, une crise sanitaire en 2020)⁶¹ et des **causes structurelles** (évolution du mix énergétique, du parc automobile, des bâtiments, transformation du système productif, des pratiques agricoles, des comportements, etc.)⁶².

Dit autrement, le critère retenu ici renvoie en réalité à la **résilience du système énergétique**, l'enjeu étant d'augmenter la soutenabilité de notre transition énergétique. La **diversification des sources d'énergies** peut, notamment, constituer l'un des facteurs de cette résilience.

⁶⁰ Source : Assemblée Nationale, Janvier 2020, Rapport d'information n° 2609 sur les agrocarburants. https://www.assemblee-nationale.fr/dyn/15/rapports/cion-dvp/l15b2609_rapport-information.pdf

⁶¹ Concernant la sensibilité aux événements conjoncturels, pour illustration, la réduction d'émissions entre 2018 et 2019 s'explique, notamment, par une baisse des volumes de fioul consommés dans le résidentiel et des activités de métallurgie des métaux ferreux dans l'industrie, ainsi qu'un moindre recours au charbon dans la production d'électricité, en raison d'une baisse du cours du gaz et d'une hausse du cours des quotas européens de CO₂. Pour autre illustration, l'année 2020 (- 42 MtCO₂eq, soit - 9,6 % par rapport à 2019) est marquée par deux phénomènes conjoncturels ayant entraîné une baisse massive, et sans précédent, des émissions de gaz à effet de serre en France : la pandémie de la Covid-19 et, dans une moindre mesure, des températures hivernales très clémentes (niveau record de l'indice de rigueur météo depuis que cet indicateur est suivi, en 1970). Mais c'est surtout en raison de l'impact de la crise sanitaire de la Covid-19 et des mesures de confinements associées, que l'année 2020 constitue une rupture forte dans l'évolution des émissions de GES en France. En revanche, l'année 2021 (+ 25 Mt CO₂eq, soit + 6,4 % par rapport à 2020) est marquée par un rebond des émissions lié à la reprise des activités (principalement les transports, mais aussi l'industrie, le tertiaire, etc.) à la suite de la crise de la Covid-19 de 2020. Une partie de la hausse est aussi liée à une météo plus rigoureuse qu'en 2020, jouant sur les émissions du chauffage résidentiel et de la transformation d'énergie. L'année 2022, pour laquelle nous ne disposons pas encore des chiffres définitifs, est quant à elle caractérisée notamment par la crise énergétique et l'inflation, en partie en lien avec les conflits géopolitiques en Europe ; nul doute que cela se traduise par des effets de report d'usages notamment sur l'utilisation de certaines biomasses comme le bois-énergie pour le chauffage domestique.

⁶² Concernant la sensibilité aux évolutions structurelles, pour illustration, nous pouvons évoquer l'évolution des besoins alimentaires et des modes d'alimentation, avec son incidence sur l'affectation des terres, l'élevage, etc., et la disponibilité de certaines biomasses (effluents d'élevage). On peut également citer le recours accru aux énergies renouvelables non-carbonées (éolien, solaire), ou encore le recours accru aux biocarburants en alternative aux énergies fossiles.

Critère 4 (C4) – Compatibilité avec d'autres objectifs de politique publique

Ce quatrième critère permet d'évaluer toutes les activités en fonction de leur compatibilité et insertion avec d'autres objectifs et enjeux nationaux ou globaux : il s'agit d'apprécier leur faisabilité et degré de réalisme eu égard à leur **connexité avec d'autres objectifs politiques** comme celui de la sécurité d'approvisionnement énergétique, ou objectif environnemental de préservation ou de restauration des milieux naturels.

Il peut se développer ainsi selon **2 sous-critères**.

- Autres objectifs environnementaux (sous-critère C4a)

Il s'agit d'évaluer les activités au regard de leur respect des équilibres naturels et globaux, de telle sorte qu'elles ne compromettent pas le futur (tant sur le plan des gaz à effet de serre que des autres enjeux environnementaux). Cela renvoie notamment à l'exigence de maintien de la biodiversité, de préservation de la qualité de l'eau et de l'air (émission de particules fines issues de la combustion du bois), etc.

- Autres objectifs de sécurité, souveraineté ... (sous-critère C4b)

Ce sous-critère prend en compte des objectifs en matière de politique énergétique qui « *cohabitent* » avec celui de la neutralité carbone, comme des objectifs de sécurité d'approvisionnement énergétique ou de souveraineté énergétique.

Aux delà des seules considérations énergétiques, d'autres objectifs de politiques publiques tels que la réindustrialisation de la France, le maintien de l'emploi et l'activité économique font également partie des objectifs nationaux dont il faut tenir compte afin de garder un équilibre global des critères.

3.2.3. Synthèse des critères retenus

Critère 1 (C1) - Concours à l'absorption du CO₂ atmosphérique	
C1a	Développement des puits de carbone
C1b	Réduction des puits de carbone
Critère 2 (C2) - Concours à la réduction des émissions de CO₂ dans l'atmosphère	
C2a	Réduction par effet de substitution-produit
C2b	Réduction par effet de substitution-énergie
C2c	Contrepartie en dépense énergétique et émissions CO ₂
Critère 3 (C3) - Équilibre coût/bénéfice/risque	
C3a	Viabilité économique
C3b	Degré de maturité
C3c	Synergie avec d'autres bénéfices associés
C3d	Sensibilité aux aléas et aux évolutions structurelles
Critère 4 (C4) - Compatibilité avec d'autres objectifs de politique publique	
C4a	Autres objectifs environnementaux
C4b	Autres objectifs de sécurité, souveraineté, ...

3.3. Proposition d'un outil d'aide à la décision, basé sur un croisement « activités & critères »

Les différents critères et sous-critères proposés ci-dessus peuvent être différemment pondérés, selon les priorités déterminées par le décideur public.

Par exemple, un décideur pourra, dans une optique de réduction des émissions de CO₂ durant cette décennie (au regard du rehaussement des ambitions européennes), choisir de mettre l'accent sur des critères C2 de type « *potentiel de réduction d'émission par substitution-matériau ou substitution-énergie* », ou des critères C3 de type « *viabilité économique de la mobilisation de biomasse* » et « *synergie avec d'autres bénéfiques associés* », tout en posant des jalons pour le long terme en vue de la contribution à la neutralité carbone à l'horizon 2050 (en mettant l'accent, par exemple sur des critères C1 de type « *développement des puits carbone et préservation des puits lors de la collecte* »).

Nous avons pris le parti ici, de faire déboucher ce rapport sur une grille d'analyse des « activités & critères », qui permettent d'organiser la réflexion et la délibération.

À cette fin, le présent rapport propose en annexe un tableau de croisement des activités et des critères. Ce tableau constitue **un outil d'aide à la décision et à la programmation**, que chaque décideur peut s'approprier et adapter à son domaine d'activités. Il pourra s'en inspirer et indiquer une qualité ou valeur à chaque intersection activité/critère concernée par son domaine d'action.

3.4. Éléments de conclusion

Ce rapport propose, comme principale contribution, une méthode pour définir des critères pour éclairer les décisions sur l'utilisation de la biomasse qui soit la plus opérationnelle possible. Notamment, en matière de mobilisation et d'usage des biomasses, le rapport vise à proposer un ensemble d'outils permettant à chaque décideur de lister les actions *a priori* « *sans regret* », à moyen terme.

Au-delà de cette contribution que nous espérons utile, extraire des conclusions d'un exercice aussi complexe que l'examen de l'« *ensemble des usages* » de l'« *ensemble des ressources de biomasse* » n'est pas chose aisée. Nous souhaitons toutefois partager quelques convictions formées au travers des échanges au sein de notre groupe de travail.

La SNBC, comme cela a été souligné, définit de très hautes ambitions concernant les usages de la biomasse afin de « *décarboner la production d'énergie* » et d'« *augmenter les puits de carbone* ». En cohérence, il nous paraît important de veiller aux activités présentant le plus fort levier pour l'atteinte de ces objectifs, soit :

- la préservation et le développement des puits naturels notamment pour la biomasse à cycle long de reconstitution ;
- la « *substitution énergie* » dans le respect de critères de durabilité et de réduction effective des émissions de GES par rapport à l'utilisation d'énergie fossile pour la même efficacité, ce qui oriente notamment vers le recours à des biomasses végétales à cycle court ou issues du recyclage dans le cas de biomasse végétales à cycle long, ou vers des biomasses non végétales, en coactivité ou usage en cascade ;
- enfin la « *substitution matériau* » à usage long, domaine prometteur pour constituer des puits de carbone, objet à la fois de développements et d'expérimentations nombreuses.

Concernant les « *puits de carbone* », il est fondamental de prendre en compte les perturbations de l'écosystème forestier sous l'impact du changement climatique qui se traduit par une réduction de sa capacité de stockage du carbone (sécheresse, incendies, attaque de parasites, constat qui, malheureusement, n'est pas circonscrit à la France). Dès lors, il nous paraît évident que le principe d'une neutralité appliqué au cas des émissions de CO₂ biogénique n'est pas à prendre pour acquis.

D'où l'importance que nous souhaitons mettre, en conclusion, sur les efforts de maintien et de reconstitution des puits et sur l'impérative réduction des émissions de CO₂ (y compris celui biogénique), dès lors que l'atteinte de la neutralité, en mobilisant ce levier, est rendue plus incertaine.

Concernant les usages énergétiques des biomasses passées en revue dans ce rapport, et malgré les limites soulignées (notamment, le traditionnel point de tension entre « *food* », « *feed* » et « *fuel* » qui trouve plus encore d'acuité depuis le début du conflit en Ukraine), il importe de rappeler qu'il n'est pas identifié à ce jour d'énergies alternatives sans impact sur le cycle du CO₂ et l'environnement. Dès lors, la vigilance doit porter sur les conditions d'un usage soutenable de la biomasse en matière énergétique et cela d'autant plus que la directive REDII fonde les politiques publiques européennes, en particulier pour la décarbonation de la mobilité lourde et des autres segments "*hard to abate*" (difficile à réduire), sur cet usage accru. Autrement dit, il importe de définir un « *ordre des mérites* » dans les usages énergétiques de la biomasse et de les privilégier dans les domaines où ils présentent un intérêt différenciant en matière de décarbonation.

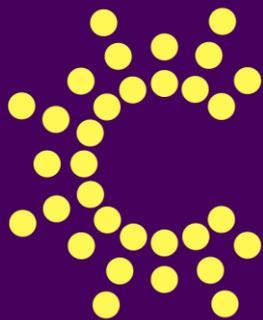
L'une des principales questions est de savoir comment valoriser en coactivité ce qui peut l'être et pour quels usages énergétiques prioritaires en tenant compte des différents horizons temporels. Le défi est que les politiques publiques à horizon 2050 doivent également être cohérentes avec les objectifs de décarbonation à l'horizon plus court de 2030 pour lequel l'Europe s'est engagée à atteindre une réduction des émissions de CO₂ de 55 %. Cet objectif passe, en particulier, par une hausse de la part des différentes énergies renouvelables dans les secteurs difficiles à décarboner (industrie, mobilité, chauffage) et par un objectif de production de 35 Mm³ de biogaz (doublé dans le cadre du plan REpowerEU, élaboré par la Commission pour réduire la dépendance aux importations de gaz russe). Une mobilisation accrue, pour la production d'énergie, de la biomasse disponible, respectant la priorité aux usages alimentation et aux matériaux à longue durée de vie, ainsi que les critères de durabilité, fait donc partie des solutions à mettre en œuvre tout de suite, mais sans obérer leur potentiel futur comme puits de carbone pour compenser les émissions de GES non réductibles.

La crise actuelle a mis en lumière notamment des questions de sécurité d'approvisionnement, de diversification des sources de production d'énergie (et d'approvisionnement), de résilience du système énergétique. Dans ce contexte, la biomasse peut jouer un rôle significatif y compris dans sa dimension énergétique. En particulier, les événements récents montrent l'intérêt de préserver sur le long-terme un mix énergétique diversifié et équilibré, intégré dans l'économie territoriale, sans opposer les énergies entre elles.

Annexe - Proposition d'outil d'aide à la décision : tableau croisant « activités & critères »

Critères principaux retenus	C1 Contribution absorption CO ₂	C2 Contribution réduction émissions CO ₂	C3 Coûts/bénéfice/risque	C4 Connexité autres objectifs et enjeux
Activités retenues				
Activités de valorisation des biomasses végétales à cycle long				
A1 - Replantation de forêts				
A2 - Gestion sylvicole prenant en compte l'adaptation au changement climatique				
A3 - Gestion sylvicole préservant les sols et écosystèmes				
A4 - Utilisation du bois pour le matériau construction - ameublement - isolation				
A5 - Utilisation du bois pour l'énergie par combustion				
A6 - Utilisation des résidus de bois pour les biocarburants 2G				
Activités de valorisation des biomasses végétales à cycle court				
A7 - Maintien au sol (ou enfouissage) des résidus végétaux de culture				
A8 - Utilisation des résidus de cultures pour des biocarburants (2G)				
A9 - Culture de plantes (oléagineuses) dédiées aux biocarburants (1G)				
A10 - Culture de plantes (miscanthus) dédiées aux biocarburants (2G)				
A11 - Culture de plantes dédiées (CIVE) pour les installations de méthanisation				

Activités de valorisation des biomasses non-végétales				
A12 - Utilisation des résidus d'élevage en méthanisation				
A13 - Alimentation des installations de méthanisation avec des déchets (liquides/solides) issus de collectivités/ménagers				
A14 - Implantation d'installations de traitement des déchets ménagers et industriels				



Comité
de prospective
de la CRE

**ÉCLAIRER
L'AVENIR**