



Biométhane

BIOMETHANE DE GAZEIFICATION

EVALUATION DU POTENTIEL DE PRODUCTION
EN FRANCE AUX HORIZONS 2020 ET 2050

RAPPORT FINAL – FEVRIER 2013

Etude réalisée pour le compte de GrDF par le CRIGEN de GDF SUEZ

Comité de pilotage :
GrDF, ADEME, MEDDE-CGEDD, MEDDE – DGEC, MINEFI – DGTrésor, MINEFI –
DGCIS, MAAF – CEP, MAAF – DGPAAT

SYNTHESE

Démarche de détermination du potentiel biométhane 2G

La présente étude s'attache à déterminer le **potentiel de production de biométhane par des technologies dites de 2^{ème} génération en France** en vue de son injection dans le réseau de gaz naturel à l'horizon 2020 et 2050. En 2012, seule la filière de production de biogaz par méthanisation de déchets organiques suivie d'une mise aux spécifications du biométhane avant injection est fonctionnelle à l'échelle industrielle. Très complémentaire et visant une biomasse différente, de type lignocellulosique, **la filière de production de biométhane de 2^{ème} génération (2G) par gazéification et méthanation est encore au stade du pilote de R&D et son industrialisation est envisagée à l'horizon 2020.**

Le potentiel biométhane 2G est estimé à partir de la source d'énergie primaire à la base de sa filière : la **biomasse lignocellulosique (bois, pailles,...)**. Il s'agit ensuite de déduire de l'intégralité de la ressource lignocellulosique existante la part qui n'est pas accessible ou qui est déjà valorisée, afin de ne considérer finalement que la ressource disponible pour de nouveaux usages, dont la production de biométhane 2G.

Une fois la ressource accessible pour la production de biométhane 2G obtenue, **des scénarios technologiques sont appliqués** afin d'estimer quantitativement le potentiel de biométhane qui peut être produit, puis enfin injecté.

Les biomasses dans le périmètre de l'étude sont :

- Biomasse forestière ;
- Produits Connexes de scierie, déchets bois fin de vie et boues de papeterie ;
- Coproduits agricoles (pailles) ;
- Cultures énergétiques (méthodologie dédiée) ;
- Coproduits d'industries agroalimentaires.

2020 et 2050 : deux exercices prospectifs distincts

Pour 2020, l'étude se borne à une extrapolation de la situation 2012 sur la disponibilité de la biomasse lignocellulosique.

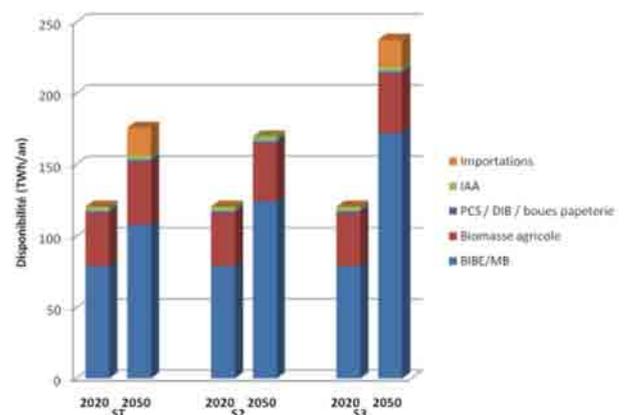
A l'horizon 2050, un exercice de prospective a été réalisé. **3 scénarios ont été construits**, avec chacun des indicateurs tels que le taux de retour

au sol pour les pailles et les menus bois, la surface disponible, prenant des valeurs différentes :

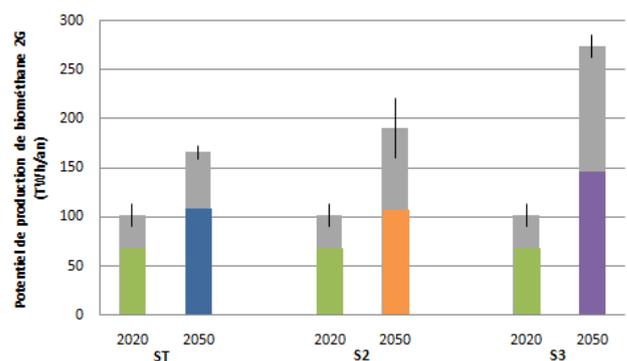
- **ST** : scénario tendanciel extrapolé de la situation actuelle ;
- **S2** : scénario de développement durable de la biomasse énergie dans une optique de prise en compte de l'équilibre entre les usages et dans un contexte de sobriété énergétique ;
- **S3** : scénario de développement fort de la biomasse énergie sans considération de durabilité à long terme.

Un potentiel élevé de biomasse énergie, pouvant être dédié à la production de biométhane 2G

Les résultats de disponibilités de biomasse sont représentés sur la figure ci-dessous (hors cultures énergétiques) :



Le calcul du potentiel technique biométhane a été déterminé en appliquant sur le potentiel biomasse primaire des rendements de conversion compris entre 45 et 65 % selon le scénario technologique retenu (potentiel induit par les cultures énergétiques en gris) :



Le potentiel technique de production de biométhane 2G, pour 2020 et 2050 varie de 100 à un maximum de 250 TWh/an selon le scénario envisagé (cultures énergétiques comprises). Ce potentiel est à comparer aux 400 TWh consommés en 2011 en gaz naturel sur le territoire français et confirme l'intérêt de la filière au regard des objectifs du Grenelle de l'Environnement. L'étude montre également que ce potentiel significatif a pu être atteint en raison de la flexibilité des technologies et du rendement énergétique élevé dont bénéficie la filière (56 % à 65 % selon les configurations techniques), cette filière technologique bénéficiant tout particulièrement à un modèle économique décentralisé et très intégré localement. Enfin les résultats mettent en évidence le fait qu'aux horizons 2020 et 2050, la ressource forestière constituera toujours la ressource de base pour les plans d'approvisionnement des unités de valorisation énergétique.

CADRE DE L'ETUDE

Financement et réalisation

Cette étude a été financée par GrDF et réalisée en 2012 par le Centre de Recherche et d'Innovation Gaz et Energies Nouvelles (CRIGEN) de GDF SUEZ.

Equipe de suivi GrDF :

- Catherine Foulonneau, Déléguée Stratégie Régulation
- Anthony Mazzenga, Chef du Pôle Stratégie

Equipe de réalisation CRIGEN :

- Marc Perrin, Responsable du Programme R&D Gazéification Biomasse
- Olivier Guerrini, Chef de Projet
- Marie Bessières, Ingénieur de Recherche

L'équipe CRIGEN remercie le FCBA (Institut Forêt Bois Cellulose Ameublement) pour son appui technique.

Comité de pilotage

GrDF remercie vivement les membres du comité de pilotage pour leur participation, leurs apports à l'étude, la lecture des documents et leurs commentaires et suggestions. Le comité de pilotage pour l'étude était formé par :

- Bruno Gagnepain, Aude-Claire Houdon et Caroline Rantien, ADEME
- Sylvie Alexandre, MEDDE – CGEDD
- Nadia Boukhetaïa, MEDDE – DGEC
- Laure Lampin et Raphaël Contamin, MINEFI – DGTrésor
- Michel Aribart, MINEFI – DGCIS
- Julien vert, MAAF – CEP
- Valérie Dermaux et Léa Molinié, MAAF – DGPAAT

Malgré la rigueur apportée à la collecte des données, des erreurs, omissions ou inexactitudes peuvent s'insérer dans cette étude. Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs. Les interprétations, positions et recommandations figurant dans ce rapport ne peuvent être attribuées aux membres du comité de pilotage.

A PROPOS DE GrDF

Créé le 31 décembre 2007, GrDF, filiale à 100 % de GDF SUEZ, regroupe les activités de distribution de gaz naturel en France. Dans les zones géographiques où il est concessionnaire de la distribution de gaz naturel, GrDF achemine le gaz naturel de l'ensemble des fournisseurs **pour l'ensemble des consommateurs** via un réseau qu'il construit, développe, entretient et exploite en veillant à la sécurité de tous.

Dans le cadre de ses missions de service public, GrDF assure le développement des réseaux de gaz naturel sur le territoire : « **sur le territoire qu'il dessert, GrDF contribue au développement du réseau de distribution de gaz naturel en tant que celui-ci constitue un outil essentiel de la politique énergétique française visant à apporter aux consommateurs des solutions énergétiques, en particulier de chauffage, performantes aux plans économique et environnemental** » (extrait du contrat de service public)

Ainsi, GrDF accompagne le développement des solutions innovantes et performantes en lien avec les filières, dans le domaine **du bâtiment, de l'industrie, de la mobilité** mais également dans le domaine de production **d'énergie renouvelable avec l'injection de biométhane dans le réseau et sa valorisation.**

A PROPOS DE GDF SUEZ - CRIGEN

Le CRIGEN (Centre de Recherche et Innovation Gaz et Énergies Nouvelles) est un centre de recherche de GDF SUEZ situé en région parisienne ; il regroupe 403 collaborateurs et gère un portefeuille de 1 166 brevets.

Ses travaux portent sur :

- le développement d'offres pour les différents publics (résidentiel, industriel, collectivités...),
- les énergies nouvelles (renouvelables, stockage d'énergie, captage et stockage de CO₂...),
- les infrastructures gazières (sécurité, performance...),
- le GNL,
- les innovations web et les solutions de mobilité du poste de travail.

Projet GAYA : industrialisation d'une filière innovante de production de biométhane

Le démarrage effectif du projet GAYA, coordonné par le CRIGEN, a eu lieu en 2010. Ce projet vise à développer une filière industrielle de production de biométhane **par gazéification de la biomasse, l'une des énergies renouvelables** présentant le plus fort potentiel de développement en France et en Europe. Il est marqué par la signature de grands partenariats technologiques, **la validation de l'aide de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie Française par la Commission Européenne**, et le lancement des travaux de R&D avec des partenaires privés et universitaires. **Il repose sur la construction et l'exploitation pendant sept ans d'une plateforme de démonstrateurs préindustriels sur l'ensemble de la filière.**

Pour plus d'informations : www.projetgaya.com

SOMMAIRE

1.	INTRODUCTION	6
1.1.	Contexte de l'étude	6
1.2.	Approche méthodologique de l'étude	7
2.	DESCRIPTION DE LA CHAINE DE PRODUCTION DU BIOMETHANE DE 2 ^{EME} GENERATION	10
2.1.	Gazéification	10
2.2.	Lavage / Epuration [2]	11
2.3.	Méthanation	12
2.4.	Mise aux spécifications [3]	12
2.5.	Performances énergétiques et environnementales	13
3.	EVALUATION DE LA RESSOURCE BIOMASSE DISPONIBLE POUR LA FILIERE BIOMETHANE 2G	15
3.1.	Champ de l'étude	15
3.2.	2050 : 3 scénarios à l'étude	16
3.3.	Prospective 2020	18
3.4.	Prospective 2050	27
3.5.	Récapitulatif des résultats	36
4.	Evaluation du potentiel de production de biomethane 2G	39
4.1.	Démarche retenue	39
4.2.	Potentiel de production de biométhane 2G	41
5.	CONCLUSION ET PERSPECTIVES	44
6.	Bibliographie	46

1. INTRODUCTION

1.1. Contexte de l'étude

Le réchauffement climatique, la pollution de notre environnement physique et les tensions sur les ressources fossiles sont autant de défis qui mettent en jeu **l'avenir de nos sociétés**. Dans un contexte de transition énergétique vers un modèle **à plus faible contenu carbone**, **l'innovation doit apporter des réponses à ces défis en parallèle de l'évolution des comportements**. Le vecteur biométhane constitue une énergie prometteuse alliant les performances énergétiques et environnementales du gaz naturel avec le caractère durable des énergies renouvelables.

La production de biométhane injectable dans le réseau est d'ores et déjà une réalité technique et économique avec la filière de méthanisation constituée d'une étape de digestion anaérobie de déchets organiques (déchets municipaux, boues de STEP, déchets agricoles,...) permettant la production d'un biogaz suivie d'une étape d'épuration du biométhane afin d'atteindre les spécifications énergétiques du gaz naturel et d'être injecté dans le réseau. Cette dernière étape est en 2012 une réalité réglementaire en France avec la publication au journal officiel des arrêtés autorisant l'injection de biométhane dans les réseaux de gaz.

Une fois injecté le biométhane peut être utilisé pour tous les usages domestiques du gaz (chauffage, cuisson, eau chaude sanitaire), collectifs (chauffage, réseaux de chaleur), tertiaires et industriels (chaleur, vapeur). Il est aussi directement utilisable dans les véhicules fonctionnant au GNV comme carburant gaz naturel (bus, bennes à ordures ménagères, camions de livraison, véhicules légers des collectivités ou des entreprises, tracteurs). Il peut également être utilisé comme énergie primaire **pour produire de l'électricité verte, combinée avec une cogénération de chaleur** pour atteindre une efficacité énergétique élevée (70 – 85 %).

Quelque soit son mode de production (méthanisation, 2^{ème} ou 3^{ème} génération) il ne requiert aucune adaptation des usages traditionnels du gaz et peut être utilisé en toute sécurité, sans adaptation ni investissement supplémentaire comme cela est le cas pour d'autres combustibles (E85, biodiesel B30,...).

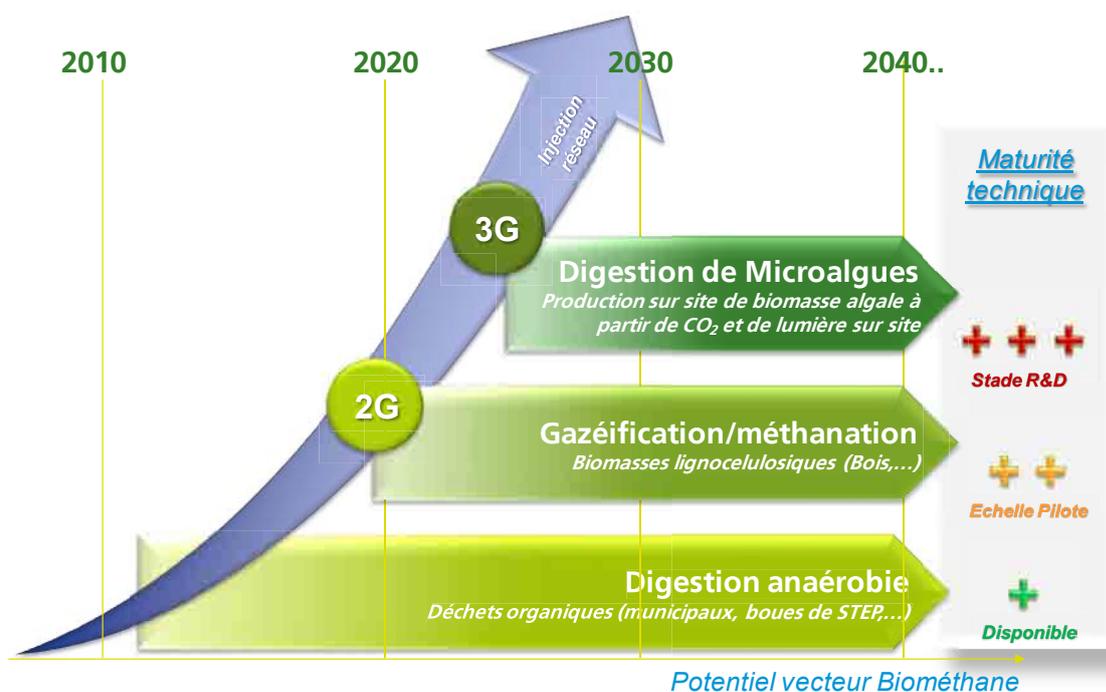


Figure 1 : Les différentes technologies de production du biométhane dans le temps

Sur la base des bénéfices environnementaux constatés au travers du déploiement industriel de la méthanisation organique, les acteurs du domaine souhaitent aujourd’hui étendre ce potentiel technique via des procédés innovants permettant de valoriser de nouvelles ressources de biomasse. Parmi ces filières dites de nouvelle génération on peut citer la filière de 2^{ème} génération qui cible les biomasses lignocellulosiques (type bois, pailles,...) actuellement en développement à l’échelle pilote, ainsi que les filières de 3^{ème} génération qui ambitionnent à plus long terme la production de biométhane en produisant directement leurs propres ressources en biomasse sur site (Figure 1).

Bien que ces nouvelles générations constituent des sauts technologiques majeurs, leur intégration dans la sphère applicative du biométhane pourra se réaliser de manière complémentaire et transparente pour l’utilisateur final. Les nouvelles générations seront appelées à se développer et à cumuler leur potentiel en complément de la méthanisation de déchets qui poursuivra son développement avec ses bénéfices environnementaux significatifs. La détermination de leur potentiel technique représente aujourd’hui un enjeu majeur pour les opérateurs de réseau ainsi que pour les énergéticiens afin de préparer la transition énergétique et les investissements à venir.

GrDF est en charge de la construction, de l’entretien et de l’exploitation de la majeure partie du réseau français de distribution de gaz naturel, pour le compte des collectivités locales et est à ce titre impliqué, avec les professionnels du biométhane, dans la co-construction de cette nouvelle filière.

Le potentiel de production de biogaz de déchets a été évalué par une précédente étude menée par l’AFGNV et l’ADEME [1]. GrDF souhaite désormais quantifier, à l’horizon 2020 à 2050, le potentiel de production et d’injection de biométhane de 2^{ème} et de 3^{ème} génération. **La présente étude constitue l’un des deux volets de ce travail et porte sur l’évaluation du potentiel technique du biométhane de 2^{ème} génération.**

1.2. Approche méthodologique de l’étude

Le potentiel réel d’une énergie renouvelable telle que le biométhane doit être estimé à partir de la source d’énergie primaire à la base de sa filière : la biomasse lignocellulosique. Il s’agit ensuite de déduire de l’intégralité de la ressource lignocellulosique disponible la part qui n’est pas accessible ou qui est déjà valorisée, afin de ne considérer finalement que la ressource disponible pour de nouveaux usages, tel que la production de biométhane 2G.

Une fois la ressource accessible pour la production de biométhane 2G évaluée sur la base de données issues d’études antérieures, des scénarios technologiques sont appliqués afin d’estimer quantitativement le potentiel de biométhane qui peut être produit, puis enfin injecté. La Figure 2 présente les grandes étapes de l’étude :



Figure 2 : Approche séquentielle retenue pour l’étude du potentiel biométhane 2G

Le potentiel primaire en biomasse lignocellulosique est limité dans la réalité par un certain nombre de paramètres liés à l’environnement technique (capacité mécanique à mobiliser la ressource, impossibilité d’accès à certaines zones géographiques,...), **à l’environnement économique** (coût de mobilisation, rentabilité des filières de production et d’exploitation dans les zones visées, compétition entre filières pour l’accès à la ressource,...) **et enfin réglementaires et sociétales** (législation environnementale, part de ressources primaires mobilisable, gestion raisonnée de certaines ressources pour la filière visée...).

L’appréciation de ces différentes limitations, qui constitue la première partie de l’étude, est donc indispensable à l’estimation du potentiel en ressource primaire réellement accessible pour la filière industrielle de production d’énergie renouvelable visée.

La Figure 3 présente la démarche retenue dans la 1^{ère} partie de l’étude visant à déduire, à partir de la ressource en biomasse lignocellulosique totale, la disponibilité en biomasse pour l’approvisionnement d’installations industrielles de production de biométhane 2G.

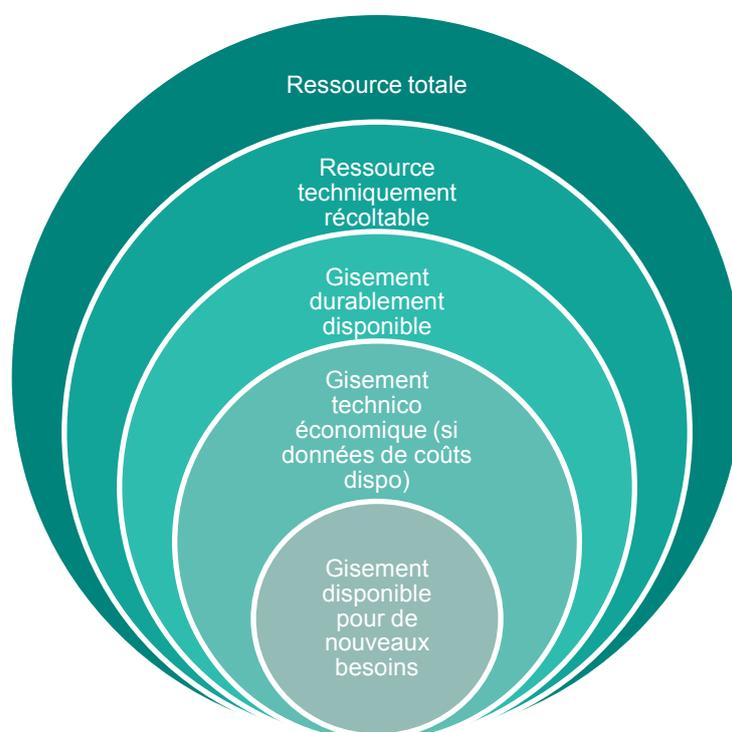


Figure 3 : Représentation schématisée des différentes échelles de potentiels de mobilisation de la ressource

Parmi les « nouveaux besoins », on peut par exemple citer la chimie du végétal, l’utilisation de la paille comme isolant, la production de biocarburant liquide, la production de biogaz par méthanisation... Il n’est pas possible à l’heure actuelle de déterminer une clef de répartition de la biomasse entre ces différents usages aux horizons 2020 et 2050. C’est pourquoi, dans cette étude, **toute la disponibilité en biomasse pour de nouveaux usages est présentée, sans prise en compte de compétition entre usages**.

A partir de la ressource disponible pour de nouveaux usages, il est ensuite possible de déterminer un potentiel de production de biométhane 2G en appliquant des scénarios technologiques (différentes chaînes de procédés de production de biométhane, différents rendements énergétiques...).

Dans cette étude, toute la biomasse disponible pour de nouveaux usages est considérée comme convertie en biométhane 2G. On ne prend pas en compte les compétitions avec les usages concurrentiels nouveaux (chimie du végétal, isolation paille,...) et entre usages énergétiques (production de carburants liquides, chaufferies bois...).

Une fois le potentiel de production de biométhane 2G déterminé, il convient **d'étudier la part injectable sur le réseau de gaz naturel français.**

En ce qui concerne la **Partie 3 « Potentiel d'injection »**, des réflexions préliminaires ont montré que les **conditions d'injectabilité d'un biométhane 2G aux spécifications sur les réseaux de transport et de distribution du gaz naturel doivent faire l'objet d'une définition plus approfondie et « au cas par cas », ce qui n'est pas envisageable pour l'instant au travers d'une étude globale. Il faudrait approfondir :**

- La possibilité ou non pour le biométhane de passer par les stockages de gaz naturel, via une injection sur le réseau de transport, selon la période et **les recommandations à venir de l'opérateur de stockages ;**
- La **possibilité ou non d'injecter sur le réseau de distribution MPc (moyenne pression), selon la structure et les consommations (en particulier estivales) de l'exploitation en aval ;**
- ...

Une évaluation très précise du potentiel injectable global en France nécessiterait donc des études poussées à la maille « exploitation » sur l'ensemble de la France.

Néanmoins, les informations actuelles montrent que la fourchette de débits de biométhane 2G produits par les futures installations industrielles (500-40 000 Nm³/h) sont faibles au regard des débits de gaz naturel transitant sur le réseau de transport français (plusieurs centaines à quelques millions de Nm³/h). Le réseau de gaz Français apparaît donc en capacité d'accepter le potentiel technique des différentes technologies de production de biométhane. Des études sont par ailleurs en cours chez l'opérateur du réseau de transport afin d'autoriser à moyen terme l'injection de biométhane. **L'hypothèse que l'intégralité du potentiel de production peut être injectée sur le réseau de transport français (national et régional amont) sera faite dans le cadre de cette étude.**

Par ailleurs, cette étude prospective est réalisée à deux horizons de temps : 2020 et 2050. Les démarches adoptées dans les deux cas ne sont pas les mêmes. Pour 2020, on s'appuiera sur des études prospectives existantes, décrivant principalement les ressources en biomasse disponibles ainsi qu'une estimation de la demande existante. Des éléments de coûts permettant de restreindre la ressource à la part effectivement accessible sont également dans quelques cas évalués dans ces études.

En revanche, pour 2050, très peu d'informations sont disponibles dans la littérature. L'approche retenue consiste à réaliser des scénarios d'offres de biomasse lignocellulosique. Ces scénarios sont ancrés dans des contextes économiques et politiques différents et sont décrits par des indicateurs tels que le taux de pertes de récolte ou d'exploitation, l'évolution de l'usage des sols (surfaces forestières, arables...)... L'estimation de la ressource biomasse disponible s'opère ensuite en suivant la démarche présentée Figure 3.

2. DESCRIPTION DE LA CHAÎNE DE PRODUCTION DU BIOMÉTHANE DE 2^{ÈME} GÉNÉRATION

On appelle biométhane de seconde génération un gaz naturel de substitution, produit par voie thermo-chimique, et mis aux spécifications requises pour son injection dans le réseau de gaz naturel.

Afin de produire du biométhane de seconde génération à partir des différentes biomasses, plusieurs opérations unitaires de procédé sont nécessaires. La Figure 4 présente l'enchaînement de ces étapes unitaires, décrites ci-dessous.

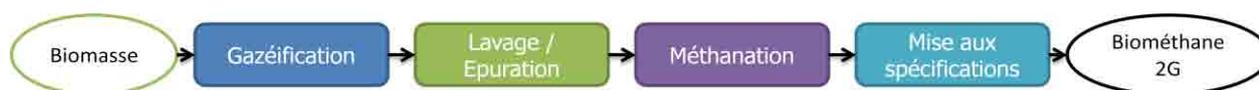


Figure 4 : Chaîne de procédé de production de biométhane 2G

La première étape consiste à gazéifier la biomasse. Cela permet d'obtenir un gaz dit « pauvre » car son contenu énergétique est nettement inférieur à celui du gaz naturel. Il contient du méthane, composant majoritaire du gaz naturel et donc du biométhane que l'on cherche à obtenir, de l'eau, du monoxyde de carbone (CO), du dioxyde de carbone (CO₂), mais également des polluants. Ces derniers, bien que présents en faible quantité, sont nocifs pour le procédé catalytique aval : la méthanation. En effet, cette étape unitaire, qui consiste à enrichir le gaz de synthèse en méthane afin de se rapprocher de la composition du gaz naturel, nécessite le recours à un catalyseur, qui peut être désactivé par ces polluants. L'étape de méthanation est donc précédée d'une étape de lavage / épuration qui permet d'éliminer ces polluants. En sortie de la méthanation, le gaz de synthèse contient essentiellement du méthane, mais il reste encore de l'eau et du CO₂. Or pour injecter le biométhane dans le réseau de gaz naturel, celui-ci doit satisfaire les spécifications requises par le distributeur (GrDF en France) et le transporteur (GRTgaz par exemple). Une étape de séparation des gaz est donc ajoutée en bout de chaîne de procédés afin de parvenir aux spécifications du réseau.

2.1. Gazéification

La gazéification est le premier procédé de transformation de la biomasse. Il s'agit de transformer la matière première en un gaz appelé gaz de synthèse ou syngaz. Ce gaz contient essentiellement de l'eau, du monoxyde de carbone (CO), de l'hydrogène (H₂), du dioxyde de carbone (CO₂) et du méthane (CH₄). La réaction de gazéification est un processus complexe qui s'opère en présence d'un agent oxydant introduit en défaut, et produit le gaz de synthèse voulu. Elle est précédée d'une première étape de pyrolyse qui produit par décomposition thermique un gaz formé d'un mélange de gaz condensables et incondensables et un char, sorte de charbon de bois résiduel. C'est une partie de ce char qui est ensuite transformée en gaz de synthèse par gazéification. Cette réaction peut être vue comme une combustion incomplète puisque l'agent oxydant est en quantité insuffisante pour réaliser la combustion du bois. La réaction de pyrolyse étant endothermique, il faut apporter de la chaleur au procédé. Pour cela, il est par exemple possible de brûler dans un réacteur séparé une partie du char généré ou d'oxyder une partie du gaz de synthèse produit afin de dégager la chaleur nécessaire au procédé.

Il existe différentes technologies de gazéification : lit fixe, fluidisé et entraîné. Des tableaux de présentation de ces technologies sont disponibles en Annexe 1 .

2.2. Lavage / Epuration [2]

Le gaz de synthèse ou syngaz ainsi obtenu après gazéification contient, outre CO, H₂, CO₂, CH₄, H₂O..., différents composés produits lors de la gazéification et néfastes pour certains équipements situés en aval. Il faut donc les éliminer à ce stade du procédé. Ces composés sont principalement des goudrons et certains inorganiques soufrés.

De manière générale les goudrons peuvent être définis comme un « ensemble des composés organiques lourds produits lors d'un traitement thermique de biomasse ». Les goudrons (aussi appelés « tars » dans la littérature) représentent un ensemble complexe d'hydrocarbures condensables, composés d'un ou plusieurs cycles aromatiques incluant parfois un ou plusieurs hétéroatomes. La littérature regorge de définitions qui sont presque aussi nombreuses que le nombre de composés.

Il est aussi courant de définir les goudrons comme l'ensemble des composés plus lourds que le benzène (78 g/mol) ou comme l'ensemble des composés dont la température d'ébullition est supérieure à 150°C.

Les goudrons issus de la gazéification de la biomasse forment un mélange complexe pouvant comporter plusieurs centaines de composés.

Les différents composés contenus dans le gaz de synthèse peuvent impacter les unités en aval du gazéifieur :

- Les particules peuvent entraîner le colmatage ou l'abrasion des conduites ;
- Les composés acides accélèrent la corrosion ;
- Les goudrons peuvent obstruer les garnissages et les conduites. La condensation des goudrons est à l'origine de problèmes d'encrassement qui débouchent inévitablement sur des dysfonctionnements des équipements. La présence de goudrons impacte lourdement les coûts d'entretien et les temps de cycles des filtres, augmentant par conséquent les coûts opératoires ;
- Les goudrons sont un réel poison pour le catalyseur de méthanation (à base de nickel), qui se désactive par cokage. Des teneurs aussi faibles que possible en goudrons sont indispensables pour garantir l'activité du catalyseur sur la durée.

Il existe un grand nombre de technologies pour l'élimination des goudrons. On rencontre couramment des solutions de **condensation et d'absorption des goudrons au moyen d'un solvant organique** par exemple ou des systèmes de traitement à haute température tels que des craqueurs thermiques ou des vaporeformeurs.

Pour éliminer les composés inorganiques, également néfastes pour le catalyseur, un procédé d'adsorption peut être utilisé. Ici, ce sont les composés chlorés et soufrés que l'on va épurer grâce à ce procédé. Dans un premier temps, le gaz de synthèse est comprimé. Il est ensuite envoyé dans une **colonne d'adsorption sur charbons actifs** où une grande partie du H₂S et du COS est éliminée. Enfin, après préchauffage le gaz de synthèse est traité dans une **colonne à lit fixe de ZnO** où le H₂S résiduel et le HCl sont chimisorbés. D'autres procédés tels que les systèmes SELEXOL ou RECTISOL initialement développés pour la filière charbon peuvent être utilisés mais restent plutôt adaptés aux filières de grandes puissances, peu compatibles avec la ressource biomasse.

2.3. Méthanation

La méthanation est une réaction chimique découverte par Paul Sabatier au début du 20^{ème} siècle permettant la conversion sur des catalyseurs à base de Nickel de l'hydrogène et du monoxyde de carbone en méthane et pour laquelle il reçut le prix Nobel de chimie en 1912.

C'est une réaction catalytique fortement exothermique. L'énergie dégagée sous forme de chaleur à haute température doit être évacuée de la zone catalytique et peut être valorisée sous forme de vapeur sur le site industriel ou à l'extérieur (autre industrie, réseau urbain...). Le catalyseur utilisé est généralement à base de nickel bien que d'autres formulations existent. **On obtient en sortie de méthanation un gaz riche en méthane**, mais contenant encore de l'eau, du CO₂ et de l'hydrogène.

2.4. Mise aux spécifications [3]

L'injection de biométhane sur les réseaux de distribution et de transport du gaz naturel implique au préalable un **ajustement de sa qualité à un niveau équivalent à celle du gaz naturel** afin de respecter les **spécifications requises par les opérateurs de réseau**.

Des étapes de séparation doivent être entreprises sur le gaz de méthanation brut pour :

- ajuster son pouvoir calorifique (**PCS**) et atteindre l'**Indice de Wobbe** (W) requis¹ ;
- éliminer les **composés** pouvant présenter des risques vis-à-vis des ouvrages et consommateurs².

Lors de cette mise aux spécifications, plusieurs étapes de séparation doivent être entreprises afin de relever le **pouvoir calorifique, d'atteindre l'indice de Wobbe requis et d'éliminer les composés non admis dans les réseaux** (H₂O,...). Cette chaîne, telle qu'envisagée actuellement sur les bases des travaux de recherche menés chez GDF SUEZ sur la production de biométhane injectable, comprend différentes étapes de séparation, dont les principales sont :

- **une condensation de l'eau** combinée à une déshydratation poussée,
- **une séparation du dioxyde de carbone** présent à hauteur de près de 45% molaire sec dans le mélange issu du réacteur de méthanation en configuration standard (mélange stœchiométrique, température et pression optimales...),
- l'abaissement des teneurs en azote, hydrogène et éventuellement monoxyde de carbone afin d'atteindre *in fine* le PCS et l'indice de Wobbe requis.

Après passage dans ces différents procédés de séparation, basés sur l'absorption (physique ou chimique), ou la perméation membranaire ou l'adsorption sur solide (ou leurs combinaisons), le biométhane obtenu est prêt à être injecté dans le réseau.

Le Tableau 1 présente un exemple de composition arrondie du gaz de synthèse en sortie des différentes étapes décrites ci-dessus.

¹ Ici, les spécifications françaises actuelles pour le gaz H sont considérées : 10,7 < PCS < 12,8 kWh / Nm³, 13,7 < W < 15,70 kWh / Nm³.

² Principalement CO₂, H₂O (corrosion,...), H₂ (effet possible sur le fonctionnement des brûleurs, ...) : les autres composés « indésirables » (soufrés, chlorés, BTEX, ammoniac, ...) sont traités dans le syngas en amont ou lors de la méthanation.

	Sortie Gazéifieur	Sortie lavage	Sortie Réacteur de Méthanation	SNG
H2	29,00%	39,00%	5,50%	6,90%
CO	16,00%	21,00%	0,50%	0,10%
CO2	15,00%	20,00%	22,00%	2,50%
CH4	7,00%	9,00%	39,50%	90,50%
C2H4	2,00%	3,00%	0,00%	0,00%
H2O	30,00%	8,00%	32,50%	0,00%
Goudrons	1,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Tableau 1 : Exemple de composition du gaz de synthèse à différents endroits du procédé de production de biométhane 2G

2.5. Performances énergétiques et environnementales

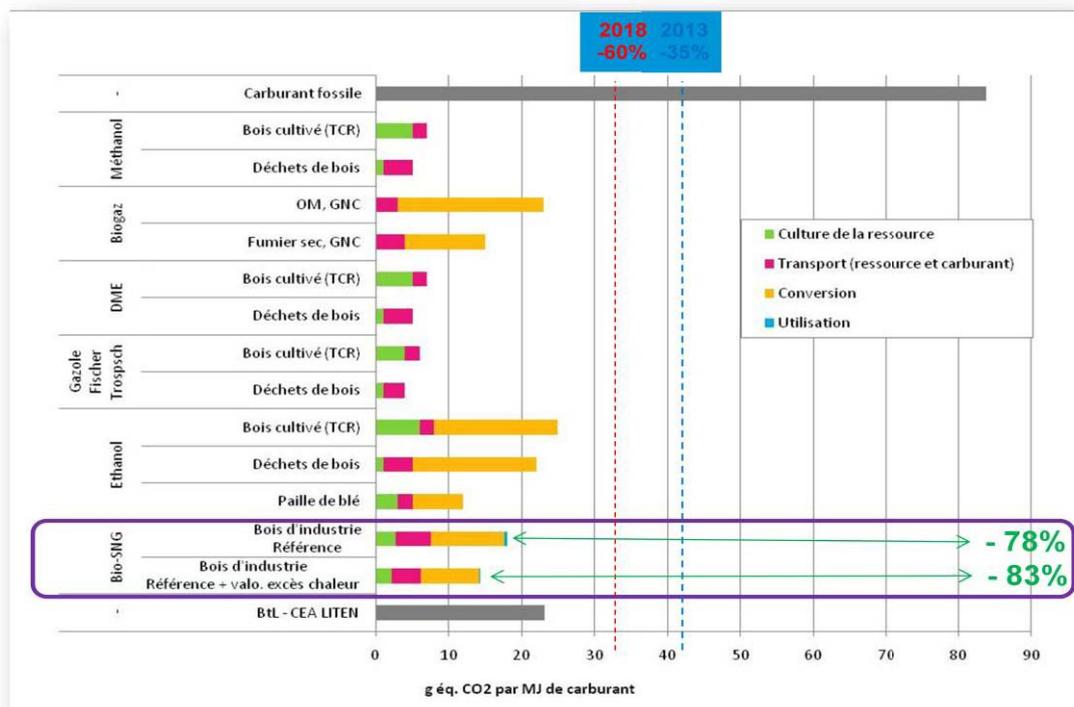
La performance énergétique de la chaîne de production est évaluée au moyen de son rendement énergétique de conversion. **On appelle rendement énergétique le rapport entre l'énergie contenue dans le biométhane 2G produit et l'énergie contenue dans la biomasse** en entrée du procédé. Ainsi, sur l'installation pilote de Güssing (Autriche) où une production de 1 MW de biométhane 2G a été réalisée, le rendement de conversion démontré a été de 56 %. Ce rendement diffère légèrement en fonction des technologies de gazéification considérées. La Figure 5 schématise cette transformation.



Figure 5 : Rendement énergétiques de la filière

Une autre caractéristique du procédé de production de biométhane 2G concerne la chaleur disponible. En effet, certaines réactions du procédé dégagent de la chaleur. Celle-ci peut être valorisée sous forme de chaleur chez des industriels, ou bien encore en réseau de chauffage urbain. Cette chaleur valorisable n'est pas négligeable. En effet, à titre d'exemple, **pour une chaîne de production de biométhane 2G ayant un rendement énergétique de 56 %, il est possible d'atteindre un rendement global compris entre 70 et 74 % en considérant une valorisation de la chaleur produite.**

Un autre aspect à considérer est le bénéfice en terme de diminution d'émissions de gaz à effet de serre de la filière par rapport aux carburants fossiles. En effet, la matière première est de la biomasse, renouvelable. La Figure 6 présente une comparaison des émissions de CO₂ entre les différentes filières de production de biocarburants existantes. Pour le bio-SNG, les résultats sont ceux de l'Analyse de Cycle de Vie réalisée dans le cadre du projet ANR VeGaz. Les autres données proviennent de la Directive 2009/28/CE.



Données par défaut : Directive 2009/28/CE

Résultats GAYA
Projet ANR VeGaz

TCR : Taillis Courte Rotation / OM : Organic material / GNC : Gaz Naturel Carburant

Figure 6 : Bilan environnemental des filières de production de biocarburants

3. EVALUATION DE LA RESSOURCE BIOMASSE DISPONIBLE POUR LA FILIERE BIOMETHANE 2G

3.1. Champ de l'étude

La première étape de détermination du potentiel biométhane 2G consiste à quantifier la quantité de ressources accessible à cette filière, en entrée de la chaîne de procédés décrite au paragraphe 0. **L'un des avantages de la filière de seconde génération par rapport aux agrocarburants est de pouvoir accepter des biomasses lignocellulosiques, et non plus seulement agroalimentaires.** Le périmètre de cette étude comprend les biomasses suivantes :

Biomasse forestière : il s'agit du bois industrie et bois énergie (BIBE) et du menu bois (MB) aussi connu sous le nom de rémanents forestiers qui proviennent des forêts françaises. La définition des caractéristiques du bois est présentée en Annexe 2. Peupleraies, haies, alignements, arbres épars, vignes, vergers landes et arbres urbains font également partie du champ de l'étude ;

Résidus d'agriculture : cette catégorie comprend dans cette étude les pailles de céréales (blé, orge, seigle et avoine), les pailles de colza, les pailles de tournesol et les cannes de maïs ;

Cultures énergétiques : il s'agit de plantations essentiellement dédiées à être valorisées sous forme énergétique. Il existe des cultures énergétiques qui sont **traditionnellement destinées à l'alimentation, comme le blé** par exemple qui peuvent être utilisées pour la production de biocarburant de première génération. Cette étude ne couvre pas cette catégorie de cultures car elles entrent en compétition avec le secteur alimentaire. Deux types de cultures énergétiques ont été considérées :

D'origine forestière : taillis de courte rotation de saule, peuplier et eucalyptus ;

D'origine agricole : miscanthus et triticales.

Déchets de bois de fin de vie : les déchets « bois fin de vie » correspondent à tous les types de matériaux bois utilisables et/ou recyclables (énergie, matériaux) à la fin de leur utilisation principale.

Produits connexes de scierie (sciures, copeaux de bois...) ;

Boues de papeterie ;

Résidus d'industries agroalimentaires (IAA) : Coproduits de l'industrie du lait (babeurre, lactosérum), de l'industrie du sucre (pulpe, écume, mélasse), de meunerie, d'amidonnerie, de féculerie (pulpe, son, remoulage, farine basse), d'abattoir (déchets de découpe), de conserverie (déchets de poisson), et d'huilerie et de distillerie (colza, soja, tournesol, grignons d'olive).

Il est à noter que certaines de ces biomasses, notamment parmi les résidus d'industries agroalimentaires, sont également méthanisables afin d'obtenir un biogaz, injectable sous certaines conditions dans le réseau de distribution ou valorisable sous chaudière. Les compétitions de valorisation entre ces deux filières ne sont pas considérées dans l'étude. En Annexe 3 est présenté la répartition des différentes ressources et de leur filière de valorisation de l'étude AFGNV.

Pour chacune de ces biomasses, la ressource disponible est estimée pour chaque horizon de temps : 2020 et 2050. On fait l'hypothèse que les volumes d'importations de biomasse énergie à l'horizon 2020 suivront la tendance actuelle et seront donc faibles. C'est pourquoi l'hypothèse est faite dans l'étude de négliger ce volume

d'importations à 2020. **Seules les importations d'ici 2050 sont quantifiées dans les différents scénarios présentés ci-après.**

3.2. 2050 : 3 scénarios à l'étude

Comme précisé au paragraphe 1.2, l'étude prospective à l'horizon 2020 est réalisée à partir d'études déjà publiées ou d'hypothèses extrapolables. En effet, 2020 est une échéance proche, et les exercices prospectifs à cet horizon de temps sont nombreux dans la littérature.

Par contre, peu de données sur des scénarios prospectifs à l'horizon 2050 sont disponibles. Il a donc été choisi, pour la présente étude, de construire trois scénarios d'offre distincts s'appuyant sur des indicateurs techniques et contextuels. Les éléments de contexte constituant chacun des scénarios permettent d'appréhender la situation économique globale dans laquelle l'offre de biomasse se situe à l'horizon 2050 tout en bornant le potentiel réel de développement de la filière. Les trois scénarios décrits n'ont pas vocation à représenter un contexte socio-économique détaillé du pays en 2050. Leur seul but est d'offrir une base contextuelle permettant de décliner ensuite des indicateurs techniques, tel que le retour au sol d'une partie de la biomasse par exemple, afin de réaliser l'exercice prospectif. Les valeurs prises pour ces indicateurs techniques reposent sur les études prospectives 2050 disponibles dans la littérature. Les valeurs prises pour chacun des indicateurs dans les scénarios seront précisées dans les paragraphes de description des résultats prospectifs, par type de biomasse. Les éléments contextuels des trois scénarios sont présentés ci-après.

1.1.1. Scénario tendanciel (ST)

Dans ce scénario, on suppose que la situation à l'horizon 2050 est héritée de la situation constatée ces dernières années en France. D'un point de vue contextuel, cela signifie que les énergies renouvelables, dont la biomasse énergie, se développent, tant à cause de la pression exercée par l'augmentation des prix de l'énergie que grâce à un soutien des Pouvoirs Publics. Ce développement s'effectue linéairement, en suivant la tendance observée depuis le milieu des années 2000 en France. Ainsi, l'évolution de l'usage des sols (répartition entre terres arables, sols bâtis, surfaces boisées...) est extrapolée linéairement de la situation observée au cours de la dernière décennie. Par exemple, on considère que l'évolution des surfaces forestières se poursuit linéairement entre 2006 et 2050. Il en est de même pour la taille du cheptel français... La tendance étant au développement de la biomasse énergie, on considère que les importations de granulés de bois vont augmenter à l'horizon 2050.

1.1.2. Scénario 2 (S2)

Dans ce scénario, on imagine qu'à l'horizon 2050 les prix des énergies correspondent au scénario « 450 ppm » du World Energy Outlook où les politiques énergétiques ambitieuses permettraient une probabilité de 50 % de stabilisation du réchauffement climatique limité à 2°C à horizon 2050. En raison des politiques de maîtrise de la demande et de développement des énergies renouvelables, le prix des énergies conventionnelles se stabilise : en euros constants, le pétrole passe à 90 \$/bl (voir Figure 7) et le gaz naturel en Europe se maintient à 0,5 fois le prix du pétrole. Les politiques énergétiques nouvelles reviennent à valoriser les émissions de CO₂ à 120 \$/tCO₂ sur le marché ETS en 2035. Un tel scénario est donc essentiellement dirigé par des considérations politiques sur la nécessité de réduire les émissions de CO₂ et donc le recours aux ressources fossiles.

Au-delà du prix des énergies et du CO₂ qui traduit ces ambitions, les politiques visent également à la durabilité sur les autres critères : **pression sur les ressources, préservation de la biodiversité...** L'accent est mis sur une utilisation locale des ressources et le recours à des importations **massives de bois énergie n'est pas envisagé**. Les Pouvoirs Publics, au moyen de divers mécanismes incitatifs, ont contribué à créer un cadre propice au développement de la biomasse énergie tout en portant une attention particulière aux problématiques environnementales (retours au sols considérés pour conserver leur fertilité...). Par ailleurs, le développement de

la biomasse énergie s'opère en harmonie avec les autres utilisations de la biomasse (bois d'œuvre, trituration...). D'un point de vue sociologique, les hommes ont modifié leur pratique alimentaire pour tendre vers une réduction des surconsommations. Ce scénario a donc pour vocation de représenter une situation dans laquelle le maître mot est sobriété, tant du point de vue des consommations énergétiques que de celui de l'usage des terres. Le scénario S2 est largement inspiré du scénario Afterres2050 (hypothèses reprises en Annexe 5).

1.1.3. Scénario 3 (S3)

Pour ce scénario, les prix des énergies correspondent au scénario « new policies » du World Energy Outlook qui prolonge les politiques énergétiques actuellement prises ou sur le point de l'être (voir Figure 7). Si les politiques de maîtrise de la demande et de développement des énergies renouvelables sont un peu plus ambitieuses qu'un scénario purement tendanciel, le prix des énergies conventionnels augmente progressivement : en euros constants, le pétrole passe les 120 \$/bl à horizon 2035, ce qui laisse augurer un prix de 150 \$/bl vers 2050, et le gaz naturel en Europe se maintient à 0,5 fois le prix du pétrole. Le prolongement des politiques énergétiques actuelles revient à valoriser les émissions de CO₂ à 45 \$/tCO₂ sur le marché ETS en 2035. Un tel scénario est essentiellement piloté par la volonté à long terme de diminuer la dépendance de l'Europe à des importations de ressources fossiles de plus en plus coûteuses (hors impact du développement potentiel du gaz de schiste), quelles que peuvent être par ailleurs les conséquences induites notamment en matière de pression sur l'environnement.

Cette situation a engendré un développement forcé d'énergies alternatives, dont la biomasse énergie, avec une forte logique d'indépendance énergétique sur des substituts pétroliers. Dans ce scénario, on suppose une utilisation intensive de la biomasse énergie. Le S3 a pour but de fixer une limite haute au recours de la biomasse énergie. On n'accorde cette fois pas la priorité à une gestion durable des terres, mais l'accent est mis sur la production d'énergie, et donc de biométhane, en elle-même. Les rendements d'exploitation sont poussés au maximum et les hommes n'ont pas modifié leurs pratiques par rapport au début du XXI^{ème} siècle. La priorité est donnée à la croissance économique et au bien-être matériel des hommes. Afin de satisfaire des besoins énergétiques conséquents, la biomasse pourra également être importée de l'étranger (Canada ou Etats-Unis par exemple). Ce scénario d'offre s'appuie quant à lui sur le scénario AG0 du projet Agrimonde (description en Annexe 6).

Figure 1.1 • Average IEA crude oil import price

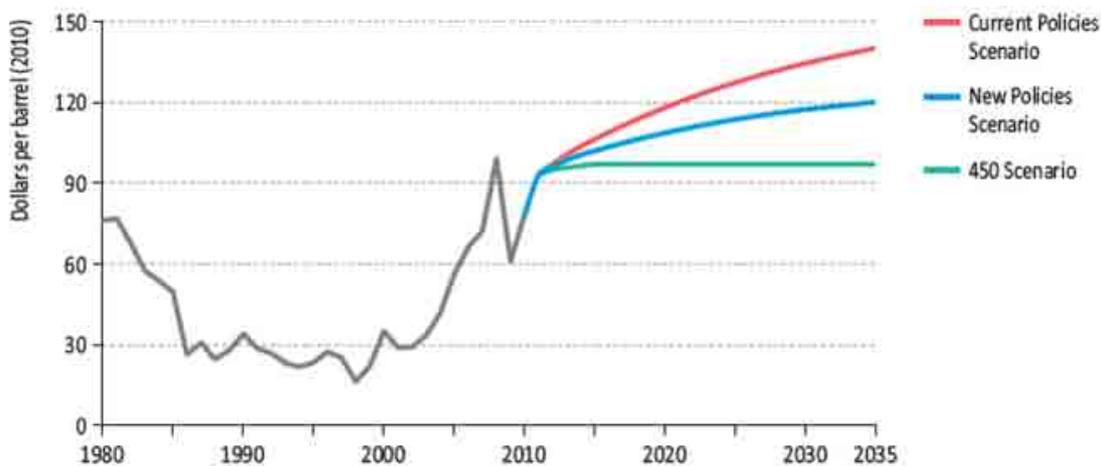


Figure 7 : Evolution du prix du baril de pétrole (Source : World Energy Outlook)

Il faut souligner que dans les conditions réglementaires et économiques actuelles, les scénarios S2 et S3 ne sont pas réalisables. **Ils doivent donc être identifiés comme des scénarios nécessitant une forte volonté des Pouvoirs Publics d'inciter au développement de la biomasse énergie et en particulier son utilisation pour produire du biométhane 2G.**

Le volume d'importations à l'horizon 2050 est une variable externe aux scénarios. En effet, la démarche de détermination à partir d'un volume total de biomasse de la part disponible pour l'énergie ne peut pas être appliquée aux importations. Il s'agit au contraire de déterminer un volume net. L'exercice prospectif sur les volumes d'importations est donc réalisé en parallèle de l'estimation, pour chaque biomasse, de la ressource disponible à 2050. **Les importations, envisagées dans les scénarios tendanciel et n°3, seront calculées puis ajoutées au potentiel biomasse énergie déterminé par ailleurs.**

3.3. Prospective 2020

1.1.4. Biomasse bois (BIBE et MB)

La ressource bois énergie est souvent la base des plans d'approvisionnement biomasse énergie. C'est donc naturellement celle qui a fait l'objet du plus d'études, et ce pour divers horizons de temps. Pour notre calcul prospectif à l'horizon 2020, on utilise les résultats de l'étude *Biomasse forestière, populicole et bocagère disponible pour l'énergie à l'horizon 2020*, réalisée par l'IFN³, le FCBA⁴ et SOLAGRO pour le compte de l'ADEME [4].

En 2011, la méthodologie d'estimation de l'inventaire national forestier a été mise à jour. Cette modification de la méthode de calcul a induit un biais par rapport à l'ancienne méthode. Ainsi, par exemple, la méthode de calcul de la production biologique induit une diminution de 20 % par rapport à la précédente méthode. L'étude commanditée par l'ADEME en 2009 [4] et reprise ici ne prend donc pas en compte cette méthodologie, et il faut garder à l'esprit que les résultats obtenus sont différents de ceux que l'on aurait à partir du nouvel inventaire forestier national. L'étude ADEME / SOLAGRO sera par ailleurs révisée en 2013 afin de tenir compte de cette modification.

1.1.4.1. Démarche et hypothèses

La démarche retenue dans l'étude de l'ADEME et reprise ici consiste à **déterminer une disponibilité brute en biomasse** type bois, qui correspond à la récolte potentielle permise par la structure des peuplements arborés et les règles de sylviculture et de gestion. On détermine ensuite **une disponibilité technico-économique nette correspondant à ce qui est effectivement récoltable en tenant compte des contraintes techniques, environnementales et économiques à laquelle est soumise la récolte bois. En ôtant la récolte actuelle, on atteint la disponibilité nette supplémentaire.**

Les hypothèses principales retenues dans l'étude ADEME et conservées pour notre étude sont les suivantes :

- **Périmètre de l'étude** : forêts, peupleraies, haies, alignements, arbres épars, vignes, vergers, landes et arbres urbains ;
- Ventilation de la biomasse forestière par catégorie : BO (Bois d' Œuvre), BI (Bois Industrie), BE (Bois Energie) et MB (Menu Bois) ;
- Mise en place progressive des pratiques préconisées dans les scénarios de gestion durable ;
- Productivité des peuplements supposée constante entre 2009 et 2020 ;
- Surface boisée constante : **pas de changement d'usage des sols** ;

³ IFN : Inventaire Forestier National

⁴ FCBA : Forêt, Bois, Ameublement, Cellulose

- Maintien de la gestion sylvicole actuelle : pas de changement d'espèces plantées (les futaies sont régénérées en futaies...);
- Ventilation des volumes par type d'usages potentiels invariante dans le temps ;
- Prise en compte uniquement du bois vert sur pied, et non du bois disponible suite à la tempête Klaus de 2009 ;
- Pas de prise en compte d'un consentement à offrir des propriétaires ou de l'organisation foncière des propriétés privées.
- **Conservation de la fertilité des sols** : modulation de la récolte de MB en fonction de la sensibilité des sols ;
- Contraintes d'exploitation (ventilation des disponibilités suivant la difficulté physique d'exploitation). On considère des **pertes d'exploitation : 10 % pour le BIBE et 20 % pour le MB récolté avec le BIBE** ;
- **Contraintes économiques** (disponibilité en fonction du prix bord de route).
- On ne provisionne pas d'importations à l'horizon 2020.

L'intégralité des hypothèses retenues dans l'étude *Biomasse forestière, populicole et bocagère disponible pour l'énergie à l'horizon 2020* est regroupée aux paragraphes 1.2 et 1.3 de cette étude [4].

1.1.4.2. Disponibilité brute et technico-économique

Le tableau suivant présente la disponibilité brute ainsi que la disponibilité technico-économique pour différents prix bord de route du BIBE.

Ressource		Disponibilité brute (TWh/an)	Disponibilité technico-économique (TWh/an) Prix 2009 « bord de route » du BIBE : 13 €/MWh	Disponibilité technico-économique (TWh/an) Prix « bord de route » du BIBE : 23 €/MWh
BIBE	Forêts	176	113	148
	Peupleraies	1,4	0,9	0,9
	Haies	6,2	5,9	5,9
MB	Forêts	34	15	21
	Peupleraies	0,6	0,3	0,3
	Haies	3,3	3,2	3,2
Viticulture		6,6	6,6	6,6
Arboriculture fruitière		3,2	3,2	3,2
Ressources urbaines		8,1	8,1	8,1
TOTAL		239,4	156,4	197,4

Tableau 2 : Disponibilités brute et technico-économique de la biomasse bois à l'horizon 2020

La disponibilité technico-économique est déterminée dans l'étude pour un prix bord de route du BIBE de 34 €/m³, soit 13 €/MWh. La dernière colonne du Tableau 2 présente la disponibilité brute pour un prix bord de route de 23 €/MWh (60 €/m³). En effet, à l'horizon 2020 il y aura probablement des tensions autour de la mobilisation de la biomasse, différents usages entrant en compétition. Ainsi le prix bord de route d'achat pour le

bois énergie augmentera. On suppose par ailleurs que toute la **ressource potentielle en biomasse d’origine viticole et d’arboriculture fruitière et urbaine est mobilisable aux conditions économiques actuelles** car il s’agit de résidus à valoriser.

A cette disponibilité technico-économique, on retranche la demande en BIBE pour obtenir la ressource disponible pour de nouveaux usages.

1.1.4.3. Demande à l’horizon 2020

L’étude Ademe / Solagro a déterminé les prélèvements actuels de bois pour l’énergie et l’industrie **parmi le gisement technico-économique en BIBE disponible**. Pour la consommation actuelle en bois énergie, l’étude utilise les chiffres du CEREN et de l’EAB.

A l’horizon 2020, on anticipe une augmentation de la demande en bois énergie de 10 600 ktep (source : ComOp10⁵ repris dans le Plan d’Action National ENR 2009 - 2020). Au regard des projets BCIAT et CRE déjà réalisés, on considère que 610 ktep ont déjà été atteintes en 2009. Il faut donc encore réaliser **908 ktep/an, soit 10,6 TWh/an** pour atteindre l’objectif 2020.

En ce qui concerne le développement de la Chimie du Végétal, une feuille de route R&D de la filière a été publiée en 2010 par l’ADEME [5]. Elle ne contient pas d’objectifs chiffrés de quantités de produits biosourcés à produire d’ici 2020 ou 2050, mais des éléments qualitatifs de développement sont néanmoins précisés. Ainsi selon ERRMA (association « Building the Bio-Economy by 2020 »), une forte croissance du marché européen des produits biosourcés est attendue sur la période 2010 – 2020. Par ailleurs, la France, qui dispose de ressources conséquentes en matière biomasse et d’une industrie agroalimentaire très présente, est bien placée pour devenir un fournisseur important en Europe. De plus, l’industrie chimique française s’est engagée à utiliser 15 % de matières premières d’origine végétale d’ici à 2017.

Cependant, comme aucun chiffre n’est disponible, cette demande n’est pas retranchée au gisement technico-économique pour déterminer le gisement disponible pour de nouveaux usages. En effet, outre les niveaux de production à atteindre dans le futur, il faudrait également connaître le ratio de coproduits restants une fois les substances valorisables en chimie extraites, car ils peuvent être utilisés pour produire de l’énergie. **Même si il n’apparaît pas dans notre étude, l’impact du développement de la chimie verte sera à considérer dans les compétitions d’usages, à l’horizon 2020 et a fortiori à l’horizon 2050.**

1.1.4.4. Disponibilité supplémentaire à l’horizon 2020

En retranchant la demande estimée à 2020, on obtient la disponibilité supplémentaire disponible, biomasse utilisable pour la production de biométhane 2G par exemple. Le Tableau 3 présente la disponibilité en équivalent énergie pour deux prix bord de route du BIBE : 13 et 23 €/MWh, qui correspondent à 34 et 60 €/m³.

Prix du BIBE		BIBE suppl.	MB suppl.	Viticulture/ Arboriculture et urbains	TOTAL
€/m ³	€/MWh	TWh/an	TWh/an	TWh/an	TWh/an
34	13	21	19	18	58
60	23	57	25	18	100

Tableau 3 : Disponibilité supplémentaire en bois à l’horizon 2020

On estime la ressource supplémentaire en bois disponible pour de nouveaux usages entre 58 et 100 TWh/an.

⁵ http://www.legrenelle-environnement.fr/IMG/pdf/rapport_final_comop_10.pdf

1.1.5. Coproduits agricoles

Sont inclus dans le périmètre des résidus agricoles pour cette étude : les pailles de céréales (blé, orge, seigle, avoine), les pailles de tournesol et de colza ainsi que les cannes de maïs. Les données utilisées pour évaluer la ressource disponible à l'horizon 2020 proviennent de l'Agreste, du GIE-Arvalis ou encore du FCBA.

1.1.5.1. Démarche et hypothèses

La quantité totale de paille disponible (gisement brut) est obtenue par calcul à partir des surfaces arables, des rendements agricoles et des ratio paille / grain. A ce gisement, on retranche les pertes de récolte afin d'obtenir le gisement techniquement récoltable. Les pailles de céréales font l'objet d'une demande annuelle non négligeable car elles sont utilisées pour le fourrage et les litières des animaux. En retranchant cette demande, on obtient un gisement disponible pour de nouveaux usages, auquel il faut encore ôter les besoins de retour au sol pour atteindre le gisement durablement disponible pour de nouveaux usages.

Les hypothèses retenues dans cette étude sont les suivantes :

- Les **pertes de récolte s'élèvent à 50 % du gisement total en paille** (donnée GIE-Arvalis et FCBA) ;
- Le **besoin en retour au sol des pailles est évalué à 25 %** (moyenne nationale des pratiques françaises, donnée FCBA) ;
- La demande considérée en paille de céréales provient des litières du bétail (bovins, caprins, ovins et porcins) ainsi que des fourrages ;
- **La part du gisement techniquement récoltable dédiée au fourrage est évaluée à 20 %** ;
- D'ici 2020, les rendements agricoles à l'hectare n'auront pas augmenté du fait des effets du changement climatique, qui aurait même tendance à faire diminuer les rendements à l'hectare à un horizon de temps plus lointain ;
- **La superficie des surfaces cultivées est obtenue en suivant la tendance 2006 – 2010 fournie par l'enquête Teruti-Lucas de l'Agreste** [6]. L'enquête montre que d'une année sur l'autre les surfaces cultivées varient peu, augmentant ou diminuant légèrement. Il est donc difficile de dégager une tendance nette entre 2006 et 2010. On prend pour l'étude une variation de + 0,18 % par an, correspondant à l'évolution globale entre 2006 et 2010 ;
- L'effet d'éventuelles sécheresses périodiques n'est pas pris en compte dans l'étude. Les modèles de prévision de la périodicité des sécheresses sont déclinés par type de culture et sont trop complexes pour être intégrés à cette étude ;
- **Aucune considération économique de la filière d'approvisionnement en paille n'est prise en compte** dans cette étude. En effet, les prix bord de route des pailles varient beaucoup en fonction de la région, du type de paille et également de l'année considérée (augmentation des prix en période de pénurie due à une sécheresse...). L'incertitude liée à l'estimation de ces prix est donc importante et nous avons choisi de nous affranchir de cette dimension dans cette étude.

1.1.5.2. Disponibilité brute et techniquement récoltable

Les rendements à l'hectare proviennent des statistiques de l'Agreste sur la production agricole française pour l'année 2009 et les ratios paille / grain sont des données issues des travaux du projet GAYA (données FCBA).

	Blé	Orge	Seigle	Avoine	Colza	Tournesol	Maïs
Surface plantée (Mha)	5,5	1,6	0,03	0,1	1,5	0,7	0,2
Rendement à l'ha (t/ha)	7,5	6,8	5,2	4,9	3,8	2,4	8,9
Production (t/an)	41,4	11,0	0,16	0,49	5,7	1,7	14,3
Ratio paille/grain	0,8	0,8	0,8	0,8	1,6	3,3	0,7
GTOT paille (Mt/an)	33,1	8,8	0,12	0,39	9,1	5,6	10,0
GTR* (Mt/an)	16,6	4,4	0,06	0,20	4,5	2,8	5,0

Tableau 4 : Disponibilité brute et techniquement récoltable en résidus agricoles à l'horizon 2020

1.1.5.3. *GTR : Gisement techniquement récoltable

Pour la suite de l'étude, le blé, l'orge, le seigle et l'avoine seront regroupés dans la catégorie « céréales ».

1.1.5.4. Demande à l'horizon 2020

L'estimation des besoins en litière du bétail s'effectue à partir du nombre de têtes de bétail évalué pour 2020, de leurs besoins individuels en paille et de la part du cheptel logée sur paille (données Agreste [7]). Les besoins en paille sont pris égaux à ceux de 2008 (données Agreste [7]). Le détail du calcul est présenté en Annexe 4.

	Têtes 2020 (millions de têtes)	Besoins en paille (t par tête)	Effectif paillé (%)	Litières totales (Mt/an)
Bovins	18,8	0,76	87	12,4
Porcins	14,1	0,409	7	0,40
Caprins	1,6	0,315	87	0,43
Ovins	6,8	0,13	87	0,76
Total	41,3			14,0

Tableau 5 : Estimation des besoins du bétail en litière à l'horizon 2020

Le besoin en fourrage est estimé à 20 % de la disponibilité techniquement récoltable en paille de céréales.

1.1.5.5. Disponibilité supplémentaire à l'horizon 2020

Le Tableau 6 présente la disponibilité supplémentaire durablement disponible en tonnes sèches et en équivalent énergétique.

	Céréales	Colza	Tournesol	Maïs
Humidité paille (%)	15	45	40	50
GTR après élevage (Mt/an)	3,0	4,5	5,8	10,3
GDD* (Mtsèches/an)	1,88	1,87	1,26	2,26
GDD (TWh/an)	8,99	8,56	8,54	10,35

* GDD : Gisement durablement disponible

Tableau 6 : Disponibilité supplémentaire en résidus agricoles à l'horizon 2020

Le pourcentage de retour au sol nécessaire est appliqué aux pailles disponibles après avoir enlevé la demande pour le bétail (litière et fourrage), appelé dans le tableau gisement techniquement récoltable après élevage. Les étapes détaillées du calcul sont présentées en Annexe 4.

On estime la ressource supplémentaire en résidus agricoles disponible pour de nouveaux usages à 36 TWh/an environ (7,3 millions de tonnes sèches).

Bien que la périodicité des sécheresses ne soit pas formellement prise en compte, il convient de noter que **les aléas climatiques ont une incidence forte sur la quantité de paille disponible**. En effet, à dire d'expert (Bureau des calamités agricoles - MAAP), on constate actuellement une fréquence de sécheresse de une année sur cinq, pouvant aller jusqu'à une année sur trois si l'on considère les effets du réchauffement climatique. Lors des périodes de sécheresse, les besoins en fourrage et en litière sont à satisfaire en priorité, et il peut ne rester aucune paille de céréales pour d'autres usages. En supposant que les sécheresses affectent également la production des autres pailles, **on peut alors fictivement évaluer à 12 TWh/an le potentiel minimum de résidus agricoles disponibles à l'horizon 2020 (1/3 du potentiel haut de 36 TWh/an)**. Pour le reste de l'étude, c'est le potentiel déterminé sans prise en compte des effets des sécheresses qui est conservé. Cependant, il faut garder à l'esprit la volatilité de la disponibilité en pailles d'une année sur l'autre, conduisant à bien évaluer les risques de tout approvisionnement d'unités en pailles.

1.1.6. Cultures énergétiques

1.1.6.1. Démarche et hypothèses

La démarche appliquée pour les cultures énergétiques diffère de celle pour le bois ou la biomasse agricole. En effet, il ne s'agit pas de partir d'une ressource existante puis d'ôter ce qui n'est pas accessible ou mobilisable dans des conditions de durabilité optimales, mais de déterminer des surfaces disponibles où il serait possible d'implanter des cultures dédiées. Des études menées dans des projets tels que VALERBIO⁶ ont mis en évidence la complexité de l'évaluation du potentiel d'implantation des cultures énergétiques. De nombreux paramètres tels que les contraintes climatiques, la compatibilité des sols, l'occupation des sols... doivent être considérés. Différentes approches de détermination des surfaces théoriquement mobilisables existent. Il a été choisi dans cette étude de déterminer les surfaces disponibles (terres arables non cultivées compatibles avec ce type de cultures) et d'appliquer ensuite le mix de cultures énergétiques choisi. Les cultures énergétiques dédiées à la production de biométhane 2G s'implantent en effet sur des terres arables, à la différence par exemple des cultures de micro-algues qui peuvent être cultivées sur des terres en friche, des landes...

On prend dans le mix de cultures celles qui sont le plus adaptées au climat en France. **Il s'agit du miscanthus, du peuplier, du saule, de l'eucalyptus et du triticale**. Ce mix est issu de l'étude RENEW [8], tout comme la répartition de ces différentes essences, les rendements à l'hectare et les pouvoirs calorifiques.

Pour déterminer les surfaces disponibles pour le développement des cultures énergétiques, une étude de l'Agence Européenne de l'Environnement (AEE) [9] est utilisée. Elle évalue, sous diverses hypothèses d'évolution des surfaces et rendements agricoles, les terres arables disponibles pour la production de cultures à usage énergétique à différents horizons de temps, dont 2020. Pour la France, **un million d'hectares serait disponible à l'horizon 2020**. La démarche adoptée ici est de considérer le potentiel maximum de cultures à usage énergétique qui puisse être implanté sur cette surface, sans réaliser d'allocation de surfaces entre agrocarburants et biocarburant de 2^{ème} génération, du biométhane 2G ici en l'occurrence. **Le but est en effet de calculer un potentiel technique global, tout en gardant à l'esprit que l'implantation réelle de**

⁶ VALERBIO : *Valorisation énergétique de la biomasse*, IFP, Ecole des Mines de Paris, FCBA (2010)

cultures énergétiques pour la production de biocarburant 2G se situera entre 0 et 100 % du potentiel affiché.

L'étude de l'AEE n'ayant pas été utilisée pour la détermination de la ressource en résidus agricoles disponible, les hypothèses d'évolution de la surface arable sont probablement différentes entre les calculs de la biomasse agricole et ceux des cultures énergétiques. De manière rigoureuse, les gisements calculés ne devraient donc pas être cumulables. Cependant, l'estimation du million d'hectares de terres arables disponibles correspond à l'estimation de la surface en jachère à l'horizon 2020 d'après les statistiques de l'Agreste. **On fait donc l'hypothèse que les ressources identifiées ne se recoupent pas sur une même surface et qu'il est donc possible de les additionner pour obtenir un potentiel total.**

Comme pour la biomasse agricole, aucune considération économique n'est prise en compte. Des études ont montré qu'il n'est pas intéressant économiquement pour les agriculteurs de planter des cultures énergétiques au lieu de cultures à usage alimentaire. Ainsi, en prenant cette hypothèse, le potentiel futur de cultures énergétiques serait nul. Néanmoins, les futures révisions de la PAC ainsi qu'une demande en énergie accrue pourrait créer un contexte où les prix entre les cultures alimentaires et énergétiques seraient rééquilibrés. **Il a donc été décidé pour cette étude de regarder le potentiel de production total en s'affranchissant des contraintes économiques.**

1.1.6.2. Disponibilité à l'horizon 2020

	Triticale	Peuplier	Saule	Eucalyptus	Miscanthus
Fraction du mix	0,4	0,11	0,11	0,11	0,27
Surface (kha)	400	110	110	110	270
Rendement (ts/ha)	12	10	10	10	16
PCI (MWh/ts)	4,8	5,2	5,2	5,2	5,1
Quantité max (Mt/an)	4,8	1,1	1,1	1,1	4,3
Gisement (TWh/an)	23	5,7	5,7	5,7	22

Tableau 7 : Ressource potentielle de cultures énergétiques à l'horizon 2020

Le peuplier se retrouve à la fois dans les ressources forestières et dans les cultures énergétiques, même si le mode d'exploitation sylvicole n'est pas le même : le peuplier TCR (culture énergétique) a une rotation de 7 à 10 ans, bien plus courte que celle du peuplier exploité en peupleraies.

On estime la disponibilité en cultures énergétiques à l'horizon 2020 à 62 TWh/an environ.

Comme précisé dans les hypothèses, on obtient une valeur haute d'implantation de cultures énergétiques : **le déploiement réel sera un pourcentage de ce potentiel.**

1.1.7. Autres ressources bois

On entend par autres ressources bois les boues de papeterie, les produits connexes de scierie (PCS) et les déchets de bois fin de vie (DIB).

1.1.7.1. PCS

Les Produits Connexes de Scierie (PCS) sont les **résidus de l'industrie de première transformation du bois** (sciures, copeaux de bois, chutes, dosses⁷...). **Les PCS sont généralement bien valorisés**. Les résidus, en fonction de leur taille (sciures, copeaux...) sont utilisés dans l'industrie papetière, pour la fabrication de panneaux, pour la production de granulés, d'énergie... L'estimation menée par le FCBA dans le projet GAYA montre qu'environ 150 GWh de PCS sont disponibles en 2010. **Ce potentiel étant faible, on choisit de ne pas le prendre en considération aux horizons 2020 et 2050**. Le développement de la disponibilité en PCS est directement lié au développement des usages bois matériau. Ainsi, un regain de croissance de cette filière permettrait de disposer de PCS en quantité plus élevée. **Cependant l'estimation d'une trajectoire d'évolution des tendances de valorisation des PCS est délicate à estimer aujourd'hui**.

1.1.7.2. Déchets bois fin de vie

Ils correspondent à tous les types de matériaux bois utilisables et/ou recyclables (énergie, matériaux) à la fin de leur utilisation principale.

Le calcul de la disponibilité totale en bois fin de vie s'effectue à partir d'un ratio de production de déchets par habitant. L'étude européenne EUwood [10] fournit pour la France un ratio de 75 kg/habitant.

L'INSEE prévoit que la population française en 2020 atteindra 65 millions d'habitants. A la disponibilité totale on retranche la partie faisant l'objet d'une valorisation matière ou énergie (soit 90 % du total). On conserve également uniquement les déchets de classe A (classe usuelle indiquant des caractéristiques proches du bois naturel).

En reprenant la méthodologie retenue dans le projet GAYA **on obtient pour 2020 une disponibilité de 1,0 TWh/an pour les déchets bois fin de vie.**

A titre indicatif, en considérant que les déchets de classe B (ayant subi un traitement chimique n'incluant pas des organo-halogénés ou des métaux lourds, typiquement les bois faiblement adjuvés : collés, traités en surface) pourront également être valorisés énergétiquement par voie thermo-chimique, on obtient pour 2020 un potentiel de **2,6 TWh/an**.

1.1.7.3. Boues de papeterie

On considère dans les boues de papeterie les boues dites « mixtes », **c'est-à-dire le mélange des boues primaires (issues de la première séparation physico-chimique) et des boues biologiques (issues de l'épuration biologique)**.

Les boues de désencrage des papiers recyclés, constituées des mousses de flottation de l'étape d'élimination des encres, très minérales, ne sont pas prises en compte.

Le Centre Technique du Papier (CTP) a fourni pour le projet GAYA des quantités de boues produites par région en France, en 2010. On fait l'hypothèse que la quantité de boues à l'horizon 2020 sera la même que celle de 2010, la croissance économique de l'industrie papetière française étant nulle ou décroissante depuis une décennie avec peu de perspective de reprise.

On estime la disponibilité en boues de papeterie à l'horizon 2020 à 650 GWh/an.

⁷ Dosses : Partie extérieure d'une bille enlevée à la scie, avec une partie plane et une partie courbe

Ce gisement est très faible par rapport à ceux en biomasse bois ou agricole, mais, tout comme pour les déchets bois fin de vie, cette ressource pourra être valorisée dans de petites unités flexibles localisées au plus près du gisement.

1.1.8. Résidus d'industries agroalimentaires

Sont inclus dans le périmètre des résidus d'industries agroalimentaires : les coproduits de l'industrie du lait (babeurre, lactosérum), de l'industrie du sucre (pulpe, écume, mélasse), de meunerie, d'amidonnerie, de féculerie (pulpe, son, remoulage, farine basse), d'abattoirs (déchets de découpe), de conserverie (déchets de poisson), et d'huilerie et de distillerie (colza, soja, tournesol, grignons d'olive).

L'évaluation de la disponibilité en résidus d'industries agroalimentaires (IAA) est effectuée à partir des données de disponibilité supplémentaire obtenues dans le projet GAYA par le FCBA. Le projet fournit la disponibilité en 2010 sur la base des données du Ministère de l'Agriculture et de la publication *Déchets des industries agroalimentaires – Agreste 2010* [11]. Comme la production de coproduits est directement reliée à la quantité de produits finis des différentes industries, on peut estimer le potentiel en coproduits IAA à l'horizon 2020 en appliquant un effet production, c'est-à-dire un pourcentage de croissance de production estimée pour chaque industrie. Le projet CAP2 de GDF SUEZ effectue chaque année cet exercice prospectif pour différents horizons de temps, dont 2020, pour les différents secteurs industriels. Dans cette étude, ce sont ces estimations qui sont reprises afin d'estimer la production des différentes industries agroalimentaires en France, et donc la quantité de coproduits associée.

Les coproduits d'IAA sont déjà très souvent valorisés. On retranche ainsi au potentiel total obtenu pour 2020 la demande 2010, autrement dit les valorisations constatées à l'heure actuelle (compostage, valorisation alimentaire, épandage...). On fait ainsi l'hypothèse que tous les coproduits supplémentaires générés par la croissance de l'industrie concernée seront disponibles pour la production de biométhane 2G. C'est une hypothèse forte puisque la plupart des coproduits IAA, humides, peuvent être valorisés par méthanisation, cette valorisation étant plus adaptée aux biomasses à forte humidité. La production de biogaz rentre ainsi en compétition avec le biométhane 2G sur ce type de biomasse, ce qui n'était pas le cas pour le bois par exemple.

Le Tableau 8 présente les résultats obtenus pour 2020, en considérant que tous les coproduits sont mis à disposition, c'est-à-dire que le consentement à offrir est 100 %.

	Disponibilité supplémentaire 2020 (ts)	PCI (MWh/ts)	Disponibilité en GWh/an
Lait	151 920	0,28	42
Sucre	248 360	4,44	1 104
Amidon	351 780	3,33	1 173
Poisson	316	3,33	1
Viande	160 865	3,33	536
Vin	0*	-	0
Huile	48 250	5	241
Total	961 490	-	3 097

Tableau 8 : Ressource potentielle de résidus IAA à l'horizon 2020

* : tout est déjà valorisé

On estime la disponibilité en résidus IAA à l'horizon 2020 à 3,1 TWh/an environ.

La prospective à 2050 n'a pas été réalisée pour les IAA dans cette étude compte tenu que l'exercice prospectif utilisé n'est pas réalisé jusqu'à l'horizon 2050 et l'évaluation prospective repose principalement sur l'estimation de l'évolution du taux de production, très délicat à estimer à long terme. Cependant cela a un faible impact sur la disponibilité totale en biomasse puisque les résidus IAA ne représentent que quelques TWh de potentiel, en comparaison des dizaines de térawatts heure pour les autres biomasses.

3.4. Prospective 2050

1.1.9. Ressource bois (BIBE et MB)

1.1.9.1. Démarche et hypothèses

Les trois scénarios prospectifs sont élaborés pour 2050 en prenant comme ressource de base la disponibilité calculée pour 2020. Les hypothèses prises pour 2020 sont également reprises :

- **Pas de changement d'espèces plantées** : la répartition entre les essences sur les zones boisées est conservée à l'identique ;

Pas de prise en compte d'un consentement à offrir des propriétaires ou de l'organisation foncière des propriétés privées.

- **Pas d'augmentation de la demande en BIBE pour la trituration, la demande de l'industrie papetière étant considérée comme constante.** Cette hypothèse est justifiée par la situation économique difficile de l'industrie papetière française, qui connaît une crise profonde depuis de nombreuses années avec des fermetures de lignes et d'usines et notamment des lignes de trituration. Il n'est donc pas justifié aujourd'hui de considérer une croissance forte de la production de pâte à papier sur le sol français ;
- **Pas de prise en compte de la dimension économique.** Pour rappel, la disponibilité à l'horizon 2020 avait été estimée en prenant en compte ce qui est récoltable à un coût économique acceptable. 2050 est un horizon de temps éloigné, où il est difficile d'associer des coûts à des opérations sylvicoles ou d'estimer le prix bord de route acceptable pour un industriel de l'énergie. Le choix a donc été fait de ne pas prendre en compte cette contrainte : la disponibilité technico-économique 2020 prise comme base pour les scénarios 2050 est celle obtenue avec le prix bord de route maximal dans l'étude Ademe / Solagro [4]. En effet, l'étude a montré le gain en gisement obtenu par une augmentation du prix bord de route, au-delà de ce prix maximal, est marginal car le gisement économiquement disponible tend vers une limite supérieure.

Par ailleurs, les importations considérées à l'horizon 2050 sont des importations de granulés de bois, en provenance d'Amérique du Nord ou du Brésil. Le volume d'importations étant exogène, il sera traité dans un paragraphe distinct. Ainsi, quand il est précisé dans les scénarios que des importations sont envisagées, il faudra se reporter au paragraphe 1.1.13 pour le détail des volumes.

1.1.9.2. Détails des scénarios

Le contexte général des scénarios a été présenté au paragraphe 3.2. Dans chacun de ces scénarios, on décline ensuite des paramètres dont les valeurs varient d'un scénario à l'autre en accord avec le contexte décrit. Pour la ressource bois, on considère **l'évolution de la surface forestière d'ici 2050, les pertes d'exploitation pour le BIBE et le MB** (pour rappel, à l'horizon 2020, les pertes d'exploitation sont fixées à 10 % pour le BIBE et 20 % pour le MB) et **le retour au sol nécessaire**. Des importations de granulés de bois sont également prévues pour certains scénarios.

- **Scénario tendanciel**

Pour ce scénario, on estime la surface forestière à l’horizon 2050 en extrapolant la tendance observée entre 2006 et 2010 (statistiques de l’Agreste, enquête Teruti-Lucas [6]). Les autres indicateurs, à savoir les pertes d’exploitation et le retour au sol, gardent les mêmes valeurs que pour 2020. Comme on constate actuellement une augmentation des volumes de granulés de bois importés en Europe, des importations sont considérées dans ce scénario tendanciel. En effet, la France importe actuellement beaucoup moins de biomasse énergie que des pays tels que la Belgique ou les Pays-Bas. Néanmoins, sauf décision contraire au niveau européen, il est vraisemblable que compte tenu des prix avantageux de ces granulés et de leur forte disponibilité sur le continent américain les importations se développent aussi à l’échelle de la France.

- **Scénario S2**

L’évolution des terres est issue des résultats disponibles dans la synthèse de septembre 2011 du projet Afterres2050 réalisé par SOLAGRO. Une présentation de cette étude et des principales hypothèses est présentée en Annexe 5 .

Le scénario d’Afterres2050 repose sur l’hypothèse que les hommes vont modifier leur régime alimentaire et réduire les exportations. Cela permet de libérer des terres à hauteur de 5 à 8 millions d’hectares répartis en 1/3 de terres arables et 2/3 de prairies permanentes qui peuvent être réaffectées. La synthèse Afterres2050 utilisée pour construire le scénario S3 ne fait pas état des hypothèses prises en compte sur la demande agricole au niveau mondial. Or les potentielles évolutions de la demande en produits agricoles à l’échelle internationale pourraient limiter la libération des terres arables utilisables pour l’énergie à l’horizon 2050. Pour justifier cette hypothèse sur les exportations, on s’appuie sur la justification des hypothèses du scénario BETA de l’étude « Facteur 4 – Agriculture et forêt » de l’ADEME et du MAAPRAT [15], réalisée par SOLAGRO⁸. Ce rapprochement est possible car les hypothèses de BETA sont proches de celles d’Afterres2050. Dans ce scénario BETA, la France diminue ses exportations de 25 % afin de favoriser la production de biomasse. 7 millions d’hectares de terres sont libérées dans ce scénario. Il est précisé dans l’étude que la réduction des exportations a été envisagée dans un objectif pédagogique, afin de voir l’impact de ce levier sur la libération de surfaces. Des experts interrogés lors de la réalisation de l’étude « Facteurs 4 - Agriculture et forêt » soulignent que cette hypothèse sur les importations est cohérente avec les autres éléments de contexte du scénario si l’on considère que les changements des régimes alimentaires s’opèrent dans toute l’Europe, induisant une diminution de la demande en produits laitiers et en viande exportées de la France vers l’Union Européenne. De plus, si l’on suppose que les prix de valorisation de la biomasse deviendront supérieurs aux prix alimentaires, une réduction des exportations est alors envisageable. Néanmoins, si la croissance de la démographie mondiale s’accompagne d’une augmentation de la demande alimentaire, l’hypothèse d’une diminution des exportations semble alors peu probable, en particulier si l’on considère la position actuelle de la France en tant que grand pays exportateur de produits agricoles. La réduction des exportations est donc une hypothèse forte qui porte à discussion et doit être vue comme un outil de réflexion sur le phénomène de libération de terres arables en France.

Il est important de signaler que le scénario Afterres2050 n’a été utilisé que pour évaluer le changement d’usage des sols et la disponibilité de nouvelles terres. L’intégralité des hypothèses et recommandations du scénario Afterres2050 n’est pas reprise et le contexte décrit par SOLAGRO ne correspond pas exactement à celui de l’étude. Néanmoins, les deux contextes ont été jugés suffisamment proches pour que les résultats d’Afterres2050 puissent être repris dans cette étude. En effet, les deux scénarios reposent sur une hypothèse de changement des comportements pour plus de sobriété. **On suppose que 50 % des nouvelles prairies disponibles deviennent des peupleraies car le peuplier est un bois au pouvoir calorifique élevé, facilement exploitable en peupleraies.** Pour des raisons de biodiversité et d’intégration paysagère, on

⁸ L’étude Facteur 4 n’était pas publiée au moment de la réalisation de cet exercice prospectif, c’est pourquoi les hypothèses de changement d’usage des sols reposent en priorité sur Afterres2050, disponible début 2012.

suppose que seulement 50 % des prairies sont converties pour laisser la place à d'autres cultures ou à des espaces non cultivés sur la deuxième moitié des terres.

Les pertes d'exploitation et le retour au sol sont supposés identiques à ceux considérés pour 2020. Dans ce scénario privilégiant le développement durable et l'équilibre entre les usages, **aucune importation de granulés de bois n'a été envisagée**. En effet, l'un des aspects négatifs de l'importation est l'émission de gaz à effet de serre engendrée par le transport. Or le scénario S2 s'attache à décrire un contexte de durabilité où les usages locaux sont privilégiés.

- **Scénario S3**

Le scénario S3 représente une limite haute du développement de la biomasse énergie. Pour évaluer l'évolution de l'usage des sols, le scénario AG0 d'Agrimonde a été retenu. Il est décrit en détails dans Annexe 6. Dans ce scénario AG0, les besoins énergétiques augmenteront considérablement à l'avenir et la priorité est donnée à la croissance économique et au bien-être matériel immédiat des hommes. Cette description correspond au contexte de S3, où le comportement des hommes n'a pas changé et où il faut répondre à des besoins énergétiques grandissants et immédiats. **Le scénario AG0 indique une augmentation de la surface forestière de 13 % dans les pays de l'OCDE par rapport à la surface 2003**. Cette augmentation est appliquée par homothétie à la France, sans prendre en compte les hétérogénéités entre les structures foncières des différents pays de l'OCDE. En effet, des pays tel que le Canada ont d'importantes étendues de terres disponibles, ce qui n'est pas le cas des pays d'Europe par exemple. Ainsi les résultats d'AG0 sont utilisés dans cette étude car peu de données prospectives sont disponibles par ailleurs à cet horizon de temps, mais il convient de nuancer les résultats en gardant à l'esprit cette limite forte.

On considère par ailleurs que les techniques d'exploitation forestière mises en œuvre en 2050 permettront de réduire les pertes d'exploitation pour atteindre 5 % pour le BIBE et 10 % pour le MB. On suppose également que l'appauvrissement des sols est évité au moyen d'une fertilisation compensatrice et non par retour au sol des menus bois.

Comme les besoins énergétiques sont forts et que le prix du pétrole est élevé dans ce scénario, on choisit de considérer des importations.

Le Tableau 9 regroupe les hypothèses des différents scénarios.

Tendanciel	S2	S3
Evolution de la surface forestière : suit la tendance observée entre 2006 et 2010 dans l'enquête Teruti-Lucas (Agreste) soit -0,06 % (surface pratiquement constante)	Scénario d'évolution de l'usage des sols : d'après Afterres2050	Scénario d'évolution des surfaces forestières : d'après le scénario AG0 d'Agrimonde : + 13 % de surfaces forestières dans les pays de l'OCDE
Pertes d'exploitation : BIBE : 10 % et MB : 20 %	Conversion de 50 % des nouvelles prairies disponibles en peupleraies	Pertes d'exploitation : 5 % BIBE et 10 % MB
Retour au sol identique au scénario 2020	Pertes d'exploitation : BIBE : 10 % et MB : 20 %	Pas de retour au sol (supposition d'une fertilisation compensatrice)
Importations considérées (voir paragraphe 1.1.13)	Retour au sol identique au scénario 2020	Importations considérées (voir paragraphe 1.1.13)
	Pas d'importations	

Tableau 9 : Hypothèses retenues pour les trois scénarios ressource bois à l'horizon 2050

1.1.9.3. Disponibilité à l’horizon 2050

Le détail des résultats est présenté en Annexe 7.

Le Tableau 10 et la Figure 8 montrent l’évaluation de la disponibilité bois énergie suivant les trois scénarios telle qu’estimée grâce aux hypothèses présentées précédemment.

	ST	S2	S3
Disponibilité en TWh/an	108	MIN : 122 MAX : 128	163

Tableau 10: Disponibilité en biomasse bois à l'horizon 2050

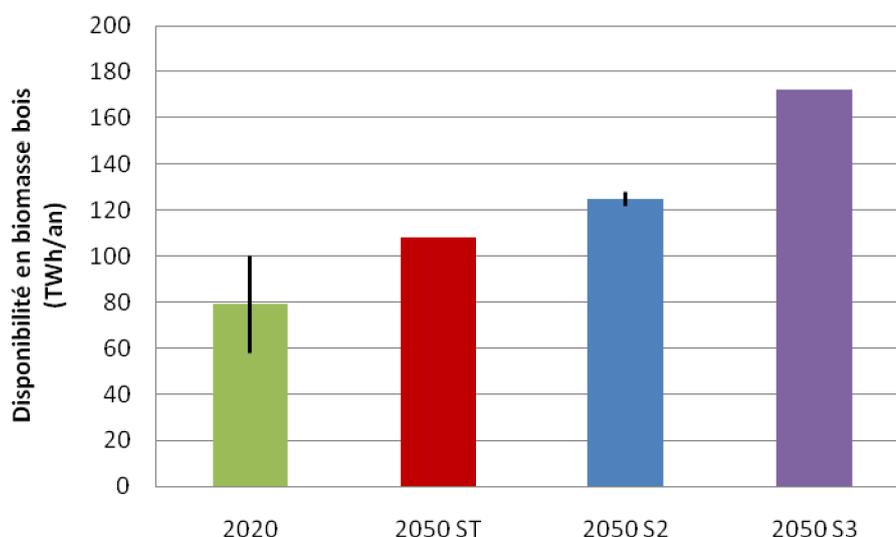


Figure 8 : Disponibilité en biomasse bois aux horizons 2020 et 2050

Pour rappel, les importations ne sont pas prises en compte sur ce graphique et feront l’objet d’un paragraphe dédié.

La barre d’incertitude représente pour 2020 la plage de disponibilité entre les deux prix bord de route considérés et pour 2050 S2 l’écart entre le minimum et le maximum obtenus en prenant en compte différentes surfaces de terre disponibles (hypothèses du scénario Afterres2050).

Pour rappel, pour le scénario 2050 tendanciel, tout le BIBE disponible pour de nouveaux usages a été considéré, sans tenir compte de contraintes économiques. Il convient cependant de nuancer les résultats obtenus en soulignant que, dans le modèle sylvicole actuel, l’exploitation du BIBE est fortement liée à celle du bois d’œuvre (BO). En effet, au niveau français, 42 % de la disponibilité brute en BIBE est physiquement liée à l’exploitation de BO, c’est-à-dire qu’ils concernent les mêmes arbres. Si on considère également la dimension économique du lien entre BIBE et BO, alors 62 % du BIBE est lié à l’exploitation de BO. Dans ce cas là, on prend également en compte le fait que la mobilisation du BO permet la récolte du BIBE des taillis (effets d’aubaine de la présence d’engins...) [4]. **Il faut donc souligner que l’augmentation par rapport à 2020 de la disponibilité supplémentaire en bois énergie à l’horizon 2050, dans le scénario tendanciel, est fortement assujettie à la santé de la filière bois d’œuvre française.** L’augmentation entre 2020 et 2050 (ST) présentée sur la Figure 8 fait cette hypothèse. Par contre, si la tendance reste, comme à l’heure actuelle, à une baisse de la production de bios d’œuvre en France, alors, dans le modèle sylvicole actuel, la disponibilité en bois énergie sera bien plus faible que celle affichée et il n’y aura pas d’augmentation de disponibilité entre 2020 et 2050. Dans le modèle actuel, l’augmentation de la disponibilité en BIBE passe en

effet par une augmentation des chantiers sylvicoles de bois d'œuvre. Bien entendu, si la récolte de BIBE se décorrèle de l'exploitation du BO à l'avenir (changement de modèle sylvicole) et devient une filière à part entière, ou bien si une forte volonté politique inverse la tendance de détérioration de la filière bois d'œuvre, alors ce gisement pourra être accessible.

L'estimation de la disponibilité en biomasse bois énergie montre une augmentation entre 2020 et 2050, et ce pour tous les scénarios 2050. Le scénario S3 est logiquement celui donnant la plus grande disponibilité en BIBE et MB car aucun retour au sol et de faibles pertes d'exploitation sont considérées. En ce qui concerne le scénario 2050 ST, il diffère de celui de 2020 par la part de bois économiquement exploitable considérée puisque la disponibilité technico-économique 2020 au prix bord de route maximal a été considérée comme base pour le calcul à 2050.

1.1.10. Résidus agricoles

1.1.10.1. Démarche et hypothèses

La démarche globale de détermination de la disponibilité supplémentaire pour de nouveaux usages adoptée pour 2020 (paragraphe 1.1.5.1) est conservée pour la prospective 2050.

Les hypothèses prises pour l'évaluation à 2020 sont conservées. Par ailleurs, on prend pour les rendements agricoles et les ratios paille / grain à 2050 les valeurs de 2020. En effet, des études (Climator...) mettent une évidence une diminution à long terme des rendements agricoles à cause des effets du changement climatique. On fait ici l'hypothèse que les progrès scientifiques à l'horizon 2050 permettront de pallier à ces pertes de rendement.

Les pertes de récolte sont prises égales à 50 % comme pour 2020.

On suppose par ailleurs qu'il n'y a pas de changement de répartition de plantation entre les différentes cultures (blé, maïs...). Cette hypothèse est forte et probablement erronée, mais trop peu d'éléments de prospective à l'horizon 2050 sont disponibles à ce jour pour justifier d'un choix d'une répartition différente.

De la même manière, on considère que le **cheptel français est composé des mêmes animaux qu'en 2020 avec des besoins en litière et en fourrage identiques** par tête de bétail.

Les indicateurs qui varient d'un scénario à l'autre sont : la surface cultivée, la taille du cheptel français et le retour au sol des pailles.

- **Scénario tendanciel**

L'évolution de la surface cultivée est évaluée, comme pour 2020, à partir des statistiques de l'enquête Teruti-Lucas réalisée entre 2006 et 2010. L'évolution du cheptel français est obtenue à partir de la tendance calculée pour chaque type de bétail depuis les années 90 (statistiques de l'Agreste [12]). Le retour au sol est maintenu à 25 % et les pertes de récolte à 50 %.

- **Scénario S2**

Tout comme pour la ressource bois, l'évolution de la surface de terres arables est déterminée avec les résultats d'Afterres2050, à savoir **une diminution de 1,7 à 2,7 millions d'hectares**. Le cheptel français en 2050 est également évalué au moyen des hypothèses d'Afterres2050. On considère ainsi une diminution de 50 % par rapport à 2010 des cheptels de bovins, porcins et caprins. Le taux de retour au sol est conservé à 25 %.

- **Scénario S3**

L'évolution de la superficie de terres cultivées est obtenue à partir du scénario AG0 d'Agrimonde, à savoir une diminution de 3,6 % des surfaces cultivées dédiées à l'alimentaire dans les pays de l'OCDE par rapport à 2003. Là encore, il faut considérer ce chiffre avec précaution, son application à l'échelle française étant discutable. De la même manière, le scénario AG0 prévoit une diminution de 17 % des pâtures entre 2003 et 2050, mais une augmentation des productions animales (+ 63 %). Il est donc délicat d'estimer l'évolution du nombre de têtes de bétail à 2050, puisque ces informations indiquent un changement dans la répartition du cheptel français (moins d'animaux en pâtures mais plus de productions animales). Par ailleurs, l'étude à 2020 a montré que peu de pailles de céréales restaient disponibles pour de nouveaux usages. **Ainsi, avec une augmentation de la production animale, il y aura à 2050 une pénurie de pailles de céréales si les pratiques d'élevage concernant les litières ne changent pas.** On fait donc l'hypothèse que toute la paille de céréale sera utilisée pour le fourrage et les litières, sans évaluer dans le détail le nombre de têtes de bétails, l'effectif paillé ou encore la part des animaux logés sur paille.

Concernant le retour au sol, on suppose que les besoins importants en biomasse énergie et donc en pailles font pression sur le taux de retour au sol, qui est fixé à 15 % (au lieu de 25 % pour les autres scénarios). On considère par ailleurs que les techniques d'exploitation agricole mises en œuvre en 2050 permettront de réduire les pertes de récolte pour atteindre 30 %.

Le Tableau 9 regroupe les hypothèses des différents scénarios.

Tendanciel	S2	S3
Evolution de la surface cultivée suivant la tendance 2006 – 2010 de l'enquête Teruti (Agreste)	Scénario d'évolution de l'usage des sols : d'après Afterres2050 : diminution des terres arables par rapport à 2010	Scénario d'évolution des surfaces cultivées d'après Agrimonde AGO : -3,6 % de surfaces cultivées dédiées à l'alimentaire dans les pays de l'OCDE (à partir de 2003)
Evolution du cheptel français suivant la tendance calculée depuis les années 90 (données Agreste)	Afterres 2050 : diminution de 50 % des cheptels de bovins, caprins et porcins par rapport à 2010	Pas de paille de céréales disponibles pour l'énergie
Retour au sol : 25 %	Retour au sol : 25 %	Retour au sol : 15 %
Pertes d'exploitation : 50 %	Pertes d'exploitation : 50 %	Pertes d'exploitation : 30 %

Tableau 11 : Hypothèses retenues pour les trois scénarios ressource agricole à l'horizon 2050

1.1.10.2. Disponibilité à l'horizon 2050

Le détail des résultats est présenté en Annexe 8.

Le Tableau 12 : Disponibilité en biomasse agricole à l'horizon 2050 et la Figure 9 montrent l'évaluation de la disponibilité bois énergie suivant les trois scénarios telle qu'estimée grâce aux hypothèses présentées précédemment.

	ST	S2	S3
Disponibilité en Mts/an	8,6	MIN : 7,7 MAX : 8,6	8,0
Disponibilité en TWh/an	43	MIN : 38 MAX : 42	41

Tableau 12 : Disponibilité en biomasse agricole à l'horizon 2050

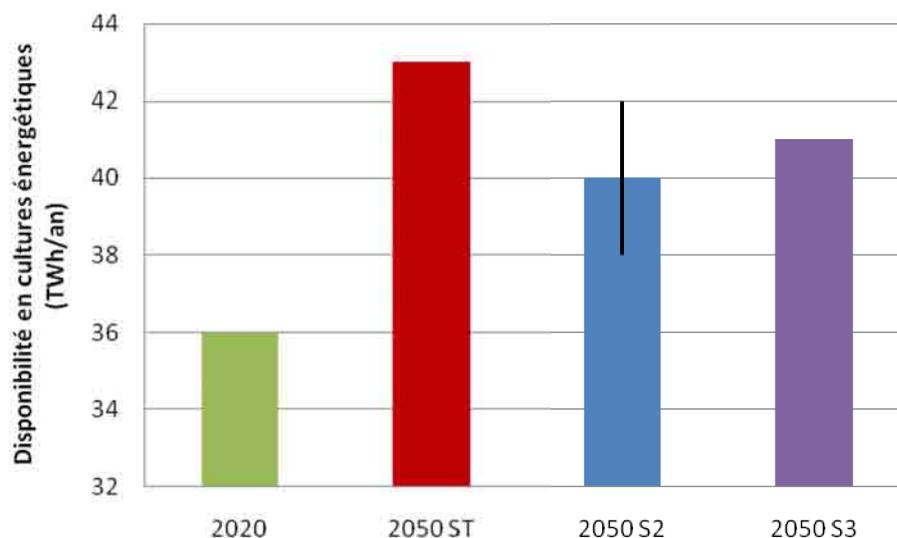


Figure 9 : Disponibilité en biomasse agricole aux horizons 2020 et 2050

S2 et S3 prennent en compte une diminution des terres cultivées, ce qui entraîne une diminution de la disponibilité en pailles. S3 n'est pas la limite haute de disponibilité dans le cas des pailles car une augmentation du nombre de têtes de bétail est prise en compte. En effet, les comportements alimentaires n'ont pas été modifiés et il n'y a pas de pailles de céréales disponibles pour l'énergie.

L'analyse de la disponibilité des pailles en France sur les 10 dernières années montre qu'il faut considérer la présence de **fluctuations majeures dans la disponibilité des pailles sur certaines années, notamment en tenant compte de l'effet des sécheresses**. Les pailles ne pourront donc pas raisonnablement constituer la base d'un plan d'approvisionnement du fait de cette incertitude sur la mobilisation réellement atteignable. Pour tenir compte de l'effet des sécheresses, il faudrait ainsi diminuer de près d'1/3 les disponibilités obtenues pour avoir la borne inférieure de la ressource paille disponible pour de nouveaux usages.

1.1.11. Cultures énergétiques

1.1.11.1. Démarche et hypothèses

La démarche globale de détermination de la disponibilité supplémentaire pour de nouveaux usages adoptée pour 2020 (paragraphe 1.1.6.1) est conservée pour la prospective 2050.

- **Scénario tendanciel**

Pour le scénario tendanciel, on considère une étude du projet HEIMSTA⁹ [13] qui prévoit **une augmentation de 0,014 % des terres dédiées aux cultures énergétiques entre 2020 et 2050**. Cette hypothèse est en cohérence avec les observations de ces dernières années où l'on s'aperçoit que le développement des cultures énergétiques est faible, notamment par manque d'attractivité économique. Par ailleurs, en comparant les estimations de l'étude HEIMSTA pour 2020 avec notre propre exercice prospectif 2020, on trouve 20 % de différence sur l'estimation. Cette différence est suffisamment faible pour permettre de mettre en cohérence les résultats HEIMSTA et ceux de la présente étude et donc d'avoir recours aux résultats HEIMSTA pour 2050.

On garde le même mix de cultures énergétiques que pour 2020 (miscanthus, triticale, peuplier, saule et eucalyptus).

⁹ HEIMSTA : Health and environment integrated methodology and toolbox for scenario assessment

- **Scénario S2**

On reprend les résultats d’Afterres2050 en terme de changement d’allocation des sols : **1,7 à 2,7 millions de terres arables sont libérées pour de nouveaux usages**. Dans S2, on suppose que l’intégralité de ces terres devient des plantations de cultures énergétiques. Pour diversifier les plantations, on garde le même mix de cultures énergétiques que précédemment (miscanthus, triticales, peuplier, saule et eucalyptus).

- **Scénario S3**

Les hypothèses d’évolution d’usage des sols du scénario **AGO d’Agrimonde sont retenues. AGO prévoit une augmentation de 12 % des surfaces cultivées entre 2003 et 2050, mais avec une diminution de 3,6 % des terres dédiées à l’alimentaire**. Les autres terres sont dédiées à la production d’agrocarburants ou de biocarburants 2G. L’usage précis de ces sols n’est pas détaillé dans l’étude. On choisit pour ce scénario S3 de maximisation de la biomasse énergie d’y implanter des cultures énergétiques. Le mix est choisi de telle sorte que l’énergie produite soit maximisée, c’est-à-dire qu’on plante celles ayant le meilleur rendement à l’hectare et le meilleur PCI, à savoir le miscanthus et le triticales.

1.1.11.2. Disponibilité à l’horizon 2050

Le détail des calculs est présenté en Annexe 9.

Le Tableau 13 et la Figure 10 : Disponibilité en cultures énergétiques aux horizons 2020 et 2050 présentent les résultats de l’exercice prospectif 2050 pour les cultures énergétiques suivant les différents scénarios.

	ST	S2	S3
Disponibilité en TWh/an	94	MIN : 104 MAX : 165	205

Tableau 13 : Disponibilité en cultures énergétiques à l’horizon 2050

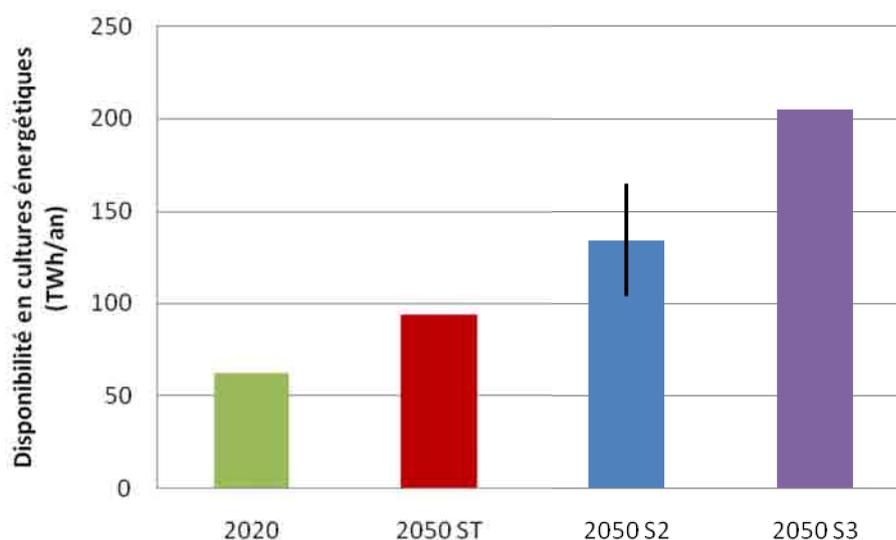


Figure 10 : Disponibilité en cultures énergétiques aux horizons 2020 et 2050

La tendance étant au développement de la biomasse énergie entre 2020 et 2050, on observe nettement une augmentation de plantations de cultures énergétiques, due à l’augmentation des surfaces dédiées.

Tout comme pour 2020, il faut souligner que **ceci n'est qu'un potentiel maximal et que l'implantation réelle de cultures énergétiques sera une fraction de ce potentiel**. Ainsi le potentiel obtenu semble à première vue très élevé, mais cela ne correspond qu'à un maximum. Ce graphique montre avant tout que le développement des cultures énergétiques est techniquement possible et que les surfaces nécessaires peuvent être trouvées.

1.1.12. Déchets bois de fin de vie, boues de papeterie et résidus d'industries agroalimentaires

Une démarche identique à celle développée pour l'horizon 2020 a été adoptée.

L'INSEE prévoit que la population française en 2050 atteindra 70 millions d'habitants. A la disponibilité totale on retranche la partie faisant l'objet d'une valorisation matière ou énergie.

En reprenant la méthodologie retenue dans le projet GAYA **on obtient pour 2050 une disponibilité de 1,1 TWh/an** pour les déchets bois fin de vie. Si on considère que les déchets de bois de classe B peuvent également être utilisés, la disponibilité est augmentée à **2,8 TWh/an**.

Pour les boues de papeterie, on conserve la même estimation de coproduits que pour 2020, à savoir **650 GWh/an**.

L'exercice prospectif pour les résidus d'IAA n'étant pas fait à l'horizon 2050, on garde également le même potentiel que pour 2020, l'erreur étant négligeable par rapport aux autres ressources puisque les quantités engagées sont beaucoup plus faibles. **3,1 TWh/an de coproduits IAA** sont disponibles.

1.1.13. Importations

Des importations de granulés de bois, ou « pellets », sont à dimensionner pour les scénarios tendanciel et numéro 2. Cette variable étant exogène, on la traite ici **dans ce paragraphe séparé**. Il suffira ensuite d'ajouter le volume d'importations aux estimations présentées dans le paragraphe 1.1.9.

Il est très difficile d'estimer un volume d'importations à moyen ou long terme car peu de données sont disponibles à ce sujet. En effet, à l'heure actuelle la France importe peu de biomasse énergie, contrairement à d'autres pays d'Europe tels que les Pays-Bas ou la Belgique.

Plusieurs tendances pourront se dessiner à l'avenir. Il y a possibilité que, sous l'impulsion de l'Union Européenne, les pays doivent valoriser en premier lieu les biomasses locales et que des contraintes fortes soient fixées sur les importations. On peut aussi imaginer que, le développement du recours à la biomasse énergie faisant augmenter les prix de vente en France, les producteurs d'énergie se tournent vers les importations.

Bien que Madame la Ministre du Développement Durable ait déclaré son attachement à une vision locale de la valorisation du bois en énergie (Colloque Bois Energie SER, juillet 2012), **la France n'a actuellement pas de positionnement officiel vis-à-vis de ces deux possibilités**. Cette étude ayant pour but une évaluation objective du potentiel de production de biométhane 2G, on **considère l'éventualité d'un développement des importations**. Cette hypothèse est faite dans les scénarios tendanciel et S3. Le scénario S2 quant à lui conserve une hypothèse de valorisation locale de la biomasse, sans recours aux importations.

La difficulté rencontrée est celle d'évaluer à partir de rien un volume d'importations vraisemblable. Le raisonnement mené a consisté à considérer que, si des importations massives ont lieu, il sera peu intéressant sur le plan environnemental et économiquement de transporter ces grands volumes sur de longues distances. **Les granulés étant acheminés jusqu'à la France par bateau, on suppose donc que les usines s'approvisionnant à partir de cette biomasse seront placées près de ports français**.

On suppose la construction à l’horizon 2050, pour ST et S3, de trois usines situées près de trois grands ports (Le Havre, Nantes et Marseille par exemple). Les unités, de grande taille, produiront 400 MW de biométhane. La puissance biomasse en entrée est donc de 800 MW_{thermique} (rendement du procédé paragraphe 4.1). On ne considère que trois unités car il faut considérer les **difficultés logistiques rencontrées lors de l’implantation de telles unités dans un port** : taille conséquente du stockage bois, gestion du déchargement des bateaux **apportant les granulés, manipulation du bois sur le parc à bois...** Il faudra donc réaliser des modifications conséquentes dans les ports concernés pour leur permettre de gérer une telle logistique. En première approche, seulement trois ports sont donc retenus pour cet exercice prospectif.

D’un point de vue pratique, la localisation des unités directement dans les ports permet de limiter les considérations logistiques pour l’acheminement des granulés sur le reste du territoire métropolitain. Par ailleurs, dans l’hypothèse où l’acheminement des granulés se ferait par camion dans les terres et non par barge, l’impact climatique de l’usine serait supérieur à celui du scénario portuaire. L’hypothèse d’une localisation des grandes unités de production dans les ports français a été retenue pour cet exercice prospectif. Il serait cependant possible de considérer d’autres implantations en France dans un second temps. Il serait alors judicieux de réaliser une évaluation environnementale assortie d’une étude technico-économique de tous les scénarios afin de pouvoir effectuer une comparaison entre les bénéfices liés à chaque implantation.

La puissance d’entrée considérée (trois fois 800 MW_{thermique}) correspond à une énergie annuelle à fournir en **granulés de 19,2 TWh/an, soit 4,3 millions de tonnes par an.**

Cette quantité d’importations est utilisée pour les deux scénarios intégrant des importations : tendanciel et S3.

Cette estimation doit être vue comme un exercice et en aucun cas comme un positionnement vis-à-vis des importations. Il a été jugé préférable de procéder ainsi, plutôt que de prendre comptant les estimations des producteurs de granulés outre atlantique (Pro Pellets...).

3.5. Récapitulatif des résultats

Le Tableau 14 et la Figure 11 présentent une agrégation des résultats présentés précédemment. Sur la Figure 11, les cultures énergétiques ne sont pas représentées car de très nombreuses incertitudes pèsent sur les gisements évalués et il a été jugé préférable de ne pas interférer avec les autres résultats. La disponibilité en cultures énergétiques est représentée sur la Figure 12.

Unité : TWh/an	BIBE/MB	Biomasse agricole	Cultures énergétiques	PCS / DIB / boues papeterie	IAA	Importations	Total
2020	79	36	62	1,7	3,1	-	181,8
2050 ST	108	43	94	1,8	3,1	19,2	269,1
2050 S2	125	40	134	1,8	3,1	-	303,9
2050 S3	163	41	205	1,8	3,1	19,2	433,1

Tableau 14 : Récapitulatif des disponibilités en biomasse pour 2020 et 2050

Lorsque la disponibilité obtenue était une fourchette, la valeur médiane a été reportée dans ce tableau.

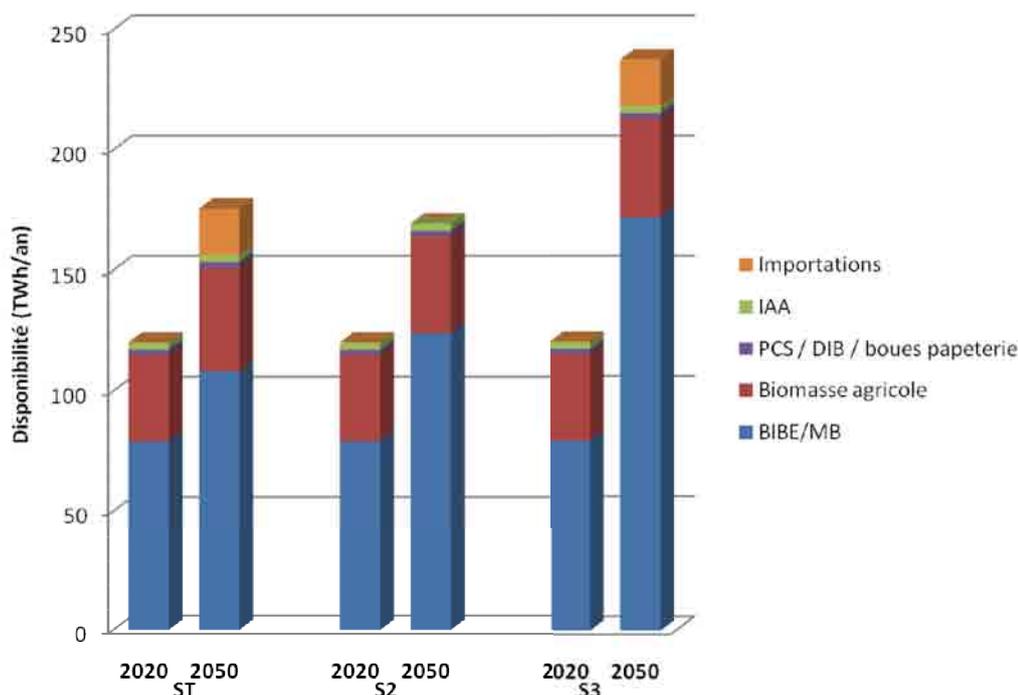


Figure 11 : Disponibilité totale aux horizons 2020 et 2050 pour chaque ressource pour les hypothèses considérées, hors cultures énergétiques

Cultures énergétiques

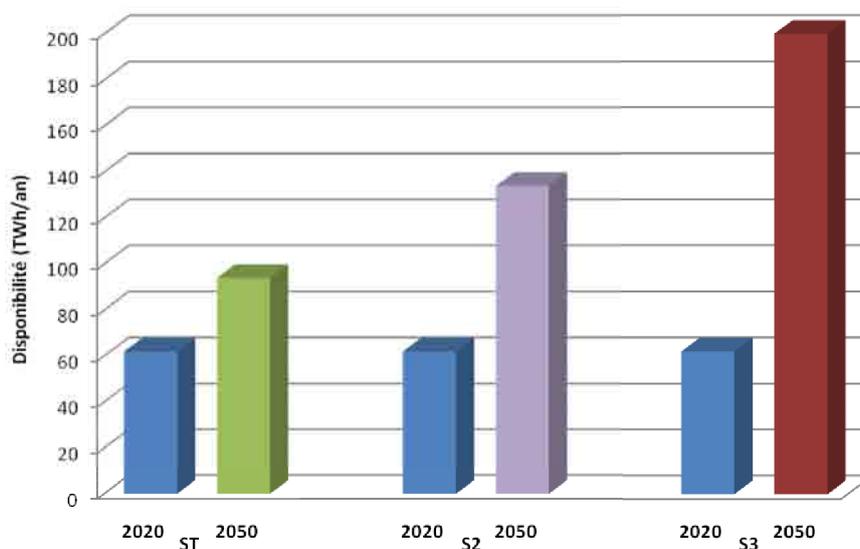


Figure 12 : Disponibilité en cultures énergétiques aux horizons 2020 et 2050

Les importations sont à considérer différemment des autres ressources. En effet, l'estimation des importations a été réalisée « au plus près », c'est-à-dire au moyen d'un scénario fixant une quantité de granulés potentielle, alors que la démarche retenue pour l'estimation des autres ressources repose sur des potentiels globaux, sans prise en considération de consentement à offrir (identifié comme un élément de contexte clé en France selon les études des projets ANR REGIX et SYLVABIOM) ou d'allocation entre différentes valorisations énergétiques.

Ces résultats permettent de conclure que la biomasse est disponible en quantité suffisante pour alimenter une filière de production de biométhane 2G, en parallèle d'autres filières énergétiques. La non prise en compte d'un consentement à offrir des propriétaires ainsi que de la compétition entre différents modes de valorisation énergétique ne permettent pas de conclure sur les quantités qui seront réellement

accessibles à la filière en 2020 et 2050. L'allocation de cette biomasse à la filière de production de biométhane 2G sera une part de cette disponibilité totale, qu'il est à ce jour difficile de déterminer avant que ces nouvelles filières ne soient industrialisées. **Cette étude se borne à déterminer un potentiel technique global qui représente néanmoins un indicateur pertinent de l'intérêt de la filière et de sa capacité à valoriser au mieux une ressource finie telle que la biomasse.**

On constate également que les cultures énergétiques représentent une grande part de la disponibilité supplémentaire en biomasse. Cependant leur développement est encore incertain et dépend de plusieurs variables, avec en ligne de mire la question de la pertinence économique pour les agriculteurs et de leur intégration à l'évolution du modèle agricole. Par ailleurs, les hypothèses prises ont été celles d'implantations massives sur les terres arables disponibles, sans prendre en compte par exemple d'éventuelles cultures dédiées à la production de biogaz par méthanisation, d'espaces de terres réservés pour la production de micro-algues (biométhane 3G) ou des réticences à planter sur ces terres. Les résultats obtenus pour les cultures énergétiques sont très probablement surévalués et permettent uniquement de donner un aperçu de la limite haute d'implantation de ces cultures et de leur impact sur le potentiel global.

La Figure 11 montre également que le gisement pailles (biomasse agricole) varie peu en fonction des hypothèses et des horizons de temps. Par ailleurs il est plus faible que celui du bois et soumis à fluctuations entre les différentes années en fonction des aléas climatiques. Ainsi, les résultats mettent en évidence le fait **qu'aux horizons 2020 et 2050, la ressource forestière constituera toujours la ressource de base pour les plans d'approvisionnement des unités de valorisation énergétique.**

4. Evaluation du potentiel de production de biométhane 2G

4.1. Démarche retenue

A partir des disponibilités en biomasse évaluées précédemment, il s'agit, pour 2020 et 2050, de regarder le potentiel de production de biométhane 2G à partir de ces ressources. Le procédé de transformation de la biomasse en biométhane 2G a été présenté au paragraphe 0. La démarche adoptée consiste à appliquer au potentiel énergétique de biomasse disponible un rendement énergétique global de toute la chaîne de production de biométhane 2G. On obtient ainsi un potentiel total énergétique de biométhane 2G aux différents horizons de temps. La Figure 13 montre une représentation schématique de cette démarche.

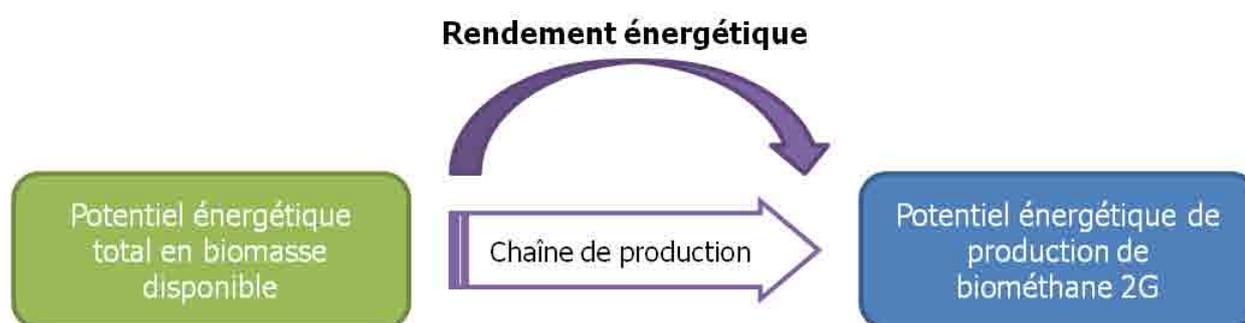


Figure 13 : Méthode de détermination du potentiel de production du biométhane 2G à partir de la biomasse disponible

Comme précisé dans la description de la chaîne de procédés, il existe différentes technologies pour les réacteurs de gazéification et de méthanation. Les étapes d'épuration et de mise aux spécifications ont les mêmes performances énergétiques quelle que soit la technologie de gazéification et de méthanation utilisée.

Dans le réacteur de méthanation, la réaction qui s'opère est à l'équilibre. Le rendement énergétique ne dépend donc pas de la technologie utilisée. Pour cette étude, il n'est donc pas nécessaire de faire des hypothèses sur les technologies utilisées à l'horizon 2050 ou 2020 pour l'étape de méthanation.

A l'inverse, les performances du réacteur de gazéification dépendent de la technologie de lit utilisée : fixe, fluidisé ou entraîné. Un tableau présentant les caractéristiques, les avantages et les inconvénients de ces trois technologies est présenté en Annexe 1. La technologie en lit fixe est robuste et mature. Cependant, à l'heure actuelle cette technologie n'est adaptée que pour des petites puissances, de l'ordre de quelques mégawatts, et aucune réalisation même pilote n'est connue pour la production de biométhane. Il n'est pas exclu que des travaux de recherche menés sur cette technologie permettent une utilisation pour de plus fortes puissances. Cependant, rien ne permet de l'affirmer actuellement.

La technologie en lit entraîné, initialement développée pour le charbon, nécessite un réacteur sous pression et est adaptée pour les très grandes puissances, de l'ordre de la centaine de mégawatts. En effet, la mise sous pression du réacteur permet de gazéifier des plus grandes quantités de biomasse. C'est par exemple la technologie utilisée pour les installations de production de biocarburants liquides de seconde génération par Fischer-Tropsch, qui nécessite des installations de grande puissance pour réduire les coûts. L'inconvénient de cette technologie pour notre application biométhane 2G est donc la très grande quantité de biomasse nécessaire pour alimenter des unités de forte puissance, ce qui limite fortement le recours à la ressource locale.

Pour avoir des installations de puissance médium (quelques dizaines de mégawatts), la technologie du lit fluidisé est adaptée. C'est la technologie utilisée sur l'installation de Güssing, en Autriche, qui a déjà fonctionné en production de biométhane (puissance 1 MW). Repotec, société qui a construit cette usine et possède le savoir-faire de la technologie FICFB (Fast Internal Circulating Fluidized Bed) a également fourni l'ingénierie de base pour le gazéifieur de l'installation de 20 MW du projet GoBiGas (Göteborg, Suède) et pour celui du projet GAYA de 500 kW en entrée de GDF SUEZ à Saint-Fons.

La démarche proposée est de considérer que, sur le territoire français, des installations de taille moyenne se répartissent en fonction des zones où la biomasse est disponible tout en permettant de valoriser l'ensemble des ressources du territoire. La technologie de gazéification disposant du plus grand potentiel d'application est le lit fluidisé. Ponctuellement, des installations de petites puissances (quelques mégawatts) pourront être installées à côté de sources de biomasse spécifiques disponibles. Par exemple, on peut imaginer implanter une petite installation à proximité d'une usine produisant des grignons d'olive¹⁰ en coproduits. La technologie de gazéification pourrait alors être du lit fixe. Cependant, il est impossible de déterminer actuellement le nombre et la localisation de telles installations. **Seule la technologie lit fluidisé a été considérée dans l'étude pour les horizons 2020 et 2050 pour les installations de taille moyenne.**

Par ailleurs, dans les cas où des importations de granulés sont prévues, nous avons considéré précédemment que ces granulés seraient valorisés dans des installations de grande puissance (quelques centaines de mégawatts). La technologie la plus adaptée est donc celle du lit entraîné.

On considère donc deux filières différentes :

- Celle avec des gazéifieurs lit fluidisé ;
- Celle avec des gazéifieurs lit entraîné (cas des importations, trois installations prévues).

Actuellement, **il a été démontré à une échelle pilote de 1 MW un rendement énergétique de 56 % pour la production de biométhane 2G.** Le rendement énergétique est le rapport entre l'énergie contenue dans le biométhane en sortie du procédé et l'énergie contenue dans la biomasse en entrée du procédé. En considérant en plus la chaleur issue du procédé pouvant être valorisée, on obtient un rendement de 70 à 74 %.

Des travaux d'optimisation énergétique vont être menés dans les prochaines années, notamment au moyen des installations qui vont être construites (projet GAYA, GoBiGas). On estime ainsi pouvoir améliorer le rendement énergétique du procédé de production de biométhane 2G à l'horizon 2050 pour atteindre 60 à 65 %.

En ce qui concerne le procédé avec lit entraîné, le rendement énergétique attendu avec un gazéifieur type Choren suivi d'un réacteur de méthanation en lit fixe conventionnel est d'environ 45 % [14]. Là encore on estime qu'à l'horizon 2050, celui-ci pourra être compris entre 45 et 50 %.

Le tableau récapitule les rendements considérés pour évaluer le potentiel de production de biométhane 2G.

	2020	2050
Lit Fluidisé	56 %	60 – 65 %
Lit entraîné	45 %	45 – 50 %

Tableau 15: Rendements de la chaîne de procédés de production de biométhane 2G en fonction des technologies de gazéification considérées

¹⁰ Grignon d'olive : sous-produit du processus d'extraction de l'huile d'olive composé des peaux, des résidus de la pulpe et des fragments des noyaux

4.2. Potentiel de production de biométhane 2G

1.1.14. Biométhane 2G à l'horizon 2020

En appliquant le rendement énergétique du procédé de production de biométhane 2G par gazéification en lit fluidisé, les potentiels suivants sont obtenus :

2020	BIBE / MB	Biomasse agricole	Cultures énergétiques	PCS / DIB /Boues papeterie	IAA	Total
Potentiel biométhane 2G Min	32,5	20,2	34,7	0,95	1,7	90,0
Potentiel biométhane 2G Max	56	20,2	34,7	0,95	1,7	113,6

Tableau 16 : Potentiel de production de biométhane 2G à l'horizon 2020

Les limites minimum et maximum proviennent du domaine de variation de prix d'achat bord de route du BIBE (entre 13 et 23 €/MWh).

Par ailleurs, la valorisation de la chaleur dégagée par le procédé permet d'atteindre un rendement global compris entre 70 et 74 %. Cela correspond à une plage de **25 à 33 TWh/an de chaleur valorisable, chez des industriels à proximité des installations** par exemple (poste de séchage d'une papeterie...).

Le potentiel déterminé par cette méthode n'est cependant pas réaliste. Outre les limitations sur la ressource biomasse présenté au paragraphe précédent, il faut également considérer qu'actuellement aucune installation industrielle de production de biométhane 2G n'est opérationnelle ou même en construction en France. Or 2020 est un horizon de temps proche et pour que des installations industrielles soient opérationnelles d'ici là, il faudrait que la décision de construire soit prise dès 2015.

Le potentiel biomasse ne sera donc pas la limitation à cet horizon de temps puisque seulement quelques installations industrielles pourraient être en opération d'ici 2020.

1.1.15. Biométhane 2G à l'horizon 2050

En appliquant les rendements énergétiques des procédés de production de biométhane 2G par gazéification en lit fluidisé et en lit entraîné, les potentiels suivants sont obtenus, en fonction des scénarios :

2050	BIBE / MB	Biomasse agricole	Cultures énergétiques	PCS / DIB / Boues papeterie	IAA	Importations	Total
Potentiel biométhane 2G							
ST min	64,8	25,8	56,4	1,1	1,9	8,6	158,6
ST max	70,2	28,0	61,1	1,2	2,0	9,6	172,1
S2 min	73,2	22,8	62,4	1,1	1,9	0	161,3
S2 max	83,2	27,3	107,3	1,2	2,0	0	221,0
S3 min	97,8	24,6	123	1,1	1,9	8,6	257,0
S3 max	105,9	26,6	133,2	1,2	2,0	9,6	278,7

Tableau 17 : Potentiel de production de biométhane 2G à l'horizon 2050

1.1.16. Récapitulatif des potentiels de production de biométhane 2G

Comme précisé au début de l'étude, l'hypothèse a été faite que tout le biométhane ainsi produit est injectable dans le réseau de transport ou de distribution en France. Ainsi, le potentiel de production de biométhane 2G estimé donne directement le potentiel injectable sur le réseau de gaz naturel.

La Figure 14 montre les potentiels obtenus. Comme les incertitudes sur le développement réel des cultures énergétiques sont très fortes, le choix a été fait de représenter graphiquement en couleur la partie de biométhane produit à partir de biomasses autres que les cultures énergétiques, et en gris le potentiel de production supplémentaire induit par ces cultures dédiées.

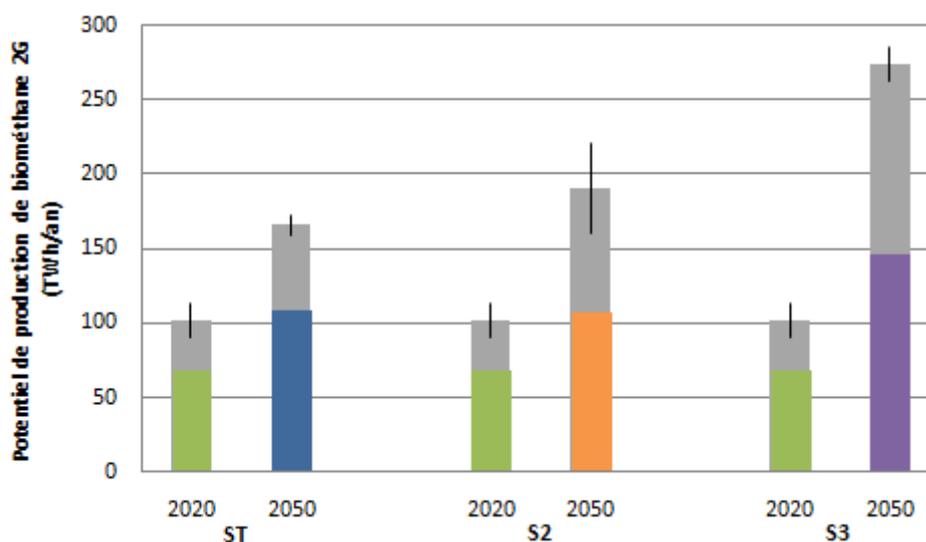


Figure 14 : Potentiel de production de biométhane 2G à 2020 et 2050

Là encore, la barre d'incertitude permet de visualiser les potentiels minimum et le maximum obtenus pour chaque scénario.

Comme le calcul du biométhane a été effectué à partir de la disponibilité en biomasse calculée précédemment, les mêmes limitations sont conservées, notamment en terme de surévaluation du développement des cultures énergétiques...

Le domaine de variation pris pour le rendement permet de voir la sensibilité du potentiel de production de biométhane 2G par rapport au rendement énergétique. **Lorsque l'on gagne un point de rendement sur le procédé en lit fluidisé et sur celui en lit entraîné, le potentiel total à l'horizon 2050 (scénario tendanciel) augmente de 1,7 %.**

5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les potentiels de production de biométhane 2G à l'horizon 2020 et 2050 déterminés dans le cadre de cette étude sont de l'ordre de :

- **100 TWh/an** sur la base d'un scénario bas et à l'horizon 2020 ;
- **250 TWh/an** avec un scénario haut et à l'horizon 2050.

Ces potentiels sont dits « techniques », c'est-à-dire qu'ils prennent en compte l'ensemble de la biomasse disponible pour de nouveaux usages y compris les cultures énergétiques. Ces valeurs permettent d'évaluer le potentiel « maximal » de la filière biométhane 2^{ème} génération et sont à comparer aux 400 TWh de gaz naturel consommé en France en 2011. L'obtention de ce potentiel considérable (jusqu'à 62 % de la consommation 2011 de gaz naturel en France) est rendu possible par :

- Des technologies de 2^{ème} génération à très haut rendement (56 % en base et jusqu'à 70 % en cogénération chaleur/biométhane) et flexibles, capables de fonctionner sur l'ensemble du territoire français avec des biomasses très variées (forestières et sous-produits agricoles) et avec peu de contraintes sur leur mise en forme (plaquettes, broyat,...) ;
- Une filière décentralisée avec des unités de taille moyenne permettant d'accéder à la majorité du gisement disponible avec des circuits d'approvisionnement courts ;

Le recours à l'injection du biométhane dans le réseau de gaz permettant de transporter le biométhane jusqu'aux zones de consommation avec un très faible impact environnemental.

Les hypothèses fixées dans l'étude pour évaluer les potentiels aux différents stades (biomasse puis production de biométhane) ont couvert différentes options d'évolution du modèle de développement économique de la société française et ont permis de proposer des estimations basse et haute de ce que sera le potentiel réel de la filière.

Les cultures énergétiques ont été traitées spécifiquement sur la base de données de la littérature, très souvent optimistes sur les hypothèses d'émergence de ce nouveau type de culture dont le modèle économique n'a pas encore fait ses preuves en France. Ces estimations, sur lesquelles il est nécessaire de rester prudent, ont donc été présentées de manière séparée du reste des autres biomasses dont le gisement est aujourd'hui réellement disponible.

Il apparaît notamment au travers de cette étude, qu'aux horizons 2020 et 2050, la ressource forestière constituera toujours la ressource de base pour les plans d'approvisionnement des unités de valorisation énergétique.

Par ailleurs, cette étude s'appuie sur un nombre restreint de scénarios, peu d'études analysant les perspectives à 2050 étant disponibles à ce jour. Une comparaison critique de ces scénarios a été effectuée et a permis de mettre en évidence leurs forces et faiblesses. Les Pouvoirs Publics travaillent actuellement à la réalisation d'études prospectives sur des scénarios plus affinés dans le cadre du débat 2013 sur la transition énergétique. Ces premiers scénarios seront réalisés dans les mois et années à venir et permettront d'affiner cette première évaluation à l'horizon 2050.

Des études ultérieures seront également nécessaires afin d'analyser l'impact du consentement à offrir sur la mobilisation des ressources forestières et agricoles. Des scénarios d'allocation pourront également être étudiés en fonction de la pertinence technico-économique et de l'intérêt sociétal des différentes filières pouvant faire appel aux mêmes ressources. Dans un contexte de compétition d'usage sur la ressource lignocellulosique entre

nouvelles filières, le rendement élevé et la flexibilité technique de la filière biométhane 2G représentent des atouts clés afin de valoriser au mieux une ressource limitée et diffuse au sein des territoires.

Des travaux de recoupement scénaristique pourraient également être réalisés sur la valorisation optimale des **terres arables non cultivées à l'horizon 2050**. En effet, outre la possibilité de planter des biomasses destinées à la filière méthanisation, il est **possible d'envisager qu'à l'horizon 2050 les systèmes de culture de micro-algues** seront matures et nécessiteront des réservations de surface pour se développer tout en proposant des rendements de production nettement supérieurs aux cultures traditionnelles. Ces questions soulevées par les **résultats de ce rapport pourront faire l'objet de travaux ultérieurs notamment à l'échelle du territoire** qui viendront affiner la première évaluation réalisée dans cette étude.

6. Bibliographie

- [1] GDF SUEZ, IFP, ADEME, Etude Biogaz - Etat des lieux et potentiel du biométhane carburant, février 2009
- [2] [F. LEGRAND, Rapport interne GDF SUEZ, Projet GAYA : Procédés d'épuration des goudrons, état de l'art et premières préconisations, 2011
- [3] Jarry A., Note de synthèse sur la mise aux spécifications dans la filière SNG, projet VEGAZ, GDF SUEZ, 2011
- [4] IFN, FCBA, SOLAGRO, Biomasse forestière, populeuse et bocagère disponible pour l'énergie, novembre 2009
- [5] ADEME, Feuille de route R&D de la filière Chimie du Végétal, 2010
- [6] Statistiques de l'AGRESTE, Enquête Teruti-Lucas, 2010
- [7] RENEW, Renewable fuels for advanced powertrains, final report, 2008
- [8] Synthèse de l'Agreste – Animaux de boucherie – numéro 2011/138 de janvier 2011 : Des équilibres régionaux fragiles pour l'approvisionnement en paille des litières animales
- [9] EEA report, How much bioenergy can Europe produce without harming the environment?, N°7/2006
- [10] Mantau U. and Al., Real potential for changes in growth and use of EU forests, Final report, EUwood, juin 2010
- [11] Agreste Primeur, Une bonne gestion des déchets organiques, Numéro 245 – juillet 2010
- [12] Agreste, Alimentation des animaux de ferme, 2011
- [13] Site Internet du projet HEIMSTA : <http://www.heimtsa.eu/Results/Deliverables/tabid/2937/language/en-GB/Default.aspx>
- [14] Choren Industries, Energy balance
- [15] ADEME, MAAPRAT, Solagro, Facteur 4 – Agriculture et forêt, Rapport final de décembre 2011

Annexe 1 : Technologies de gazéification

Gazéifieurs à lit fixe

Technologie	Contre-courant (« updraft »)	Co-courant (« downdraft »)
	<p>Application : thermique</p>	<p>Application : Electricité (Cogénération)</p>
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> • Technologie simple et robuste • Biomasse humide et hétérogène utilisable • Rendement chimique élevé : récup de chaleur directe 	<ul style="list-style-type: none"> • Technologie simple et robuste • Teneur en goudrons plus faible que le contre-courant
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> • Teneur en goudrons très élevée • Condensation des gaz en sortie • Application pour des faibles puissances • Influence importante de la granulométrie 	<ul style="list-style-type: none"> • Application pour des faibles puissances
Maturité/ Acteurs	<ul style="list-style-type: none"> • Technologie mature, références industrielles • Constructeurs : Nexterra, Volund, Bioneer... 	<ul style="list-style-type: none"> • Technologie mature, références industrielles • Constructeurs : Xylowatt, Fluidyne, DTU...

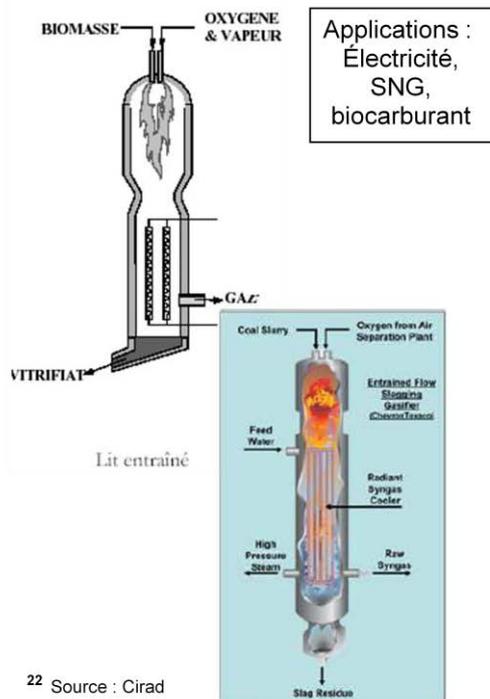
Source : Cirad

Gazéifieurs à lit fluidisé

Lit fluidisé dense (bouillonnant) ou circulant	
	<p>Applications : Cogénération, SNG, biocarburant</p>
Conditions opératoires	<ul style="list-style-type: none"> • Agent oxydant : Air, vapeur, O₂ • T° gazéification : ~ 900 °C • Temps de séjour : qq s (gaz), qq min (char) • Pression : 1-20 bar
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> • Extrapolation possible • Homogénéité température (pas de point chaud)
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> • Complexité • Particules dans les gaz (cendres, lit...) • Teneur en goudrons élevée (mais moins que pour le lit fixe) • Taille minimale de rentabilité • Risques liés à la fusion des cendres
Acteurs	<ul style="list-style-type: none"> • Repotec (FICFB), Carbona, Lurgi, Foster Wheeler

Source : Cirad

Gazéifieurs à lit entraîné



Avantages	<ul style="list-style-type: none"> • Compacité (T° et P élevées) • Taux de goudrons très faible • Pour de très grosses puissances
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> • Complexité et coûts (matériaux...) • Taille minimale de rentabilité • Reformage CH₄ (pb pour la prod de SNG) • Biomasse très fine requise • Fusion des cendres
Acteurs	<ul style="list-style-type: none"> • Choren, Texaco, Shell, Lurgi MPG

Annexe 2 : Présentation des trois catégories de bois (Extrait de l'étude Bois Energie ADEME/SOLAGRO)

La définition des compartiments de biomasse est la suivante :



IFN -FCBA - SOLAGRO
2009

Menu bois

Bois industrie/Bois énergie (BIBE)

Bois d'œuvre (BO)

Les disponibilités en bois sont ventilées dans l'étude par type d'usages potentiels (BO, BIBE, MB) suivant ses proportions définies par essence et par région en fonction de l'âge et / ou du diamètre moyen des arbres coupés :

Trois catégories d'usages potentiels des bois sont définies, sans présumer de leurs usages effectifs :

1. Usage potentiel bois d'œuvre (appelé BO par convention) :

Ce compartiment est défini comme l'ensemble de la biomasse comprise dans la bille de pied et les surbilles de tige, jusqu'à la découpe bois d'œuvre, et dont la qualité autorise des usages bois d'œuvre.

Autre appellation possible pour ce compartiment : bois de diamètre fin bout souvent supérieur à 7 cm et potentiellement valorisable sous une forme bois d'œuvre. On considère a priori que les branches ne comportent pas de BO.

2. Usage potentiel Bois d'Industrie et Bois Energie (appelé BIBE par convention) :

Ce compartiment est défini comme la somme des trois composantes suivantes :

(1) la biomasse de la tige comprise entre la découpe BO et la découpe bois fort (7 cm),

(2) la biomasse de la tige de dimension BO mais dont l'usage potentiel ne peut être le BO en raison d'une qualité insuffisante,

(3) la biomasse comprise dans les branches jusqu'à la découpe bois fort (7 cm).

Autre appellation possible pour ce compartiment : bois de diamètre fin bout supérieur à 7 cm et valorisable sous des formes industrielles et énergétiques. Les bûches sont incluses dans cette définition.

3. Usage potentiel plaquettes et granulés (appelé MB ou menus bois par convention) :

Ce compartiment est défini comme l'ensemble de la biomasse de la tige et des branches comprise dans les bois de diamètre inférieur à 7 cm à leur plus grosse extrémité.

Autre appellation possible pour ce compartiment : menus bois de diamètre fin bout inférieur à 7 cm potentiellement valorisables sous des formes énergétiques.

NB1 : les arbres non recensables (arbres de diamètre à 1,30 m inférieur à 7,5 cm) ne sont pas estimés. Ils ne sont pas inventoriés en raison de leur faible volume comparativement à celui des arbres recensables.

NB2 : feuilles et aiguilles sont exclues de l'évaluation de la biomasse disponible pour l'industrie ou l'énergie.

Annexe 3 : Les différentes ressources de biomasse et les procédés de transformation à mettre en œuvre pour produire des biocarburants liquides et gazeux (extrait étude AFGNV)

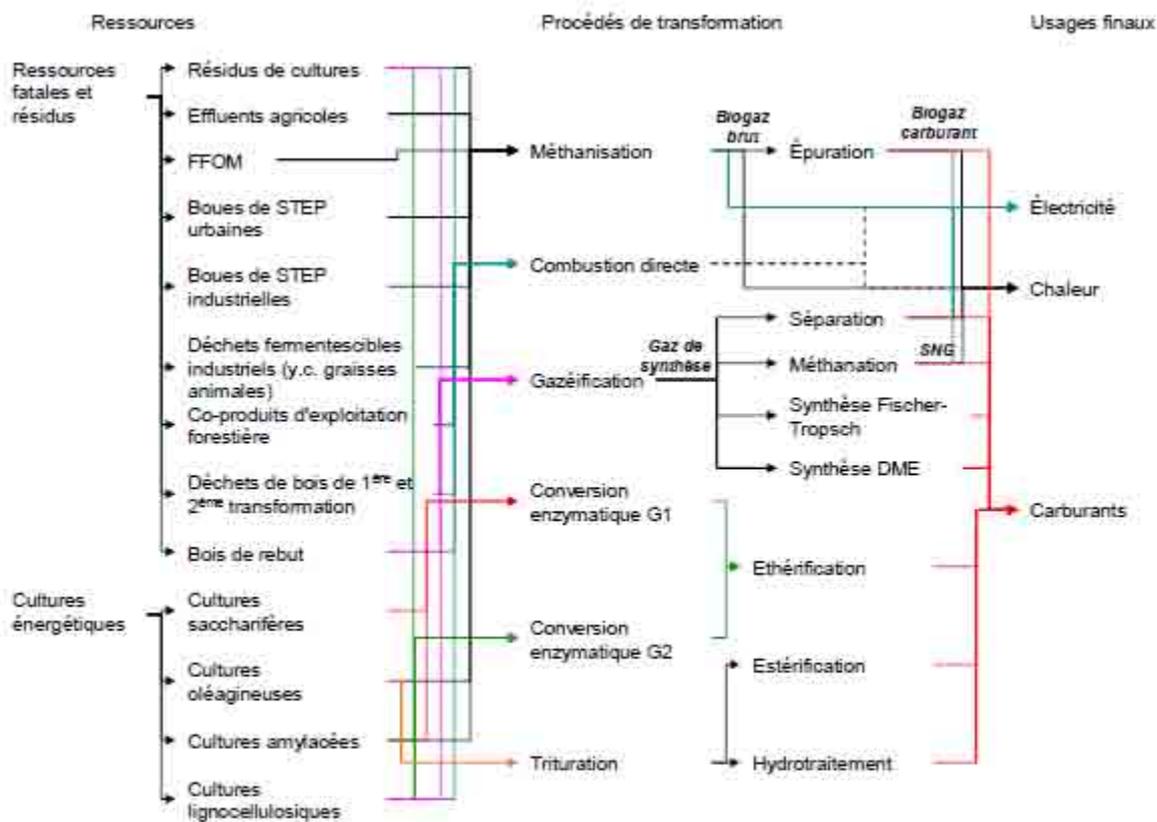


Figure 1 - Les différentes ressources de biomasse et les procédés de transformation à mettre en œuvre pour produire des biocarburants liquides et gazeux

Annexe 4 : Détail des résultats de la disponibilité en biomasse agricole à l’horizon 2020

Changement d'usage des sols (enquête TERUTI-LUCAS) et hypothèses

	2006	2010	Evolution annuelle
Surfaces cultivées (ha)	18 646 171	18 782 881	0,00182793

Pertes de récolte → **50%**
Retour au sol → **25%**
Besoins en fourrage → **0,2*GTR**

Besoins en litières

Statistiques de l'Agreste

	Têtes 1990	Têtes 2000	Têtes 2009	Têtes 2010	Evolution	Besoins en paille (t/tête)	Effectif paillé	Besoins paille litière 2020 (t/an)
Bovins	21 446 000	20 259 000	19 805 378	19 620 947	-0,0044	0,76	87%	12 409 081
Porcins		15 002 000	14 718 918	14 531 916	-0,0032	0,409	7%	403 012
Caprins			1 329 160	1 349 031	0,015	0,315	87%	428 843
Ovins	11 499 000	9 416 000	8 093 182	7 976 545	-0,016	0,13	87%	763 968
Total			43 946 638	43478439				14 004 904

	Blé	Orge	Seigle	Avoine	Colza	Tournesol	Mais
Surface plantée (ha)	5 526 839	1 611 179	30 041	100 188	1 492 199	707 724	1 611 897
Rendement à l'ha (t/ha)	7,49	6,80	5,20	4,90	3,80	2,40	8,90
Production (t/an)	41 400 627	10 956 019	156 211	490 922	5 670 357	1 698 537	14 345 886
Ratio paille grain	0,8	0,8	0,8	0,8	1,6	3,3	0,7
Humidité (%)	15%	15%	15%	15%	45%	40%	40%
GTOT paille	33 120 502	8 764 816	124 969	392 737	9 072 571	5 605 171	10 042 120
GTR	16 560 251	4 382 408	62 485	196 369	4 536 285	2 802 585	5 021 060
Total (thumides)	21 201 512				4 536 285	2 802 585	5 021 060
GTR après élevage (t humides)	2 956 305				4 536 285	2 802 585	5 021 060
GDD (Mts)	1,88				1,87	1,26	2,26
PCI (MWh/ts)	4,78				4,58	6,78	4,58
GDD (TWh/an)	8,99				8,56	8,54	10,35

⇒ **Soit 36 TWh/an**

GTOT : Gisement total

GTR : Gisement techniquement récoltable

GDD : Gisement durablement disponible

Annexe 5 : Présentation d'Afterres2050

Afterres2050 : Scénario d'utilisation des terres agricoles et forestières pour satisfaire les besoins en alimentation, en énergie, en matériaux, et réduire les gaz à effet de serre, réalisé par SOLAGRO

Les éléments ci-dessous sont des éléments extraits de la synthèse publique du projet qui concernent les hypothèses retenues dans la présente étude :

Afterres2050, pourquoi et comment ?

En 2050, l'agriculture et la forêt devront nourrir en France 70 millions d'habitants, le bétail, fournir énergie et matériaux tout en préservant la fertilité des sols, la qualité des eaux, la biodiversité sans oublier le climat, l'objectif en la matière étant de réduire d'un facteur 4 nos émissions de gaz à effet de serre d'ici à 2050.

Disposerons-nous des surfaces nécessaires pour satisfaire à tous ces besoins et ces contraintes? Comment analyser les visions parfois opposées sur le devenir de notre agriculture ?

L'objectif de la démarche, soutenue par la Fondation Charles Léopold Mayer, est de :

- Se donner les moyens de baliser les chemins du possible vers une agriculture viable et désirable en construisant un scénario agricole et alimentaire durable, crédible, compréhensible et quantifié **physiquement pour la France à l'horizon 2050.**
- Fournir un cadre et une base cohérente au volet biomasse du scénario négaWatt 2011 (présenté publiquement le 29 septembre 2011) dont nous partageons les objectifs de sobriété, efficacité et durabilité.
- Ouvrir sur cette base, un débat transversal sur les territoires, en milieu agricole, auprès des **citoyens, sur l'orientation de notre agriculture en vue d'une interpellation des** instances politiques pour permettre la mise en place effective des conditions nécessaires aux évolutions.

Afterres2050 : premiers résultats

Les premiers ordres de grandeur des résultats produits suscitent débats et réflexions.

Un mix 50 % agriculture biologique/ 50 % agriculture intégrée peut nourrir la France et quelques voisins en 2050 mais notre assiette et nos paysages sont vraiment différents :

- La ration alimentaire contient plus de céréales, de fruits et légumes, et beaucoup moins de viande, de sucre et de lait.
- **Les sols ne sont jamais nus et une parcelle délivre jusqu'à 6 « productions »** - céréales, engrais verts, fruitiers, bois d'oeuvre, .. -, **contre une aujourd'hui.**
- Les troupeaux ont fortement réduit leurs effectifs.

Ces « bouleversements » libèrent 5 à 8 millions d'ha susceptibles de satisfaire d'autres besoins : production de biomasse pour l'énergie, la chimie verte ou les matériaux de construction, ...

Les émissions de gaz à effet de serre de la filière agricole et alimentaire ne sont toutefois divisées que par 2 (et non par 4).

Ce travail fournit un cadre indispensable aux exercices de prospective en cours ou à venir. Il met en évidence **l'ampleur des changements ou ruptures à préparer et permet de mettre en** interrelation et en cohérence les approches partielles effectuées par différents acteurs.

« Une parcelle = 6 produits » : moins d'intrants et plus de biodiversité

En 2050, l'agriculture conventionnelle est devenue une agriculture écologiquement intensive. Elle optimise la production de biomasse dans le temps et dans l'espace. Le principal mode de production agricole relève des principes de la production intégrée :

- Rotations longues, assolement intégrant des légumineuses.
- Lutte biologique.
- Travail très simplifié du sol (voire semis direct) permettant de reconquérir la fertilité des sols.
- Cultures intercalaires qui maintiennent un couvert végétal permanent.
- Présence **massive d'infrastructures agro-écologiques** comme les haies, arbres épars, zones humides.

Moins d'animaux mais mieux traités

La quantité d'animaux d'élevage est globalement divisée par 2, tant pour les bovins et caprins que pour les porcs et les volailles. Le seul cheptel inchangé est celui des ovins, qui valorisent des espaces spécifiques, inexploitable par ailleurs.

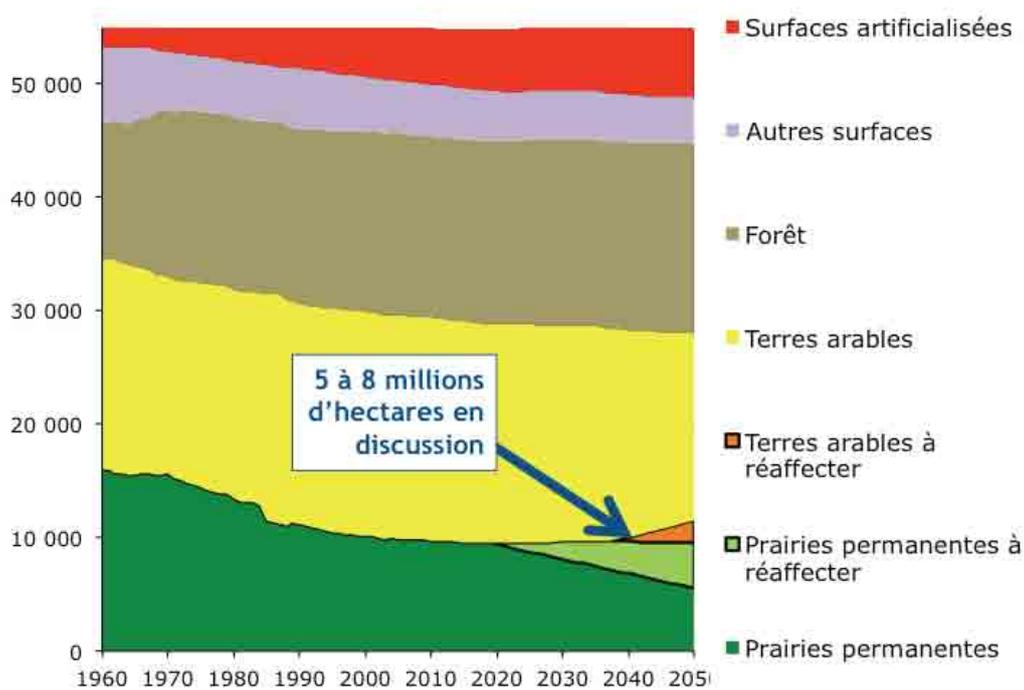
Quelle(s) utilisation(s) des terres libérées ?

L'application du scénario Afterres2050 modifie l'usage d'une partie des 55 millions d'hectares de la France métropolitaine. Une première série de contraintes tend à augmenter la pression sur les terres fertiles (prairies permanentes + terres arables) : augmentation de la population, artificialisation, réduction des importations, réduction des rendements.

Une seconde série, tend au contraire, à diminuer la pression : modification des régimes alimentaires, réduction des exportations. Au final, une fois couverts les besoins en alimentation (population + troupeaux) et en exportation (céréales et poudre de lait), 5 à 8 millions d'hectares (1/3 de terres arables, 2/3 de prairies permanentes) peuvent d'être réaffectés.

La biomasse produite sur ces terres peut servir à la production d'énergie, de matériaux de construction ou encore de source de carbone pour l'industrie chimique. Les terres arables concernées peuvent facilement changer d'utilisation : mise en place de culture annuelle (valorisation plante entière), de boisement - Taillis à courte rotation, forêt - ou de prairies. Pour les prairies permanentes, les options sont plus limitées : promouvoir une autre valorisation de l'herbe (énergie via la méthanisation) ou boisement.

Il serait possible de privilégier l'afforestation qui consiste à laisser la forêt reprendre du terrain sur la pâture. Cependant, l'afforestation à grande échelle génère des phénomènes de fermeture du paysage et la création de grands massifs boisés continus peut nuire à la biodiversité. Dès lors, l'afforestation reste un phénomène secondaire en 2050.



Annexe 6 : Présentation d’Agrimonde et du scénario AG0

Agrimonde : Agricultures et alimentations du monde en 2050 : scénarios et défis pour un développement durable, réalisé par l'INRA et le CIRAD

Cette prospective explore les futurs possibles des agricultures et alimentations du monde en 2050. Elle cherche à déceler les questions fondamentales auxquelles la recherche agronomique sera confrontée afin de fournir au CIRAD et à l'INRA les moyens d'anticiper et de préparer l'avenir en termes de dispositif et d'orientation de la recherche publique, comme en termes de positionnement stratégique au niveau international.

Les résultats sont organisés par grandes régions du monde, la France faisant partie du groupement « OCDE ».

Les résultats du scénario AG0 sont utilisés pour le scénario S3.

Définition d'AG0 (extrait de la synthèse finale du projet)

Nourrir le monde grâce à la croissance économique dans un contexte où l'environnement n'est qu'une priorité seconde

Dans le scénario Agrimonde GO, la croissance économique est forte dans toutes les régions, notamment en Asie, en Afrique subsaharienne et dans les **pays de l'ex Union soviétique, sous la double influence d'échanges commerciaux libéralisés et de coopérations économiques renforcées** entre pays. Les investissements dans la **recherche, l'innovation, l'éducation, la santé et les infrastructures, plus particulièrement** dans les pays en développement, sont élevés. Le progrès technique est important et **étendu à l'ensemble de la planète**. La pauvreté est réduite de façon substantielle. La production agricole augmente significativement dans toutes les zones, **d'abord grâce à la croissance des rendements mais aussi sous l'effet de la hausse des surfaces cultivées (+330 millions d'hectares entre 2003 et 2050) et des terres pâturées (+260 millions d'hectares sur la même période)**. Le rythme de la déforestation est très nettement plus faible que celui observé sur la période 1960-2000. Les systèmes de production agricole sont de plus en plus homogènes, fixés selon un modèle industriel avec fort recours à la motorisation et à la mécanisation, aux engrais et aux produits de traitement des cultures, au détriment des **savoirs locaux et au prix d'une perte de diversité, notamment en termes d'espèces cultivées**. L'irrigation est un **facteur clef** de la croissance des rendements. L'augmentation de la production agricole permet de satisfaire des besoins alimentaires en forte hausse sous le double jeu de la démographie et de l'élévation généralisée des niveaux de vie. Le nombre de sous-nourris a pu être divisé par 2,5 en 50 ans. **Dans toutes les zones, la part des calories d'origine animale dans les rations alimentaires augmente. La croissance économique mondiale s'accompagne de besoins énergétiques en forte progression. Ils sont satisfaits grâce au progrès technique et aux investissements**. Environ 10% de l'électricité mondiale est produite à partir d'énergies renouvelables ou de biomasse. Celle-ci est également utilisée pour la fabrication à grande échelle d'agrocarburants, avec des besoins en terres significatifs. Les utilisations non alimentaires des terres sont multipliées par six en 50 ans. **Dans ce scénario, les conditions sont remplies pour une montée en puissance de plusieurs problèmes environnementaux globaux, comme le changement climatique ou la surexploitation des ressources marines. Néanmoins, leur traitement n'est pas nécessairement anticipé**. En effet, **la préoccupation environnementale ne vient qu'en second, priorité étant donnée à satisfaire les besoins alimentaires et énergétiques immédiats**. De fait, la résolution des questions environnementales n'est mise en oeuvre que de façon réactive. En dépit de ressources financières disponibles et d'un contexte institutionnel mondial favorable, rien n'est réellement fait pour diminuer les émissions de gaz à effet de serre.

Annexe 7 : Détail des résultats de la disponibilité en BIBE /MB à l’horizon 2050

Scénario Tendancier

Changement d'usage des sols (enquête TERUTI-LUCAS) et hypothèses

	2006	2010	Evolution 2006-2010	Augmentation annuelle
Sols boisés	1 7041 870	16 999 786	-42 084	-0,000617934

Demande 2020 et retour au sol (Etude ADEME/Solagro) → 7128 ktep/an

Demande supplémentaire objectifs Plan National → 908 ktep/an

Disponibilité technico-économique au prix bord de route maximal (BIBE + MB + peupleraies + haies)

BIBE (ktep/an)	MB (ktep/an)	Autres (ktep/an) (Viticulture...)	Total (ktep/an)
6 672	2 304	1 547	10 523

L'évolution de la surface boisée est appliquée au gisement techniquement récoltable, avant déduction de la demande 2020 telle qu'estimée dans le rapport ADEME / SOLAGRO :

BIBE (ktep/an)	MB (ktep/an)	Autres (ktep/an) (Viticulture...)	Total (ktep/an)
13 800	2 304	1 547	17 651
Après prise en compte de l'évolution des sols boisés			17 327
Disponibilité supplémentaire à l'horizon 2050			9 291

⇒ **Soit 108 TWh/an**

Scénario 2

Disponibilité de base 2020 : 17 651 ktep/an

Ajout de peupleraies sur 50 % des prairies libérées (Afterres2050)

	Surface (Mha)	Dispo technique suppl.
Max	2,7	1 360
Min	1,7	850

Disponibilité S2

	Total (ktep/an)	Total (TWh/an)
Max	10 975	128
Min	10 465	122

Scénario 3

Changement d'usage des sols (AGO) et hypothèses :

Pertes d'exploitation BIBE	5 %
Pertes d'exploitation MB	10 %

Pas de retour au sol : fertilisation compensatrice utilisée

Augmentation de la surface forestière (AGO) : **13 %**

Disponibilité technico-économique au prix bord de route maximal (BIBE + MB + peupleraies + haies)

BIBE (ktep/an)	MB (ktep/an)	Autres (ktep/an) (Viticulture...)	Total (ktep/an)
14 989	2 950	1 547	19 486
	Disponibilité supplémentaire à l'horizon 2050		13 983

⇒ **Soit 163 TWh/an**

Annexe 8 : Détail des résultats de la disponibilité en biomasse agricole à l'horizon 2050

Scénario Tendancier

Evolution de la surface cultivée (Enquête Teruti-Lucas de l'Agreste)

2050

Surfaces cultivées 20 206 340

Pas de changement de retour au sol ni de pertes de récolte

Part dédiée au fourrage : 20 % du GTR

Besoins en litières

Besoins paille litière 2050 (t/an)

Bovins	10859258
Porcins	366302
Caprins	669327
Ovins	463946
Total	12358833

	Céréales				Colza	Tournesol	Maïs
	Blé	Orge	Seigle	Avoine			
Part des surfaces cultivées	0,29	0,084	0,0016	0,0052	0,078	0,037	0,084
Surface plantée (ha)	5838091	1701915	31732	105830	1576235	7475808	1702674
Rendement à l'ha (t/ha)	7,5	6,8	5,2	4,9	3,8	2,4	8,9
Production (t/an)	43732167	11573024	165009	518569	5989692	1794192	15153797
Ratio paille grain	0,8	0,8	0,8	0,8	1,6	3,3	0,7
Humidité (%)	0,15	0,15	0,15	0,15	0,45	0,4	0,4
GTOT paille	34985734	9258420	132007	414855	9583507	5920835	10607658
GTR	17492867	4629210	66003	207427	4791753	2960417	5303829
Total (thumides)	22395508				4791753,3	2960417	5303829
GTR après élevage (t humides)	5557573				4791753	2960417	5303829
GDD (Mts)	3,54				1,77	1,19	2,13
PCI (MWh/ts)	4,78				4,58	6,78	4,58
GDD (TWh/an)	16,92				8,11	8,07	9,76

⇒ **Soit 43 TWh/an**

Scénario 2

Diminution des têtes de bétail de 50 %

Pas de changement de retour au sol ni de pertes de récolte

Part dédiée au fourrage : 20 % du GTR

Evolution de la surface cultivée (Enquête Teruti-Lucas de l'Agreste)

Perte de terres arables

Min	1,67 Mha
Max	2,67 Mha

Besoins en litières

	Besoins paille litière 2010	2050 S2 (t/an)
Bovins	12 973 370	6 486 685
Porcins	416 049	208 024
Caprins	369 702	184 851
Ovins	902 147	902 147
Total	14 661 268	7 781 708

MIN

	Céréales						
	Blé	Orge	Seigle	Avoine	Colza	Tournesol	Maïs
Répartition cultures (frac)	0,29	0,08	0,00	0,01	0,08	0,04	0,08
Surface plantée (ha)	4655394	1357136	25304	84391	1256916	596133	1357741
Rendement à l'ha (t/ha)	7,5	6,8	5,2	4,9	3,8	2,4	8,9
Production (t/an)	34872778	9228528	131581	413516	4776283	1430720	12083897
Ratio paille grain	0,8	0,8	0,8	0,8	1,6	3,3	0,7
Humidité (%)	0,15	0,15	0,15	0,15	0,45	0,4	0,4
GTOT paille	27898223	7382822	105265	330812	7642052	4721375	8458728
GTR	13949111	3691411	52632	165406	3821026	2360687	4229364
Total (thumides)	17858561				3821026	2360687	4229364
GTR après élevage (t humides)	6505141				3821026	2360687	4229364
GDD (Mts)	3,70				1,41	0,95	1,70
PCI (MWh/ts)	4,78				4,58	6,78	4,58
GDD (TWh/an)	17,69				6,46	6,44	7,79

⇒ **Soit 38 TWh/an**

MAX

	Céréales						
	Blé	Orge	Seigle	Avoine	Colza	Tournesol	Maïs
Répartition cultures (frac)	0,3	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1
Surface plantée (ha)	4944317	1441363	26874	89628	1334923	633130	1442006
Rendement à l'ha (t/ha)	7,5	6,8	5,2	4,9	3,8	2,4	8,9

Production (t/an)	37037058	9801270	139747	439179	5072709	1519513	12833849
Ratio paille grain	0,8	0,8	0,8	0,8	1,6	3,3	0,7
Humidité (%)	0,15	0,15	0,15	0,15	0,45	0,40	0,40
GTOT paille	29629646	7841016	111798	351343	8116334	5014394	8983695
GTR	14814823	3920508	55899	175672	4058167	2507197	4491847
Total (thumides)	18966902				4058167	2507197	4491847
GTR après élevage (t humides)	7391814				4058167	2507197	4491847
GDD (Mts)	4,21				1,50	1,01	1,81
PCI (MWh/ts)	4,78				4,58	6,78	4,58
GDD (TWh/an)	20,12				6,87	6,85	8,29

⇒ **Soit 42 TWh/an**

Scénario 3

Retour au sol : 15 %

Augmentation de la production animale (AGO) : + 63 %

Part dédiée au fourrage : 20 % du GTR

Evolution de la surface cultivée (AGO)

Surfaces cultivées AGO 17881430 ha

	Céréales				Colza	Tournesol	Maïs
	Blé	Orge	Seigle	Avoine			
Répartition cultures (frac)	0,3	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1
Surface plantée (ha)	5166370	1506096	28081	93654	1394876	661565	1506767
Rendement à l'ha (t/ha)	7,5	6,8	5,2	4,9	3,8	2,4	8,9
Production (t/an)	38700414	10241451	146023	458903	5300527	1587755	13410225
Ratio paille grain	0,8	0,8	0,8	0,8	1,6	3,3	0,7
Humidité (%)	0,15	0,15	0,15	0,15	0,45	0,4	0,4
GTOT paille	30960331	8193161	116818	367122	8480844	5239593	9387158
GTR	21672232	5735212	81773	256986	5936591	3667715	6571010
Total (thumides)	27746203				5936591	3667715	6571010
GTR après élevage (t humides)	-2355291				5936591	3667715	6571010
GDD (Mts)	0				2,78	1,87	3,35
PCI (MWh/ts)	4,78				4,58	6,78	4,58
GDD (TWh/an)	0				12,73	12,68	15,34

Il n'y a pas assez de pailles de céréales pour couvrir tous les usages.

⇒ **Soit 41TWh/an**

Annexe 9 : Détail des résultats de la disponibilité en cultures énergétiques à l’horizon 2050

Scénario Tendancier

Projet HEIMSTA : augmentation des terres cultivées non alimentaires de 0,014 % entre 2020 et 2050

⇒ **Soit 94 TWh/an**

Scénario 2

Evolution de la surface dédiée (Afterres2050)

1,7 à 2,7 Mha de terres arables sont disponibles

Hypothèse : le même mix de cultures énergétiques est conservé.

Disponibilité en cultures énergétiques à l'horizon 2050 :

MIN

	Triticale	Peuplier	Saule	Eucalyptus	Miscanthus
Rendement (ts/ha)	12	10	10	10	16
% mix	40%	11%	11%	11%	27%
Surface (kha)	668	183,7	183,7	183,7	450,9
Qtot (kt)	8016	1837	1837	1837	7214,4
PCI (MWh/t)	4,8	5,2	5,2	5,2	5,1
Gisement (TWh/an)	38	10	10	10	37

⇒ **Soit 104 TWh/an**

MAX

	Triticale	Peuplier	Saule	Eucalyptus	Miscanthus
Rendement (ts/ha)	12	10	10	10	16
% mix	40%	11%	11%	11%	27%
Surface (kha)	1068	293,7	293,7	293,7	720,9
Qtot (kt)	12816	2937	2937	2937	11534,4
PCI	4,8	5,2	5,2	5,2	5,1
Gisement (TWh/an)	62	15	15	15	59

⇒ **Soit 166 TWh/an**

Scénario 3

Evolution de la surface dédiée (AGO)

Surfaces cultivées : + 12 %

Surfaces dédiées à l'alimentaire : - 3,6 %

→ soit 2 943 078 ha dédiés aux cultures énergétiques

Hypothèse : 50 % triticale, 50 % miscanthus.

Disponibilité en cultures énergétiques à l'horizon 2050

	Triticale	Miscanthus
Rendement (ts/ha)	12	16
% mix	50%	50%
Surface (ha)	1 471 539	1 471 539
Qtot (t)	17 658 470	23 544 627
PCI (MWh/t)	4,8	5,1
Gisement (TWh/an)	85	120

⇒ **Soit 205 TWh/an**

**Avec vous,
en réseau**

